

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**SOMBREAMENTO ARBÓREO E DESEMPENHO  
TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**

**LUCIANE CLEONICE DURANTE**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA**

Cuiabá/MT  
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**SOMBREAMENTO ARBÓREO E DESEMPENHO  
TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**

**LUCIANE CLEONICE DURANTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Física Ambiental.

**Profa. Dr<sup>a</sup>. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA**

Cuiabá/MT

2012

### Dados Internacionais de Catalogação na Fonte

D951s Durante, Luciane Cleonice.

Sombreamento arbóreo e desempenho termoenérgico de edificações / Luciane Cleonice Durante. – 2012.

xix, 198113 f. ; 30 cm : color. (incluem figuras e tabelas)

Orientadora: Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira

Tese (doutorado) -- Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2012.

**Catalogação na fonte: Maurício S.de Oliveira CRB/1-1860.**

## **DEDICATÓRIA**

As vitórias somente são possíveis a partir da união de esforços de todos. Esta vitória não foi construída somente por minhas mãos, mas pelo companheirismo de todo o seio familiar. A dedico, em especial, ao Rogério, ao Gabriel e a Beatriz.

## **AGRADECIMENTOS**

- Agradeço a Deus, fonte inesgotável de bênçãos e amor, por mais esta oportunidade. Pai! Reconheço a sua misericórdia!
- À minha mãe Odila e irmã Nice, por tudo o que fazem por mim. Não tenho palavras para expressar a minha eterna gratidão.
- Em especial, agradeço à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, misto de mãe e orientadora, por sua presença constante e serena, que torna mais suave a caminhada de todos ao seu lado;
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pela dedicação e condução impecável do PGFA;
- Ao colega Ivan Júlio Apolônio Callejas, pela ajuda durante todo o trabalho;
- À minha querida cunhada Rejane, pela revisão;
- A todos os professores, colegas e amigos que me acompanharam na construção do conhecimento e trabalho traduzido nesta tese.

*Elucidário sobre árvores e semelhantes para desuso obrigatório*

- Semente sf.* Aquilo que quando nasce deixa de ser.  
Tentativa de indivíduo por procuração.  
É verdadeira embora o nome diga o contrário.
- Folha sf.* Parte vegetal do prisma, língua de árvore onde o silêncio se inscreve.  
Boca dos ventos.  
Anomalia via celulose com frente e verso (se for poesia).
- Galho sm.* Preferencial de pássaros.  
Aparador de ventos.  
Diz-se a única coisa capaz de segurar o ar.  
Braço de árvore.  
Réstia de sobrevivência.
- Fruto sm.* Tentativa de pessoa com a vantagem de sair de galho.  
Possui caroço adequado à queda.  
Canto de árvore, só ouvido se visto.  
Resultado experimental de planta.
- Flor sf.* Ilustração de um inconformismo de árvore.  
Expressão sentimental do jeito da planta.  
Fole existencial com detalhes interiores minuciosos onde se condensa toda a sapiência vegetal.
- Raiz sf.* Entidade necessária ao fazejamento telúrico.  
O que tem medo de sol.  
Coisa que come chão para fazer árvore.  
Aquilo cuja caminhada só é vista pelo tempo.
- Copa sf.* Fábrica de sombras.  
Erupção luminosa de verde coincidindo com a lucidez vegetativa.
- Árvore sf.* Sentinela do apocalipse.  
Provadora de todos os sustos.  
O que enraíza de medo.  
Pessoa votada a desfolhamento.  
Professora da terra.  
Aquilo que nasce sabendo.
- Homem sm.* Indivíduo que na tentativa de árvore perdeu a raiz.  
Diz-se daquele que usa o fruto de forma negativa.  
Pessoa cujo tronco é desprovido de casca, o que o torna menos resistente ao existir.  
Ser que eventualmente galha quando é triste e floresce quando é festa.  
Indivíduo inconsequente, cuja inveja de árvore o torna homem.
- Água sf.* Transparência que nada.  
Vida que escorre com tendência a inundação.  
Beira de planta.  
Assédio liquefeito com deslimites de margens, cuja ocorrência prevalece nos vãos da terra.
- Terra sf.* Indivíduo que coabita as próprias entranhas.  
Pequeno sítio arredondado com direito a gravidez e gravidade.  
Diz-se uma ruína próspera. Fruto de um sopro do universo.  
Lugar de árvores e semelhantes.

## SUMÁRIO

|                                                                                            |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| SUMÁRIO .....                                                                              | viii  |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                     | x     |
| LISTA DE TABELAS .....                                                                     | xviii |
| LISTA DE EQUAÇÕES .....                                                                    | xx    |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                                                    | xxi   |
| RESUMO.....                                                                                | xxii  |
| ABSTRACT.....                                                                              | xxiii |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                        | 1     |
| 1.1. PROBLEMÁTICA.....                                                                     | 1     |
| 1.2. JUSTIFICATIVA.....                                                                    | 3     |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                             | 5     |
| 2.1. CLIMA E VEGETAÇÃO – INTERFACES COM DESEMPENHO<br>TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES ..... | 5     |
| 2.2. CLIMA NA REGIÃO DE ESTUDO .....                                                       | 24    |
| 2.3. OS ARQUIVOS CLIMÁTICOS DE SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO<br>DE EDIFÍCIOS .....               | 31    |
| 2.4. ESTRATÉGIAS DE ADEQUAÇÃO DA ARQUITETURA AO CLIMA<br>E CONFORTO TÉRMICO .....          | 42    |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS .....                                                               | 54    |
| 3.1. MATERIAIS.....                                                                        | 55    |
| 3.1.1. Local do estudo.....                                                                | 55    |
| 3.1.2. Caracterização dos objetos de estudo .....                                          | 58    |
| 3.1.3. Equipamentos de medição.....                                                        | 66    |
| 3.2. MÉTODO .....                                                                          | 68    |
| 3.2.1. Variáveis da pesquisa e condições internas de medição .....                         | 68    |
| 3.2.2. Período de realização das medições.....                                             | 69    |
| 3.2.3. Instrumentação.....                                                                 | 70    |
| 3.2.4. Método para análise dos resultados .....                                            | 77    |
| 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....                                               | 94    |
| 4.1. SOMBREAMENTO ARBÓREO E CONDIÇÕES TERMO-<br>HIGROMÉTRICAS DOS PÁTIOS .....             | 94    |
| 4.1.1. Microclima na estação seca.....                                                     | 94    |
| 4.1.2. Microclima na estação chuvosa.....                                                  | 99    |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.3. Atenuação relativa da temperatura do ar proporcionada pelas unidades arbóreas de sombreamento..... | 107 |
| 4.1.4. O uso e ocupação do solo nas três escolas .....                                                    | 116 |
| 4.2. SOMBREAMENTO ARBÓREO E DESEMPENHO TERMO-LUMÍNICO DAS SALAS.....                                      | 118 |
| 4.2.1. Insolação nas salas .....                                                                          | 118 |
| 4.2.2. Desempenho termo-lumínico das salas na estação seca .....                                          | 137 |
| 4.2.3. Desempenho termo-lumínico das salas da estação chuvosa .....                                       | 142 |
| 4.2.4. Sombreamento arbóreo e temperaturas superficiais dos fechamentos .....                             | 161 |
| 4.3. COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MEDIDAS E SIMULADAS                                                      | 172 |
| 4.3.1. Comparação das temperaturas externas medidas e simuladas ..                                        | 172 |
| 4.3.2. Comparação das temperaturas internas medidas e simuladas ...                                       | 175 |
| 4.4. DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO .....                                                                     | 178 |
| 4.4.1. Desempenho térmico das salas com e sem sombreamento .....                                          | 178 |
| 5. CONCLUSÃO .....                                                                                        | 191 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                       | 193 |
| ANEXOS.....                                                                                               | 201 |
| ANEXO 1: CARACTERIZAÇÃO DAS ESPÉCIES .....                                                                | 201 |
| ANEXO 2: TESTES PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA .....                                          | 203 |
| ANEXO 3: CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS QUANTO ÀS CARACTERÍSTICAS TERMOFÍSICAS.....                          | 206 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Instrumentação na área sombreada e exposta da fachada sudoeste .....                                                                                                                                                        | 16 |
| Figura 2 – Modelagem da árvore (a) e o equivalente de sombreamento (b).....                                                                                                                                                            | 17 |
| Figura 3 – Modelagem do espaçamento entre as pérgolas representativas do sombreamento arbóreo no Energy Plus para a espécie de Índice de Área Foliar alto – Aroeira Salsa (a), médio – Pata de vaca (b) e baixo – Falsa Murta (c)..... | 19 |
| Figura 4 – Variação do Fator de Luz Diurna (FLD) conforme a distância da janela para os modelos de salas com 5m de largura (a) e 10m de largura (b) simulados com o EnergyPlus, Daysim/Radiance e TropLux .....                        | 23 |
| Figura 5 – Localização geográfica do estado de Mato Grosso.....                                                                                                                                                                        | 24 |
| Figura 6 – Classificação climática de Mato Grosso .....                                                                                                                                                                                | 25 |
| Figura 7 – Classificação climática de Köppen-Geiger para a América do Sul .....                                                                                                                                                        | 26 |
| Figura 8 - Corte esquemático do relevo mato-grossense e a localização da cidade de Cuiabá.....                                                                                                                                         | 27 |
| Figura 9 - Médias mensais de precipitação em Cuiabá/MT, período de 1901 a 1989.....                                                                                                                                                    | 29 |
| Figura 10 – Dados comparativos das médias mensais da temperatura de bulbo seco (a) e umidade relativa (b) do arquivo epw (SWERA, 2011) e TRY (LEÃO, 2007) .....                                                                        | 37 |
| Figura 11 - Estações climatológicas com coletas regulares em Cuiabá/MT.....                                                                                                                                                            | 39 |
| Figura 12 – Dados históricos de médias mensais de temperatura do ar em Cuiabá/MT.....                                                                                                                                                  | 40 |
| Figura 13 – Zona de Conforto na Carta Bioclimática gerada com o critério do PMV .....                                                                                                                                                  | 43 |
| Figura 14 – Carta bioclimática de Cuiabá de acordo com o modelo de conforto do PMV .....                                                                                                                                               | 45 |
| Figura 15 – Carta bioclimática de Cuiabá de acordo com o modelo de Conforto Adaptativo .....                                                                                                                                           | 46 |

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16 – Diagnóstico climático da Temperatura de Bulbo Seco em Cuiabá/MT e zona de conforto para o modelo de conforto do PMV (a) e modelo de conforto Adaptativo (b)..... | 49 |
| Figura 17 – Médias da temperatura de bulbo seco e umidade em Cuiabá/MT e as zona de conforto térmico do modelo Adaptativo (a) do PMV (b).....                                | 52 |
| Figura 18 – Localização das escolas selecionadas para a pesquisa no perímetro urbano de Cuiabá.....                                                                          | 56 |
| Figura 19 – Posição relativa das edificações e das salas sem sombreamento (sl) e na condição de sombreamento arbóreo (sb) nas Escolas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....              | 57 |
| Figura 20 – Muro da divisa dos fundos da Escola 1.....                                                                                                                       | 58 |
| Figura 21 – Circulação externa na lateral das salas constituída pelo beiral.....                                                                                             | 59 |
| Figura 22 – Interior das salas de aula com iluminação lateral por janelas baixas e altas .....                                                                               | 60 |
| Figura 23 – Corte esquemático das Escolas 1 e 3 (a) e Escola 2, com desnível de 1,00m entre blocos (b) .....                                                                 | 60 |
| Figura 24 – Projeção de copa esférica (a), elipsoidal (b) e representação esquemática do procedimento de determinação da altura das árvores (c).....                         | 62 |
| Figura 25 – Uso e ocupação do solo na Escola 1 (a), Escola 2 (b) e Escola 3 (c). 65                                                                                          |    |
| Figura 26 - Sensor HOBO U12-012 de temperatura de bulbo seco do ar, umidade relativa do ar e iluminância (a) e cabo TMC20HD com sensor de temperatura (b) .....              | 66 |
| Figura 27 – Sensor HOBO UA002-64 de iluminância externa (a) e Ceptômetro de Barra (b) .....                                                                                  | 67 |
| Figura 28 – Estação micrometeorológica automática Vantage Pro 2 Plus (a), transportador de dados HOBO-U-SHUTLLE (b) e Optic USB Base Station Pendant (c).....                | 67 |
| Figura 29 – Abrigos termométricos e estações meteorológicas portáteis instalados no sol (centro dos pátios) da Escola 1 (a), Escola 2 (b), estação seca .....                | 70 |
| Figura 30 – Abrigos meteorológicos instalados no sol (centro dos pátios) da Escola 1 (a), Escola 2 (b) e Escola 3 (c), estação chuvosa.....                                  | 71 |

|                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 31 - Abrigo termométrico e estação meteorológica portátil sob a copa de Ficus na Escola 1, estação seca (a) e estação chuvosa (b); sob a copa de Mangueira na Escola 2, estação chuvosa (c) e sob a copa de Oiti na Escola 3, estação chuvosa (d)..... | 72 |
| Figura 32 – Detalhe da instalação do HOBO no interior do abrigo meteorológico (a); Detalhe da instalação da esfera para medição da temperatura de globo.....                                                                                                  | 73 |
| Figura 33 – Sensor HOBO UA002-64 de iluminância externa fixado em posição horizontal em abrigo meteorológico .....                                                                                                                                            | 73 |
| Figura 34 - Procedimento de medição da radiação solar global, a céu aberto (a) e em quatro quadrantes sob a copa da unidade arbórea (b) .....                                                                                                                 | 74 |
| Figura 35 - Relação entre posição e nomenclatura dos pontos de medição.....                                                                                                                                                                                   | 75 |
| Figura 36 – Cabo TMC20HD com sensor para medição de temperatura superficial nas paredes externas proteção com tubo de 100mm de diâmetro cortado ao meio (a) e detalhe da fixação na parede (b) .....                                                          | 76 |
| Figura 37 – Fixação do cabo TMC20HD com sensor para medição de temperatura superficial das paredes internas (a); detalhe da vedação do sensor com pasta térmica (b) .....                                                                                     | 76 |
| Figura 38 - Acurácia do sensor HOBO UA002-64 e o espectro da luz visível.....                                                                                                                                                                                 | 81 |
| Figura 39 – Modelagem da unidade arbórea de sombreamento.....                                                                                                                                                                                                 | 88 |
| Figura 40 - Modelo exposta_NS (a), exposta_LO (b), sombr_O (c), sombr_N (d), symb_total_NS (e) e symb_total_LO (f) .....                                                                                                                                      | 90 |
| Figura 41 - Médias horárias da temperatura ao sol e à sombra, nas Escolas 1 e 2, estação seca, período de 19 a 26/07/2010 .....                                                                                                                               | 95 |
| Figura 42 - Médias horárias da umidade relativa (a) e umidade absoluta (b) ao sol e à sombra, nas Escolas 1 e 2, estação seca, período de 19 a 26/07/2010 .....                                                                                               | 95 |
| Figura 43 – Marcha diária da temperatura externa máxima, média e mínima ao sol e à sombra, nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010 .....                                                                                          | 96 |
| Figura 44 - Marcha diária da umidade relativa externa máxima, média e mínima a sol e à sombra nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010 .....                                                                                       | 97 |

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 45 - Marcha diária da umidade absoluta externa máxima, média e mínima a sol e à sombra nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010 .....               | 98  |
| Figura 46 - Médias horárias de temperatura do ar ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011 .....                           | 100 |
| Figura 47 - Marcha horária da umidade relativa do ar ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011 .....                       | 101 |
| Figura 48 - Marcha horária da umidade absoluta do ar ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011 .....                       | 102 |
| Figura 49 – Marcha diária das temperaturas máximas, médias e mínimas ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011.....        | 103 |
| Figura 50 – Marcha diária das umidades relativas máximas, médias e mínimas ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011.....  | 105 |
| Figura 51 – Marcha diária das umidades absolutas máximas, médias e mínimas ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011.....  | 106 |
| Figura 52 – Temperatura e radiação solar no período ao longo do dia, Escola 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010 .....                                             | 109 |
| Figura 53 - Variação relativa da temperatura (a) e umidade relativa do ar (b), na condição de sol e sombra, todo o período de medição, estação seca, período de 19 a 26/07/2010 ..... | 110 |
| Figura 54 – Comportamento da temperatura e radiação solar ao longo de um dia de medição, Escola 1 (a), 2 (b) e 3 (c), estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011.....        | 113 |
| Figura 55 – Marcha horária da variação relativa da temperatura (a) e da umidade do ar (b) na condição de sol e sombra, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011.....       | 114 |
| Figura 56 - Uso e ocupação do solo nas Escolas 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....                                                                                                              | 117 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 57 – Sombreamento na Escola 1 às 8h (a), 10h (b), 12h (c), 14h (d), 16h (e) e 18h (f) devido às obstruções da própria edificação e das unidades arbóreas, no solstício de verão .....                                                                                                                                                                                              | 120 |
| Figura 58 – Máscara de sombra, devida às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, na sala sem sombreamento, Escola 1 (1sl) .....                                                                                                                                                                                                                                        | 123 |
| Figura 59 – Máscara de sombra, devida às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, na sala com sombreamento, Escola 1 (1sb).....                                                                                                                                                                                                                                         | 124 |
| Figura 60 – Condição de sombreamento da sala sem sombreamento (1sl) (a) e com sombreamento (1sb) (b) pela fachada principal – 339o .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 125 |
| Figura 61 – Condição de exposição ao sol da sala sem sombreamento (1sl) pela fachada secundária – 159o (a) e da sala com sombreamento (1sb) pela unidade arbórea 29, da espécie Ficus pela fachada secundária – 159o (b), Escola 1 .....                                                                                                                                                  | 126 |
| Figura 62 – Sombreamento na Escola 2 às 8h (a), 10h (b), 12h (c), 14h (d), 16h (e) e 18h (f) devido às obstruções da própria edificação e das unidades arbóreas, no solstício de verão .....                                                                                                                                                                                              | 127 |
| Figura 63 – Máscara de sombra, devida às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, nas salas sem sombreamento (2sl) e com sombreamento (2sb), Escola 2 .....                                                                                                                                                                                                             | 130 |
| Figura 64 – Condição de exposição da sala sem sombreamento (2sl) pela fachada principal - 83o (a), da sala sem sombreamento (2sl) pela fachada secundaria - 263o e da sala com sombreamento (2sb) pela fachada principal - 83o (b) e da sala com sombreamento (2sb) pela fachada secundária - 263o - com proteção total pelas unidades arbóreas 2/86 e 2/87 da espécie Mangueira (c)..... | 131 |
| Figura 65 – Sombreamento na Escola 3 às 8h (a), 10h (b), 12h (c), 14h (d), 16h (e) e 18h (f) devido às obstruções da própria edificação e das unidades arbóreas, no solstício de verão .....                                                                                                                                                                                              | 132 |
| Figura 66 – Máscara de sombra, devida às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, nas salas sem sombreamento (3sl) e com sombreamento (3sb), Escola 3 .....                                                                                                                                                                                                             | 135 |
| Figura 67 – Condição de exposição ao sol da sala com sombreamento (3sb) com proteção total pelas unidades arbóreas 3/10 e 3/11 da espécie Oiti (a) e das salas                                                                                                                                                                                                                            |     |

|                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| sem sombreamento (3sl) pela fachada secundária – 318o - e com sombreamento (3sb) pela fachada principal – 138o (b) .....                                                             | 136 |
| Figura 68 - Marcha horária da temperatura de bulbo seco (a) e umidade relativa (b) no centro das salas expostas e sombreadas, estação seca, período de 19 a 26/07/2010.....          | 137 |
| Figura 69 – Marcha horária da temperatura e umidade relativa externa e interna nas salas sem sombreamento na Escola 1 (a) e na Escola 2 (b), dia 24/07/2010                          | 138 |
| Figura 70 – Iluminância média horária nos pontos de medição das salas da Escola 1 (a) e 2 (b), dia 24/07/2010 .....                                                                  | 140 |
| Figura 71 – Gradiente de temperatura de bulbo seco e iluminância nos três pontos de medição das salas, considerando o período diurno, estação seca, período de 19 a 26/07/2010 ..... | 141 |
| Figura 72 – Marcha horária da temperatura de bulbo seco (a), umidade relativa (b) e iluminância (c) externa e interna, sala 2sl, estação chuvosa, período de 11 a 17/12/2010.....    | 143 |
| Figura 73 – Desempenho térmico da sala sem sombreamento e com sombreamento, Escola 2, dia 16/12/2010 .....                                                                           | 144 |
| Figura 74 – Desempenho térmico das salas sem sombreamento arbóreo (a) e com sombreamento arbóreo(b), Escola 1, dia 02/01/2010 .....                                                  | 146 |
| Figura 75 – Desempenho térmico das salas sem sombreamento arbóreo (a) e com sombreamento arbóreo (b), Escola 2, dia 02/01/2010 .....                                                 | 147 |
| Figura 76 – Desempenho térmico das salas sem sombreamento arbóreo (a) e com sombreamento arbóreo (b), Escola 3, dia 02/01/2010 .....                                                 | 148 |
| Figura 77 - Médias horárias da iluminância externa ao sol e sob a copa do Ficus (a), da Mangueira (b) e do Oiti (c), estação chuvosa, período de 28/12/2010 a 23/01/2011.....        | 151 |
| Figura 78 – Fração da radiação visível sob a copa para o Ficus, Mangueira e Oiti .....                                                                                               | 152 |
| Figura 79 – Fração da radiação PAR e visível sob a copa para o Ficus, Mangueira e Oiti.....                                                                                          | 153 |

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 80 – Marcha horária da iluminância externa e interna, nas salas sem sombreamento nas Escolas 1 (a), 2 (c), 3 (e) e com sombreamento nas Escolas 1 (b), 2 (d) e 3 (f) .....                            | 155 |
| Figura 81 – Marcha horária da iluminância externa e Fator de Luz Diurna (FLD) nas salas sem sombreamento nas Escolas 1 (a), 2 (c), 3 (e) e com sombreamento nas Escolas 1 (b), 2 (d) e 3 (f) .....           | 156 |
| Figura 82 – Iluminância e temperatura no interior das salas com e sem sombreamento da Escola 1 (a), Escola 2 (b) e Escola 3(c) .....                                                                         | 158 |
| Figura 83 – Disponibilidade de luz natural sob as copas e no interior das salas a 0,60m da janela baixa .....                                                                                                | 161 |
| Figura 84 - Médias horárias da temperatura de globo ao sol e à sombra nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 20 a 26/07/2010 .....                                                              | 162 |
| Figura 85 - Médias horárias da temperatura de globo ao sol internas e externas nas salas da Escola 1 (a) e da Escola 2 (b), estação seca .....                                                               | 163 |
| Figura 86 - Temperaturas superficiais do piso (a), cobertura (b) e paredes (c), na estação seca .....                                                                                                        | 165 |
| Figura 87 - Marcha horária da temperatura de globo no centro da sala 2sl e 2sb, estação chuvosa, período de 11 a 16/12/2010 .....                                                                            | 166 |
| Figura 88 - Médias horárias da temperatura de globo ao sol, à sombra e no centro das salas com e sem sombreamento nas Escolas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011..... | 167 |
| Figura 89 – Temperaturas superficiais internas dos forros, estação chuvosa, dia 02/01/2011.....                                                                                                              | 168 |
| Figura 90 – Temperaturas superficiais externas e internas das paredes, estação chuvosa, dia 02/01/2011.....                                                                                                  | 170 |
| Figura 91 – Marcha horária da temperatura externa medida e simulada com dados locais, período de 29/01/2010 a 23/01/2011, Escola 2 .....                                                                     | 173 |
| Figura 92 – Correlação linear para a temperatura externa medida e simulada com dados locais, período de 29/01/2010 a 23/01/2011, Escola 2 .....                                                              | 173 |
| Figura 93 – Temperatura interna simulada e medida da sala sem sombreamento (a) e da sala com sombreamento (b).....                                                                                           | 177 |

|                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 94 – Diferença entre a Temperatura Neutra de Conforto e a temperatura interna dos modelos para as 8760 horas anuais.....                                                                                                                          | 181 |
| Figura 95 – Conforto térmico nos modelos simulados .....                                                                                                                                                                                                 | 182 |
| Figura 96 – Diferença entre as temperaturas superficiais externas e internas da parede orientada a oeste nos modelos exposta_NS (a), sombr_O (c) e sombr_total_NS (e) e os respectivos balanços térmicos em b), d) e f), para as 8760 horas anuais ..... | 184 |
| Figura 97 – Diferença entre a temperatura superficial externa e interna da parede com orientação norte nos modelos exposta_LO (a), sombr_N (c), sombr_ total (e) e os respectivos balanços térmicos em b), d) e f) .....                                 | 186 |
| Figura 98 – Balanço térmico das salas orientadas a norte-sul e leste-oeste.....                                                                                                                                                                          | 188 |
| Figura 99 – Demanda para resfriamento das salas orientadas a norte-sul e leste-oeste. ....                                                                                                                                                               | 189 |
| Figura 100 - Ficus (a); folhas e floração (b).....                                                                                                                                                                                                       | 201 |
| Figura 101 - Mangueira (a); folhas e floração (b) .....                                                                                                                                                                                                  | 202 |
| Figura 102 - Oiti (a); folhas e floração (b).....                                                                                                                                                                                                        | 202 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Energia gasta para aquecimento, resfriamento e economia de energia nos modelos simulados de paredes com inércia leve e pesada.....                                                                                                                                 | 15  |
| Tabela 2 - Médias mensais de precipitação (mm) no período de 1901 a 1989; velocidade do vento (m/s), módulo da velocidade resultante (m/s), módulo da direção resultante do vento (graus) e direção relativa da resultante do vento período de 1970 a 1989, em Cuiabá/MT..... | 29  |
| Tabela 3 – Frequências relativas da direção do vento em Cuiabá/MT, de 1970 a 1989.....                                                                                                                                                                                        | 30  |
| Tabela 4 - Médias mensais de pressão, temperatura média, máxima e mínima, umidade relativa média, evaporação à sombra e insolação em Cuiabá/MT, de 1970 a 1989.....                                                                                                           | 31  |
| Tabela 5 – Dados e formato de um arquivo TRY.....                                                                                                                                                                                                                             | 33  |
| Tabela 6 – Dados do cabeçalho de um arquivo TMY .....                                                                                                                                                                                                                         | 35  |
| Tabela 7 - Arquivo climático epw de Cuiabá/MT .....                                                                                                                                                                                                                           | 36  |
| Tabela 8 – Estratégias bioclimáticas para Cuiabá e horas correspondentes de acordo com o modelo do PMV da ASHRAE 55 (2004).....                                                                                                                                               | 44  |
| Tabela 9 – Dados relativos à implantação e situação das escolas .....                                                                                                                                                                                                         | 56  |
| Tabela 10 – Materiais construtivos e características técnicas .....                                                                                                                                                                                                           | 61  |
| Tabela 11 – Cores das paredes externas e internas.....                                                                                                                                                                                                                        | 61  |
| Tabela 12 – Inventário das unidades arbóreas de sombreamento (UA) das salas.                                                                                                                                                                                                  | 63  |
| Tabela 13 – Posições relativas das unidades arbóreas de sombreamento.....                                                                                                                                                                                                     | 63  |
| Tabela 14 – Simultaneidade das medições nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa                                                                                                                                                                                                 | 70  |
| Tabela 15 - Coeficiente de Chaminé (Cs) .....                                                                                                                                                                                                                                 | 84  |
| Tabela 16 - Coeficiente de Vento (Cw) .....                                                                                                                                                                                                                                   | 85  |
| Tabela 17 – Ganhos de calor solar pelos fechamentos nos modelos.....                                                                                                                                                                                                          | 92  |
| Tabela 18 – Inventário das unidades arbóreas de sombreamento .....                                                                                                                                                                                                            | 108 |

|                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 19 - Variação relativa da temperatura e umidade com o IAF e AFT, durante as horas de brilho solar, estação seca e chuvosa .....                                                                                       | 115 |
| Tabela 20 - Ângulos de sombra devido a elementos da própria edificação .....                                                                                                                                                 | 118 |
| Tabela 21 - Ângulos de sombra devido a obstruções externas à edificação .....                                                                                                                                                | 119 |
| Tabela 22 – Insolação na sala sem sombreamento, Escola 1 (1sl) .....                                                                                                                                                         | 121 |
| Tabela 23 – Insolação na sala com sombreamento, Escola 1 (1sb) .....                                                                                                                                                         | 122 |
| Tabela 24 - Insolação na sala sem sombreamento da Escola 2 (2sl) .....                                                                                                                                                       | 128 |
| Tabela 25- Insolação na sala com sombreamento da Escola 2 (2sb) .....                                                                                                                                                        | 129 |
| Tabela 26 – Insolação na sala sem sombreamento, Escola 3 (3sl) .....                                                                                                                                                         | 133 |
| Tabela 27 - Insolação na sala com sombreamento, Escola 3 (3sb) .....                                                                                                                                                         | 134 |
| Tabela 28 - Gradiente da temperatura de bulbo seco e iluminância diurnas nas salas 1sl e 2sl .....                                                                                                                           | 141 |
| Tabela 29 – Temperatura média, máxima e mínima nas salas com sombreamento arbóreo .....                                                                                                                                      | 149 |
| Tabela 30 - Disponibilidade de luz natural sob as copas e no interior das salas a 0,60m da janela .....                                                                                                                      | 160 |
| Tabela 31 - Estatística descritiva da temperatura externa simulada com dados locais e medida, período de 29/12/2010 a 23/01/2011, Escola 2 .....                                                                             | 172 |
| Tabela 32 – Correlação linear das médias mensais da temperatura de bulbo seco (oC) do arquivo epw com as bases de dados climáticas locais .....                                                                              | 174 |
| Tabela 33 – Temperatura do solo sob a edificação .....                                                                                                                                                                       | 175 |
| Tabela 34 – Calibração da temperatura interna do modelo .....                                                                                                                                                                | 176 |
| Tabela 35 – Temperatura interna dos modelos de salas expostas (exposta_NS e exposta_LO), com sombreamento em uma fachada (sombr_O e sombr_N) e com sombreamento em todas as fachadas (sombr_total_NS e sombr_total_LO) ..... | 179 |

## LISTA DE EQUAÇÕES

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Equação 1</b> - Fator de Luz Diurna.....                                                              | 22 |
| <b>Equação 2</b> - Luminância.....                                                                       | 22 |
| <b>Equação 3</b> - Iluminância no ponto “i” considerado.....                                             | 22 |
| <b>Equação 4</b> – Temperatura Neutra de conforto.....                                                   | 47 |
| <b>Equação 5</b> - Variação relativa das médias horárias de temperatura ao sol e à sombra....            | 78 |
| <b>Equação 6</b> - Variação relativa das médias horárias de umidade relativa ao sol e à sombra.....      | 78 |
| <b>Equação 7</b> – Pressão de saturação.....                                                             | 78 |
| <b>Equação 8</b> – Umidade relativa.....                                                                 | 78 |
| <b>Equação 9</b> – Umidade absoluta.....                                                                 | 78 |
| <b>Equação 10</b> – Variação relativa das médias horárias de temperatura de globo ao sol e à sombra..... | 80 |
| <b>Equação 11</b> – Transmitância da luz.....                                                            | 81 |
| <b>Equação 12</b> – Taxa de infiltração.....                                                             | 84 |

**LISTA DE SÍMBOLOS**

|                |                                 |
|----------------|---------------------------------|
| T              | Temperatura                     |
| °C             | Graus Celsius                   |
| K              | Kelvin                          |
| U              | Umidade relativa                |
| L              | Luminância (lumens)             |
| E              | Iluminância (lux)               |
| e              | Espessura                       |
| h              | Hora                            |
| m <sup>2</sup> | Metro quadrado                  |
| m <sup>3</sup> | Metro cúbico                    |
| v              | Velocidade do ar em m/s         |
| W              | Watt                            |
| m/s            | Metros por segundo              |
| km             | quilômetros                     |
| c              | Calor específico, em Wh/kg°C    |
| $\lambda$      | Condutividade térmica, em W/m°C |
| d              | Densidade, em Kg/m <sup>3</sup> |
| $\tau$         | Transmitância (%)               |
| IAF            | Índice de Área Foliar           |
| FLN            | Fator de Luz Diurna, em %       |
| VR             | Variação relativa, em %         |
| Sala sl        | Sala sem sombreamento arbóreo   |
| Sala sb        | Sala com sombreamento arbóreo   |

## RESUMO

DURANTE, L. C. **Sombreamento arbóreo e desempenho termoenergético de edificações**. Cuiabá, 2011. 262p. Tese (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O sombreamento arbóreo apresenta-se como uma importante estratégia de melhoria do desempenho termoenergético de edificações, em locais de clima quente, como o da cidade de Cuiabá/MT. A avaliação dos efeitos do sombreamento arbóreo no desempenho termoenergético de salas de aula foi o objetivo desta pesquisa, cuja amostra compôs-se de três escolas, de idênticos partidos arquitetônicos, implantadas em distintas orientações solares e sítios urbanos. Nelas, selecionaram-se duas salas, sendo uma totalmente exposta à radiação solar e, outra, com sombreamento arbóreo, ambas avaliadas por meio de medições e simulações computacionais, utilizando o software EnergyPlus. Mediu-se as variáveis de temperatura e umidade do ar, temperatura de globo e iluminância no interior das salas, a céu aberto e sob as copas das unidades arbóreas de sombreamento, sendo nestas últimas, também medido o Índice de Área Foliar, que permitiu avaliar a atenuação da radiação solar das espécies. A simulação computacional consistiu de calibração do modelo e avaliação da demanda energética para fins de condicionamento térmico de salas de aula implantadas com maior dimensão nas direções norte-sul e leste-oeste. Nestas duas implantações, estudaram-se modelos sem sombreamento, com sombreamento de uma das fachadas e com sombreamento de todas as fachadas, que resultaram em diferentes temperatura interna, condições de conforto térmico e temperatura superficial dos fechamentos verticais. Constatou-se que ocorreram melhorias das condições térmicas internas das salas com sombreamento arbóreo, que diminuiu em até 2°C a temperatura interna dos ambientes. Os resultados evidenciaram a contribuição do sombreamento arbóreo como mitigador do microclima externo, demonstrando a importância da arborização no desempenho termoenergético dos ambientes, em cidades de clima quente.

Palavras-chave: ambiente escolar, EnergyPlus, atenuação da radiação solar.

## ABSTRACT

DURANTE, L. C. **Shade trees and thermoenergetic performance of buildings.** Cuiabá, 2011. 262p. Thesis (Doctorate in Environmental Physic) – Institute of Phisyc, Federal University of Mato Grosso.

The buildings thermoenergetic performances have a relevant role in the paradigm of sustainable development. The aim of this study was to evaluate the effects of trees shades in thermoenergetic performances of public school's classrooms, in Cuiabá city. The sample was composed of three schools, with the same architectural designs, was implanted in different orientations to the sun and located in different urban sites. In each school, was selected two classrooms, one being fully exposed to solar radiation and other shaded by trees. The methodology consisted by measurements of air temperature, air humidity, globe temperature and illuminance indoor. Outdoor, these measurements were under open sky and under the canopy of trees, in which it was measured also the Leaf Area Index, which allowed to evaluate the attenuation of solar radiation by tree shading units. It was possible demonstrated the importance of shade trees in the mitigation of the external microclimate and in the performance of thermoenergetic environments in warm weather cities. It was found also that there were improvements to the thermal conditions inside the rooms protected by shade trees and natural light losses. These results permitted to quantify the impact of shade tree and equating to an acceptable performance thermoenergetic, using computer simulations of buildings.

Key-words: school environmental, EnergyPlus, solar radiation atenuation.

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. PROBLEMÁTICA**

Nos países desenvolvidos, nos quais a educação consolidou-se como meio para a ascensão econômica, a educação é tratada multidisciplinarmente como um processo resultante das interações sócio-físicas-psíquicas-culturais dos atores envolvidos no processo educacional.

Nesse sentido, os edifícios escolares são projetados para atender às demandas específicas dos projetos pedagógicos, comprometidos com a formação de valores dos cidadãos. Há preocupação com a sustentabilidade na concepção e uso dos espaços escolares e os sistemas implantados são operacionalizados incorporando seus conceitos no contexto educacional, destacando a importância e a pertinência da adoção dos mesmos na sociedade em questão. Esses sistemas referem-se ao aproveitamento da luz natural, ao uso racional dos sistemas de refrigeração e aquecimento, gestão da reciclagem de resíduos, aproveitamento de águas pluviais, reaproveitamento de águas servidas, utilização de energia solar e geração autônoma de eletricidade, dentre outros.

Construções como estas, comumente denominadas de sustentáveis, verdes ou ecológicas, geralmente demandam maior investimento inicial, com representativa economia ao longo de seu uso e operação. Em se tratando do Brasil, esse custo inicial é ainda maior, pela incipiência da disponibilidade de tecnologia nacional e de cultura dos profissionais da construção civil para desenvolvimento e avaliação de projetos, bem como execução de obras desse caráter. Pensar o desenvolvimento sustentável no âmbito das edificações escolares no Brasil é um desafio ainda maior, somando-se às dificuldades anteriormente citadas, a escassez de recursos destinados ao setor.

O Plano Nacional de Educação 2010-2011 prevê parâmetros mínimos de infraestrutura para o ambiente físico escolar, que devem abordar a adequação de

espaço, iluminação, ventilação e insolação dos prédios escolares de acordo às especificidades regionais.

Distante da realidade estabelecida nos papéis e planos de governo está a maioria das edificações de escolas estaduais de Mato Grosso, em muitas das quais se percebe que, no projeto, não foram considerados fatores como as propriedades térmicas dos componentes da edificação, o clima local, a orientação de implantação da edificação, dentre outros, resultando em um inadequado desempenho térmico das mesmas.

Esse problema das condições térmicas ambientais das salas de aula em Cuiabá, decorrente do rigor climático que se apresenta, com altas temperaturas durante o ano todo, é, nos dias atuais, ampliado, haja vista o intenso processo de urbanização ocorrido e acelerada mudança no meio ambiente urbano em função das alterações nas coberturas das superfícies do solo, com substituição das áreas de vegetação nativa pelas áreas construídas e pavimentadas.

Essas transformações do solo são responsáveis por profundas mudanças no balanço de energia, causando, dentre outras consequências, alterações na dinâmica dos ventos, aumento da temperatura na cidade e o surgimento do fenômeno de ilha de calor urbana, definido como o acréscimo da temperatura do ar de regiões urbanizadas em relação às regiões rurais do entorno, em virtude da modificação e substituição de áreas de cobertura vegetal pela ocupação urbana e o excessivo adensamento.

Neste contexto, essas condições ambientais comprometem o processo de ensino-aprendizagem pela caracterização de ambientes desconfortáveis e até mesmo insalubres, que refletem no comportamento dos alunos e educadores, pela sensação de desconforto ambiental proporcionada pelo ambiente da sala de aula.

Para mudar o panorama acima descrito, a meta do governo estadual no quadriênio 2010-2014 é instalar equipamentos de condicionamento térmico artificial em todas as escolas da rede estadual, sendo que a instalação já se encontra efetivada em mil salas de aula. Embora estas muitas já tenham sido contempladas, revela-se a ausência de infraestrutura nas instalações elétricas atuais das escolas, cuja rede elétrica não suporta a capacidade instalada desses equipamentos e a insuficiência no

dimensionamento dos mesmos, tendo sido constatada a operação de salas com o condicionador de ar e ventiladores ligados e com portas e janelas abertas, tamanho o subdimensionamento do sistema.

Na meta acima descrita, desconsideram-se as questões de sustentabilidade, consumo de energia e as interfaces entre a concepção arquitetônica e o clima local. Surge, então, a problemática que serve de inspiração a este estudo, que enfoca, com olhar pragmático e técnico, a discussão da adoção de uma estratégia passiva – o sombreamento arbóreo - avaliada como uma das possibilidades alternativas para melhoria do desempenho térmico das salas de aula, imbuída de atendimento aos princípios da sustentabilidade na escala das edificações e urbana.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

Não obstante o processo de urbanização sabe-se que, mesmo em sítios urbanos densamente construídos, é possível, por meio de recursos adequados, a criação de microclimas específicos, com condições mais amenas que o entorno, o que é denominado de efeito oásis. Essas condições podem ser intencionalmente projetadas, utilizando-se de áreas verdes, água e elementos de barreira ou captação do vento e sol, na escala urbana e do edifício, de forma a refletir em desempenho térmico mais satisfatório das edificações.

Nesta ótica, para o clima da cidade de Cuiabá, tem-se a recomendação do sombreamento das aberturas como principal estratégia bioclimática passiva. Em sendo corretamente aplicada, pode garantir 31% das horas de conforto anuais no interior das construções naturalmente condicionadas (LIGGETT e MILNE, 2010). Ao se utilizar de sombreamento por vegetação, as contribuições estendem-se às estratégias de resfriamento evaporativo e umidificação, ampliando seus benefícios para o microclima do entorno, proporcionando ambientes externos mais atrativos e adequados ao uso.

Assim sendo, esta pesquisa tem por objetivo geral avaliar os efeitos do sombreamento arbóreo no desempenho termoenergético de edificações escolares na cidade de Cuiabá/MT. Como objetivos específicos apresentam-se relacionar o

sombreamento arbóreo e as condições termo-higrométricas dos pátios escolares (a), avaliar os efeitos de diferentes densidades arbóreas no ambiente termo-lumínico das salas (b), comparar resultados medidos e simulados com o EnergyPlus (c) e investigar o impacto da estratégia passiva de sombreamento arbóreo no desempenho termoenergético de diferentes orientações de fachadas de salas de aula (d).

A característica relevante desta pesquisa é a investigação da influência do sombreamento e, especificamente, do sombreamento arbóreo, no microclima e no desempenho termoenergético de edificações escolares – salas de aula. Parte-se das necessidades de avaliação quantitativa dos parâmetros externos e internos aos edifícios e da análise de desempenho das edificações mediante distintas condições de sombreamento arbóreo proporcionado nas salas estudadas.

Esta pesquisa pretende fornecer informações para a otimização de projetos para edifícios escolares do ponto de vista das possibilidades de avaliação de desempenho termoenergético das soluções arquitetônicas propostas. A metodologia também pode ser aplicada a outros setores, podendo ser generalizada e adaptada em trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Na primeira parte desta revisão bibliográfica, aborda-se o estado da arte relativo à questão do desempenho termoenergético de edificações e suas interfaces com o uso da vegetação para redução do consumo de energia e condições ambientais internas. Optou-se por uma descrição detalhada dos estudos como forma de compilação dos mesmos e favorecimento de consultas posteriores.

Na segunda parte, caracteriza-se o clima do local de estudo – Cuiabá/MT-, para, em seguida, discutir as diferenças entre este e o arquivo de simulação utilizado pelo software de avaliação de desempenho de edifícios EnergyPlus, ferramenta desta pesquisa.

Encerra-se com o diagnóstico climático, que permite o estabelecimento de relações entre o clima de Cuiabá e as condições de conforto térmico por ele proporcionadas, conforme os diferentes modelos de conforto estabelecidos pelos métodos normativos.

### **2.1. CLIMA E VEGETAÇÃO – INTERFACES COM DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**

Estudos de Climatologia, segundo Bogo et al. (1994) podem abordar parâmetros de larga escala e em grandes extensões espaço-temporais, tais como latitude, relevo, correntes marítimas e circulação geral dos ventos; parâmetros de média escala, como temperatura, umidade, radiação solar, precipitação, direção e velocidade de ventos em áreas menores, como exemplos, cidades ou porções urbanas e rurais, ou ainda, estudar a variação de parâmetros meteorológicos em recortes espaciais menores com especificidades que lhes conferem a escala de microclima, na qual se insere a abordagem deste trabalho.

No ambiente construído das cidades, ocorrem interações complexas entre o microclima do local, os edifícios que ocupam áreas anteriormente vegetadas, a vegetação remanescente desta ocupação e a projetada para atender aspectos de conforto visual ou ambiental das pessoas que, por sua vez, habitam os edifícios e a cidade.

A cidade e os edifícios tiveram historicamente muitos modelos que se construíram através dos tempos, acompanhando as mudanças culturais das sociedades. Atualmente, há uma tendência mundial estabelecida de cosmopolitaneidade dos cidadãos e da universalização da arquitetura dos edifícios, na qual nenhuma das duas estabelece vínculos com o lugar. Os edifícios são construídos em uma linguagem arquitetônica mundial, que torna seus usos totalmente dependentes dos sistemas de condicionamento térmico e de iluminação, geralmente oriundos de tecnologias ativas, e a população dos aglomerados urbanos tem se padronizado cada vez mais em termos de comportamento, mostrando-se culturalmente indistinta quanto às suas necessidades. As demandas energéticas dos edifícios frente ao clima em que estão inseridos são cobertas pelos estudos de Avaliação de Desempenho (ABNT, 2008) e as demandas de conforto ambiental, pela Arquitetura Bioclimática (GOULART et al. 1998 e OLGYAY, 1963).

Os edifícios afetam o clima do local em que são construídos, pois alteram o balanço de energia em decorrência da substituição de materiais naturais pelos artificiais, inclusão de sombreamento, mudança no comportamento da radiação refletida no entorno e pela produção de demanda extra de energia para sua ocupação, dentre outros. A problemática do impacto do ambiente construído no meio ambiente urbano torna-se maior tanto maior as cidades e as conturbações, cujo escopo é contemplado nos estudos de Climatologia Urbana.

A vegetação compartilha o espaço urbano com as pessoas e os edifícios e se apresenta como um elemento mitigador do ponto de vista energético, pois seus benefícios se estendem a qualquer tipo de clima e edifício, desde que adequadamente posicionada e especificada, e propicia benefícios à qualidade de vida de qualquer população. Essa abordagem é contemplada nos estudos de Bioclimatologia, definida como a climatologia quando aplicada às relações entre os seres vivos (BOGO et al.

1994) e, mais especificamente, na abordagem deste trabalho, aplicada às edificações, que apresenta os desafios de trabalhar com a simultaneidade dos fatores climáticos e energético-ambientais ao nível da própria edificação, seu entorno imediato e o meio urbano em que a mesma se insere.

Olgyay (1963) afirma que a vegetação propicia resfriamento passivo em uma edificação por dois meios: pelo sombreamento lançado pela vegetação que reduz a conversão da energia radiante em calor sensível, consequentemente reduzindo as temperaturas de superfície dos objetos sombreados; pela evapotranspiração na superfície da folha, resfriando a folha e o ar adjacente devido à troca de calor latente.

Basicamente, os efeitos da vegetação no ambiente construído decorrem da interceptação da radiação solar direta e da luz (sombreamento), da evapotranspiração e da fotossíntese.

A evapotranspiração é definida como o efeito conjugado da evaporação da água do solo e da transpiração das folhas das plantas na presença de radiação solar (OMETO, 1981). O efeito de resfriamento se dá quando a água na superfície da folha, ao passar do estado líquido para o gasoso, carrega consigo, para a atmosfera, energia intrínseca necessária à evaporação, a qual é subtraída do ar que circunda a folha. Em climas quentes e secos, o efeito oásis proporcionado pela evapotranspiração pode diminuir as temperaturas de 2 a 5°C em relação ao entorno (TAHA, 1997).

De acordo com Rivero (1986), a absorção da radiação solar incidente nas folhas é alta, em torno de 90% das lumínicas e 60% das infravermelhas, utilizando as primeiras para suas funções vitais. Pequena quantidade de radiação é transmitida por transparência através da folha e o restante, entre 15% e 30%, é refletido. Da energia absorvida, uma parte se transforma em energia química potencial por fotossíntese e outra em calor latente, ao evaporar-se a água eliminada pela folha por transpiração. Dessa forma, a temperatura superficial da folha não é elevada, apesar da quantidade de energia absorvida manter-se sempre abaixo da temperatura dos corpos inertes próximos. Pode-se observar que os elementos vegetais apresentam melhor desempenho térmico em relação aos materiais inertes.

Segundo AFUBRA (2000), a temperatura mais amena nas áreas arborizadas pode ser explicada pelos seguintes fatores: a massa vegetada intercepta a radiação que entra na copa e a radiação que sai do solo, tendo um efeito marcante na temperatura; as folhas verdes não aquecem tanto quanto o solo e trocam calor com o ar que está à sua volta na transpiração. Por consequência, durante os períodos de radiação líquida positiva, a temperatura próxima ao solo da área vegetada é reduzida. À noite o ar junto ao solo é mais quente que acima das copas das árvores, onde a radiação líquida negativa é maior.

O comportamento da umidade relativa do ar apresenta estreita correlação com a temperatura. Ao aumento da temperatura da água está associado o aumento da energia vibracional das suas moléculas e, conseqüentemente, o aumento da taxa de escape das moléculas da fase líquida para a fase vapor. Portanto, menores temperaturas estarão sempre associadas à maiores umidades relativas. Assim sendo, a umidade relativa próxima ao solo da superfície vegetada é maior que aquela acima do dossel, devido à diferença de temperatura e, também, porque a pressão do vapor d'água nas copas é suavemente mais elevada, devido à evapotranspiração.

Segundo este mesmo autor, na fotossíntese, a planta absorve parte da radiação solar nela incidente, porção esta chamada de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), na faixa de 400 a 700nm. Nas partes verdes da planta processa-se a síntese de açúcares (glicose), hidratos de carbono (amido) e outras substâncias a partir de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), proveniente do ar atmosférico e que penetra na planta através dos estômatos, e do H<sub>2</sub>O (água), que vem das raízes. Como saída do processo tem-se oxigênio para a atmosfera, dióxido de carbono da respiração e água, proveniente da transpiração.

A transpiração relaciona-se com a circulação da água na planta. Captada pelos capilares das raízes, que originam uma diferença de potencial osmótico, “empurra” a água para as folhas, que evapora através dos estômatos nelas abertos, dispersando vapor de água na atmosfera. Quando não chega suficiente água às folhas, estas murcham (diminui a pressão interna da água), por conta da perda da turgescência das células vegetais, e os estômatos se fecham total ou parcialmente. Este é um mecanismo de autodefesa das plantas (AFUBRA, 2000).

Durante a noite, os estômatos se fecham e a folha não transpira. Entretanto, as raízes seguem criando a pressão que “empurra” a água para cima e um pouco de água sai pelas folhas para aliviar o excesso de pressão. Se a atmosfera está úmida, se observam umas gotas nas bordas das folhas – a isto se denomina “gutação”, processo que tem uma importância secundária (OMETO, 1981).

Cada espécie realiza esses processos em intensidades diferentes, que dependem de suas características. No meio urbano, onde muitas espécies são exóticas, a adequação tem papel importante no crescimento e desenvolvimento da vegetação e, portanto, na eficiência dos processos vegetais. A intensidade da resposta da planta ao meio é medida por meio de um índice denominado índice de área foliar (IAF), que expressa a relação entre a superfície foliar e a superfície de projeção da copa no solo ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ ).

O IAF se relaciona com a quantidade de luz interceptada pela copa (CHARLES EDWARDS e THORNLEY, 1972) e influencia no fluxo de calor no solo e nas temperaturas superficiais das áreas sombreadas. Copas densas possuem IAF alto e menor fluxo de calor no solo, bem como o inverso (YANG et al., 1999). O IAF varia com o desenvolvimento da cultura, variando ao longo do ciclo edafoclimático e, na maioria das vezes, de acordo com o modelo sigmoidal (REICHARDT e TIMM, 2004). O IAF é definido como sendo a razão da área total da superfície de um lado das folhas de uma copa pela área da projeção da copa no chão,  $\text{m}^2/\text{m}^2$ .

A densidade de área foliar (DAF) é definida como a superfície foliar por unidade de volume de copa ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ), em cada camada da copa. Baseando-se no princípio de densidade foliar uniforme, no qual qualquer que seja o ponto amostrado – ramo ou copa – a densidade foliar é constante, a área foliar total pode ser determinada pelo produto entre a densidade foliar e o volume da árvore (OMETO, 1981).

Pesquisas e estudos das interfaces entre vegetação, clima urbano e ambiente construído têm aplicabilidades diversas, para fins de planejamento urbano, diagnóstico de ilhas de calor, desempenho de materiais construtivos, de sistemas

alternativos de energia, de edificações e habitabilidade, paisagismo, educação ambiental e saúde das populações, dentre outros.

Koenigsberger (1974) cita que a vegetação, em condições tropicais, melhora o microclima, propiciando abrigo da radiação solar e dos ventos, diminuindo a temperatura do ar e incrementando a umidade. Givoni (1992) afirma que, além de satisfazerem a necessidades humanas instintivas de proteção, as árvores contribuem para a melhoria do microclima imediato. Se forem densas, podem servir como barreira para o ruído, captar a poeira em suas folhas e filtrar o ar, proporcionar privacidade e controlar o iluminamento excessivo do sol. O maior benefício das árvores, porém, está no aspecto térmico. Nos climas frios, a vegetação perene reduz as perdas de calor das edificações e impedem o acúmulo de neve. Nos climas quentes, as superfícies vegetadas e as folhas das árvores absorvem a radiação solar, o sombreamento diminui as temperaturas superficiais e o processo de evapotranspiração diminui a temperatura do ar.

Segundo Akbari (2002), se a vegetação é bem disposta em torno da edificação, durante o verão, impede que a radiação solar direta a atinja e, com isso, ocorre redução da energia gasta para resfriamento. No inverno, o sombreamento excessivo pode potencializar a energia necessária para aquecimento, recomendando o uso de árvores decíduas para locais que precisem das estratégias de resfriamento e de aquecimento. O bloqueio da radiação difusa e refletida das superfícies do entorno alteram o balanço de energia da edificação, sendo que, durante o dia, os ganhos de calor são sempre reduzidos pelo sombreamento da vegetação.

Acerca da influência da vegetação e o conforto térmico ambiental urbano, Shasua-Bar e Hoffman (2000) estudaram os fatores determinantes do microclima em áreas verdes urbanas e as suas influências no entorno. Realizaram medições de temperatura e umidade do ar em onze áreas arborizadas de Tel-Aviv, em dias de verão e de calma, comparando-os relativamente a um ponto de coleta de referência próximo, sem vegetação, no qual ocorria ausência de sombreamento durante todo o dia. Com exceção de um dos locais, as espécies eram Ficus com 50 a 70 anos de idade. As áreas arborizadas tinham configurações geométricas diferentes, sendo monitorados vários pontos de sombreamento no interior das mesmas, distribuídos em

um eixo com início no ponto de referência e com final na área vegetada, totalizando 100 pontos e 714 dados para cada um deles, correspondentes aos horários de 6, 9, 15, 1 e 24h. O maior efeito de resfriamento ocorreu às 15h no ponto médio do eixo entre o limite não vegetado e o interior da área verde, no valor de 3K. A menor umidade ocorreu no ponto menos vegetado. Quanto aos efeitos de resfriamento da área verde no entorno, concluíram que são pequenos, não ultrapassando duas a quatro vezes a largura da área, o que significa que a 1 km da área verde, o resfriamento é 0,7K e a 0,5km, de 1,5K.

Jauregui (1990), ao estudar a área de influência de um grande parque, no México, encontrou área de influência no resfriamento igual a uma vez a largura do parque, com o que se conclui que é melhor distribuir as áreas verdes ao longo da malha urbana do que concentrá-las.

Oliveira e Costa (2006), em estudo da influência da vegetação no conforto térmico urbano, mostraram resultados em que a temperatura do ar nas áreas não arborizadas foi, na maior parte do período, maior que nas áreas arborizadas, enquanto que as umidades relativa e específica tiveram comportamento inverso. Observaram, também, que na área não arborizada a amplitude térmica apresentou maior valor que na área arborizada. Isto se deve ao fato de a área arborizada refletir mais radiação solar que a área não arborizada e usar uma parte da energia absorvida para os processos de evapotranspiração e fotossíntese.

Também acerca do conforto térmico urbano, Spangenberg et al. (2008) realizaram medições de temperatura, umidade, velocidade do vento e temperatura superficial em três tipos de locais: uma quadra aberta, um *canyon* urbano e na área verde do Parque da Luz, em São Paulo, no verão. Concluíram que a diminuição da temperatura no parque devida ao resfriamento da vegetação é, em média, 2 a 2,5°C se comparada à quadra aberta e ao *canyon*, e a umidade é cerca de 10% maior no parque, atribuindo esses efeitos ao sombreamento e à evapotranspiração. Simularam no ENVI-MET cenários sem árvores, árvores com copas densas (IAF=5) e ralas (IAF=1). As temperaturas ambiente e superficial apresentaram-se 0,5 e 5° menores no cenário com copas ralas que no cenário sem árvores, respectivamente. No cenário com copas densas, as temperaturas ambiente e superficial apresentaram-se 1,1 e 12°

menores que no cenário sem árvores, respectivamente. A temperatura média radiante foi o parâmetro mais afetado pelo sombreamento das árvores, com redução de 11°C da copa rala e de 24°C da copa densa para o cenário sem árvores, respectivamente. A variação do IAF causou impacto insignificante na umidade e na velocidade do vento foi de 0,86; 0,80 e 0,47m/s nos cenários sem árvores, com árvores ralas e densas, respectivamente. Além do IAF, apontam densidade de área foliar (DAF) como parâmetro importante de influência da vegetação no microclima. Para climas quentes e úmidos recomendam IAF e DAF altos.

Abreu e Labaki (2010) compararam o conforto térmico proporcionado por indivíduos arbóreos isolados em seu raio de influência. Os resultados apontaram o ipê-amarelo como a espécie que proporciona melhor sensação de conforto. As espécies perenes jambolão e mangueira apresentaram têm maior influência no entorno imediato no período de verão que de inverno e justifica esse comportamento pela característica termorreguladora da árvore, que mantém a temperatura e umidade relativa do ar ao seu redor em uma faixa ideal para seu sustento.

Dacanal et al. (2010) compararam as variáveis climáticas dos fragmentos florestais urbanos e de uma estação meteorológica identificando temperatura do ar mais baixa nos bosques. Verificaram que a umidade absoluta do ar é mais baixa nos bosques, embora a umidade relativa encontrada tenha sido mais elevada. A velocidade do ar é mais baixa e a radiação solar é atenuada, configurando microclimas mais estáveis ao longo do dia que contribuem para o conforto térmico.

Laverne e Lewis (1996) realizaram um estudo sobre os efeitos da vegetação no consumo de energia em 101 residências de Ann Arbor, Michigan (USA), aplicando questionário aos moradores acerca da infraestrutura das residências e dos costumes dos usuários das mesmas. Quantificaram, para cada uma das fachadas das residências, a altura solar (de 0 a 45°), a posição relativa das árvores em relação à fachada (de -45° a +45° do eixo), a altura da árvore (por meio de clinômetro) e o tamanho da copa, áreas de fechamentos opacos e envidraçados de cada fachada, área das residências e a cor das telhas. Por meio de cartas solares, determinaram a máscara de sombra para um dia verão e inverno e o sombreamento das fachadas. Por meio de fotografias aéreas de raio de 200 pés, com centro na testada de cada

edificação, foi determinado o percentual de obstrução (árvore ou edificação vizinha) em cada fachada da unidade residencial. As mesmas fotografias foram utilizadas para estimar os obstáculos aos ventos nas octantes (N, S, E, O, NE, SE, NO, SO). As variáveis relativas à edificação e às árvores foram analisadas em função da densidade da vegetação dividindo-se a área total pesquisada em baixa, média e alta, correspondentes a 66%, 45% e 15% de densidade de área verde (LAVERNE e LEWIS, 1996).

Segundo os mesmos autores, os resultados indicaram que existiam diferenças entre médias, altas e baixas densidades de vegetação para os parâmetros idade do edifício, sistema de aquecimento e área das residências. Isto porque, nas áreas de alta densidade de vegetação, as árvores eram maduras e as casas construídas nas décadas de 1960 e 1970. Na área de média densidade, muitas das árvores estavam próximas da maturidade, provendo as casas de sombra significativa e, na área de baixa densidade, as casas foram construídas depois de 1981 e as árvores eram imaturas, proporcionando pouca sombra e obstrução aos ventos.

Ficou evidente que a densidade de área verde reduz o consumo de energia para resfriamento e para aquecimento. Baixas densidades levaram a maior economia, provavelmente relacionada ao fato de proporcionarem maior ganho de calor solar ou por serem construções mais recentes, possuírem características de isolamento térmico melhor e sistemas de aquecimentos mais eficientes.

Acerca do efeito das plantas nos edifícios, Hoyano (1999) apresenta os benefícios do uso do telhado verde, que pode diminuir em até 1,5°C a temperatura do entorno imediato, além de diminuir as temperaturas superficiais e aumentar a umidade relativa do ar. A temperatura superficial da laje exposta chegou a 40,4°C enquanto a do solo vegetado não passou de 38,2°C. Afirma que o teto verde é uma alternativa para amenizar o efeito da ilha de calor urbana.

No mesmo contexto, Gupta et al. (2011), inseridos no conceito de Building Integrated Vegetation Systems (BIV), que consiste de tetos verdes e paredes verdes como medidas de conservação de energia passiva, realizaram simulação de cenários com o software Energy Plus, a partir da cobertura de um pavimento de 30x30x3,70m não vegetado, denominado de cenário base. A vegetação foi modelada como esparsa

(IAF=0,002) e densa (IAF=5), sobre substrato de espessura constante de 150 mm. Obtiveram resultados de variação diária de temperatura no interior do pavimento com cobertura não vegetada, para um dia típico de verão, de 28°C (8h) até 38°C (18h30min), e o cenário do teto verde denso resultou em redução média da temperatura interna em 8°C, sem diferenças entre os cenários para variação de IAF. Na simulação de inverno, a temperatura interna do ar para IAF esparso era de 4,7°C, para IAF denso era de 5,6°C e para o caso base era de -0,4°C. A redução no consumo de energia anual para resfriamento foi de 7% e de aquecimento e de 16% do IAF denso em relação ao caso base e de 3,2 e 13,5 do IAF esparso para o caso base (GUPTA et al., 2011).

O estudo acima citado variou o substrato para espessuras de 60 e 450 mm para alterar a condutividade térmica do teto verde. O substrato de 450 mm reduziu a temperatura interna do ar no verão de 11,6°C e a incrementou de 7,4°C, no inverno, em relação ao caso base. A maior economia de energia no inverno foi de substrato de 450 mm para ambos os IAF, denso e esparso, de 19,5% e 21,5%, concluindo que o substrato é um parâmetro mais importante que o IAF no desempenho térmico de inverno. Já no verão, um substrato de 50 mm e IAF denso proporciona o mesmo consumo de energia que um substrato de 50 mm e IAF esparso, mostrando que o IAF é importante também para o desempenho de verão.

O estudo de Gupta et al. (2011) também buscou a solução ótima para o caso de uma única fachada verde e de todas as quatro. As paredes verdes foram executadas com substrato de 90 mm e IAF=5 e cobertura e janelas fortemente isoladas. Aplicada a vegetação em todas as fachadas, a economia de energia foi de 3,35%, mas, em uma fachada por vez, não houve economia de energia para resfriamento, o que parece ser contraditório com os resultados obtidos até então. O autor justifica dizendo que o edifício ficou totalmente hermético e sem ventilação, o que dificulta as trocas de ar e a dissipação do calor para o exterior no verão.

Yoshimi e Altan (2011) estudaram o efeito de paredes vegetadas na temperatura interna de uma residência em Tókyo, utilizando o software Ecotect, validando os dados por meio de medidas de campo. Simularam paredes pesadas e leves, com vegetação em todas as paredes e em cada uma delas, isoladamente. Os

resultados mostraram que a cobertura vegetal ajuda a estabilizar a temperatura no interior do ambiente pela redução dos ganhos de calor solar durante o dia e da perda de calor por condução, no período noturno. O caso das quatro paredes vegetadas e de inércia pesada foi o que resultou em maior economia, seguido pelo caso de parede sul vegetada (Tabela 1).

**Tabela 1** - Energia gasta para aquecimento, resfriamento e economia de energia nos modelos simulados de paredes com inércia leve e pesada

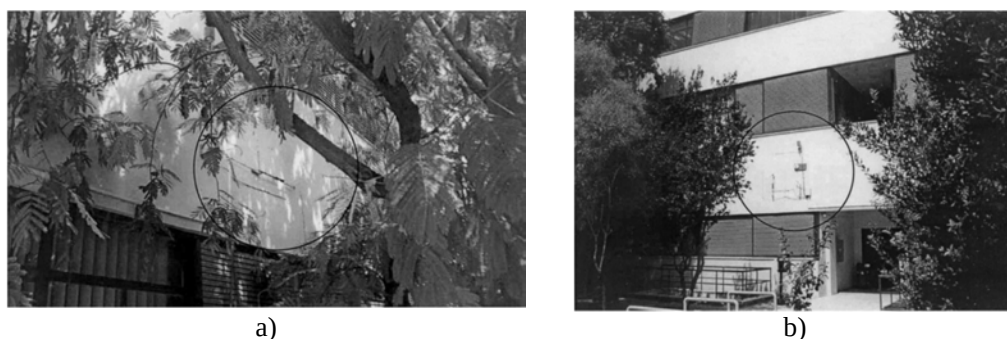
|                     | Consumo anual de energia<br>Modelo de inércia leve |                 |                        | Consumo anual de energia<br>Modelo de inércia pesada |                |                        |
|---------------------|----------------------------------------------------|-----------------|------------------------|------------------------------------------------------|----------------|------------------------|
|                     | Exposta                                            | SW<br>Vegetada  | Totalmente<br>Vegetada | Exposta                                              | SW<br>Vegetada | Totalmente<br>Vegetada |
| <b>Aquecimento</b>  | 3346                                               | 2466            | 1946                   | 1746                                                 | 1519           | 1353                   |
| <b>Resfriamento</b> | 499                                                | 383             | 350                    | 227                                                  | 202            | 184                    |
| <b>Total</b>        | 3865                                               | 2849            | 2296                   | 1973                                                 | 1721           | 1537                   |
| <b>Economia</b>     |                                                    | 1016<br>(26,3%) | 2296<br>(40,6%)        |                                                      | 252<br>(12,8%) | 436<br>(22,1%)         |

**Fonte:** Adaptado de Yoshimi e Altan (2011)

Papadakis et al. (2001) realizaram estudo experimental sobre a influência das árvores na transferência de calor de uma fachada orientada a sudoeste e na temperatura interna no ambiente de escritórios, em edifício do Campus da Universidade de Agricultura de Atenas. Instalaram os equipamentos nas áreas sombreadas e expostas da fachada (Figura 1) para monitoramento de radiação solar global na parede vertical (piranômetro), radiação líquida na parede vertical (net radiômetro), velocidade do vento (anemômetro), fluxo de calor pela parede (fluxímetro) e temperatura superficial (sensores superficiais de cobre-constantan), por um período de quatro dias.

As copas das unidades arbóreas bloqueiam a radiação direta pela maior parte do tempo e na área sombreada da fachada só foi registrada radiação difusa. Alguns picos que ocorreram foram causados por “janelas”, pequenas áreas onde as folhas não conseguem interceptar a radiação direta, que foi registrada pelo piranômetro e net radiômetro. As áreas expostas registram  $600 \text{ W/m}^2$  e as sombreadas  $100 \text{ W/m}^2$ . Os valores só ultrapassaram  $100 \text{ W/m}^2$  na parede sombreada,

próximo ao meio-dia, quando a altura solar era próxima de  $90^\circ$  e a sombra das árvores não era projetada na parede, registrando  $180 \text{ W/m}^2$ . Já para a energia absorvida pela parede, foi sempre maior na área exposta que na sombreada. Durante a noite, a radiação absorvida na área sombreada é maior que na área exposta, justificado pelo fato de que as árvores atuam como barreiras e bloqueiam a radiação térmica emitida pelas superfícies das paredes.



**Figura 1** – Instrumentação na área sombreada e exposta da fachada sudoeste

**Fonte:** Papadakis et al. (2001)

Durante o dia, a temperatura do ar na área sombreada era sempre menor que na área exposta e maior que a temperatura superficial das paredes. Em condições normais de temperatura do ar e calmaria de vento, as folhas mantêm a sua própria temperatura menor que a do ar que envolve através da transpiração, na qual libera água para o meio, em abundância. A umidade do ar na área sombreada manteve-se sempre acima da área exposta, confirmando a explicação acima. Então, no ar entre as árvores e a parede, ocorrem perdas de calor por convecção (do ar para a parede e do ar para as folhas).

Como a árvore bloqueia o movimento do ar, a velocidade do ar e a taxa de resfriamento são menores na área sombreada que na exposta, o que explica o fato de que as temperaturas superficiais das paredes sombreada e exposta (com taxa de resfriamento maior) praticamente se igualem no período noturno. Ressalta-se que, à noite, a árvore inibe a troca de calor da parede com o ar (efeito de abrigo).

Quanto ao fluxo de calor pelas paredes, como a radiação solar incidente na parede exposta é maior que na sombreada, maior a energia absorvida e transferida

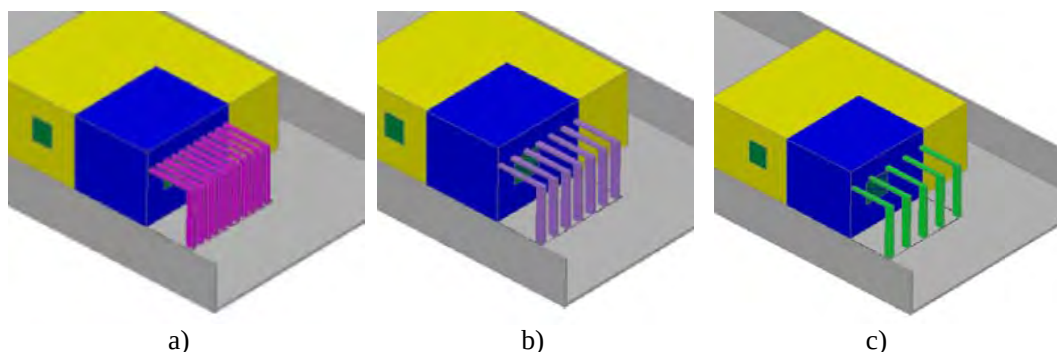


Weiler (2008) avaliou o desempenho térmico de habitações de interesse social (HIS) em Londrina, identificando parâmetros que consideram a influência do entorno: topografia, relevo, orientação geográfica e sombreamento arbóreo. Realizou medições e simulações no Energy Plus em períodos de verão e inverno e entrevistou os moradores a fim de conhecer suas preferências e expectativas em relação às condições de conforto de suas habitações. A avaliação foi feita por diversas normas, analisando qual metodologia apresenta os parâmetros que refletem as condições encontradas nas medições *in loco*. Através das medições *in loco* concluiu, a princípio, que as unidades respondiam de forma distinta às variáveis de entorno que lhes foram determinadas. Entretanto, as avaliações pelos métodos prescritivos levaram ao mesmo resultado de desempenho para as quatro unidades, construídas com a mesma tipologia básica. Já os métodos de avaliação por desempenho, apontaram resultados diferentes para cada caso em estudo, os quais chegaram a ter suas temperaturas internas variando em até 3°C para o mesmo horário, comprovando que cada unidade habitacional tem uma resposta térmica diferente quando submetida a condições de entorno distintas.

Nas medições, verificou que as residências localizadas mais próximas de vales obtiveram situação térmica mais confortável, o que significa que a proximidade de áreas verdes e as características do relevo interferem na resposta térmica global que a edificação proporcionará aos seus moradores, alterando suas condições de conforto. Fachadas orientadas a oeste quando sombreadas resultaram em melhores condições térmicas internas que no caso de residências com as mesmas fachadas expostas, demonstrando a capacidade que elementos de proteção de fachadas têm na redução de ganhos de calor, otimizando o conforto térmico observado pelos seus moradores.

Piveta (2010) deu sequência aos estudos de Weiler (2008) realizando simulações de desempenho térmico e conforto para HIS com sombreamento arbóreo denso, médio e esparsa (*Schinus molle* – Aroeira Salsa, *Bauhinia variegata* – Pata de Vaca e *Muraya paniculata* – Falsa Murta, respectivamente), analisando, por meio de medições, a melhoria do microclima proporcionado pelas três espécies. Em geral, as temperaturas do ar no interior da edificação com sombreamento das espécies são menores que na situação sem este elemento. Concluiu-se, então, que o sombreamento

com vegetação pode trazer uma contribuição climática interessante para o interior de ambientes construídos. Como recurso para modelagem da árvore no Energy Plus, utilizou elementos de sombreamento de pergolados com espaçamentos variados conforme o IAF da espécie (Figura 3).



**Figura 3** – Modelagem do espaçamento entre as pérgolas representativas do sombreamento arbóreo no Energy Plus para a espécie de Índice de Área Foliar alto – Aroeira Salsa (a), médio – Pata de vaca (b) e baixo – Falsa Murta (c)

**Fonte:** Piveta (2010)

Grings (2003) comparou resultados de medições e simulações no Energy Plus, alternando modelos de céu isotrópico e anisotrópico, coeficiente de convecção simples e detalhado, tendo obtido a melhor concordância entre os dados para o modelo de céu anisotrópico e coeficiente de convecção detalhado, concluindo que o Energy Plus representa bem o comportamento térmico de uma edificação “termicamente pesada”, necessitando de pesquisa para demais tipos de edificações. Na comparação, a autora utiliza dados medidos em substituição aos dados do arquivo climático de simulação utilizado pelo EnergyPlus.

Sobre a análise da sensibilidade do EnergyPlus em relação à ventilação natural e mecânica, Batista et al. (2011) compararam a temperatura medida no centro de um ambiente com as simuladas pelos diversos algoritmos utilizados pelo software para cálculo da condução e convecção. As limitações do uso da simulação foram melhor esclarecidas quanto aos coeficientes de condução (o padrão ou default, chamado de CTF ou o CondFD) e convecção (o padrão ou default, chamado de TARP, ou as opções Simple Natural e Adaptive). Os menores desvios foram alcançados pela combinação do algoritmo de condução CTF com o de convecção

Simple (para as paredes) e Adaptive (para o teto e piso), ambientes concluindo pela validade da simulação computacional para diferentes situações de ventilação – natural ou mecânica., ressaltando que ainda não há possibilidade de incorporação da modelagem do coeficiente de convecção forçada, o que representa uma limitação da ferramenta de simulação.

Versage (2010) concluiu que para as frestas, as propriedades das aberturas quando fechadas afetam o desempenho térmico onde o clima torna indesejável a infiltração de ar quente. Porém quanto menor a diferença entre a temperatura máxima desejada e a temperatura externa, menor será a influência das frestas no desempenho térmico e de ventilação.

O desempenho térmico de coberturas em edificações do tipo galpões foi avaliado por Buttner (2008) para a cidade de Cuiabá. A autora realizou medições, comparou os resultados medidos com os simulados no Energy Plus e, posteriormente, realizou simulações de desempenho com diferentes tipos de telhas e duas estratégias passivas: resfriamento evaporativo e sombreamento da cobertura, estendendo até a avaliação do custo-benefício de cada um dos casos estudados. Dentre outros resultados, concluiu que o melhor desempenho se dá pelas telhas claras e com subcoberturas refletivas e quanto pior é o desempenho da telha, maior é a redução da carga térmica por uso de barreira radiante. Destacou que a melhoria proporcionada pelo emprego de sombreamento é mais relevante que a proporcionada pelo resfriamento evaporativo, evidenciando a importância desta estratégia para o clima local.

Acerca da simulação da iluminação natural, Ramos e Ghisi (2010) afirmam que para uma boa avaliação do desempenho termoenergético de edificações é necessário avaliar também o uso da iluminação natural uma vez que seu uso influencia na carga térmica da edificação. Compararam o fator de luz diurna (FLD) realizado por meio do programa de simulação EnergyPlus com o resultado de outros dois programas, Daysim/Radiance e TropLux, e comparou a iluminância horizontal externa calculada e a medida em Florianópolis entre 2003 e 2005. Verificaram que o programa EnergyPlus não apresenta resultados coerentes para o FLD e para a iluminância externa. A comparação entre o FLD calculado pelos três programas

mostra que o programa EnergyPlus não realiza de forma adequada o cálculo da reflexão interna. A comparação entre as iluminâncias horizontais externas calculadas e medidas pelo programa mostra um erro maior que 100% para a iluminância difusa.

As simulações foram realizadas para dois modelos diferentes, sendo estes uma sala quadrada, na proporção de 1:1 (5 m x 5 m x 3 m), e uma sala retangular profunda, com proporção de 1:2 (5 m x 10 m x 3 m). Esses modelos possuem percentual de janela na fachada (PJF) de 50%, com peitoril de 1,5 m e largura igual à da sala; a abertura é voltada para a fachada sul. Nas aberturas, considerou-se o uso de vidro claro de 3 mm, com transmissividade à luz visível igual a 0,88. Os modelos possuem paredes e teto brancos, com refletância igual a 0,85, e piso bege, com refletância igual a 0,60. Em todas as simulações, considerou-se a superfície de trabalho a 0,75 m do piso.

Os programas Daysim/Radiance e TropLux fornecem o FLD como resultado da simulação. Já para o programa EnergyPlus o FLD é calculado a partir dos dados de um dia de céu encoberto, a partir da Equação 1.

$$FLD = \frac{E_p}{E_{hext}} \cdot 100 [\%] \dots \dots \dots \text{Equação 1}$$

Onde:

FLD: fator de luz diurna (%);

$E_p$ : iluminância difusa no ponto de referência (lx);

$E_{hext}$ : iluminância difusa horizontal externa (lx).

A iluminância tem a origem de seu conceito na intensidade luminosa, definida como a intensidade da radiação visível medida em uma determinada direção, ou seja, o fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido em torno de uma dada direção, medido em candela (cd). Uma candela é a intensidade luminosa emitida por uma fonte, em uma dada direção, de luz monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz, e cuja intensidade de radiação em tal direção é de 1/683 Watts por esterradiano. Essa frequência é percebida como luz verde, para a qual o olho humano possui a melhor capacidade de absorção (VIANNA e GONÇALVES, 2001).

Assim, a iluminância é a densidade do fluxo luminoso recebido por uma superfície ( $\text{lm/m}^2 = \text{lux}$ ), didaticamente definida como “a luz que chega, não visível”. O fluxo luminoso ( $\Phi$ ) é a quantidade de luz visível que uma fonte de luz irradia em todas as direções, expresso em lumens (lm). Um lúmen é, então, o fluxo luminoso emitido por uma fonte puntiforme e invariável de uma candela, de mesmo valor em todas as direções, no interior de um ângulo sólido de um esterradiano. Já a luminância é a intensidade luminosa em dada direção e a área aparente da fonte nesta mesma direção ou “luz que sai, visível”, em  $\text{cd/m}^2$ . A iluminância e a luminância relacionam-se de acordo com a Equação 2 ou 3 (no caso de não se conhecer a iluminância).

$$L = \frac{I}{A \cdot \cos \alpha} \dots\dots\dots \text{Equação 2}$$

Onde:

L: luminância ( $\text{cd/m}^2$ );

I: intensidade luminosa (cd);

A: área projetada ( $\text{m}^2$ ).

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \dots\dots\dots \text{Equação 3}$$

Onde:

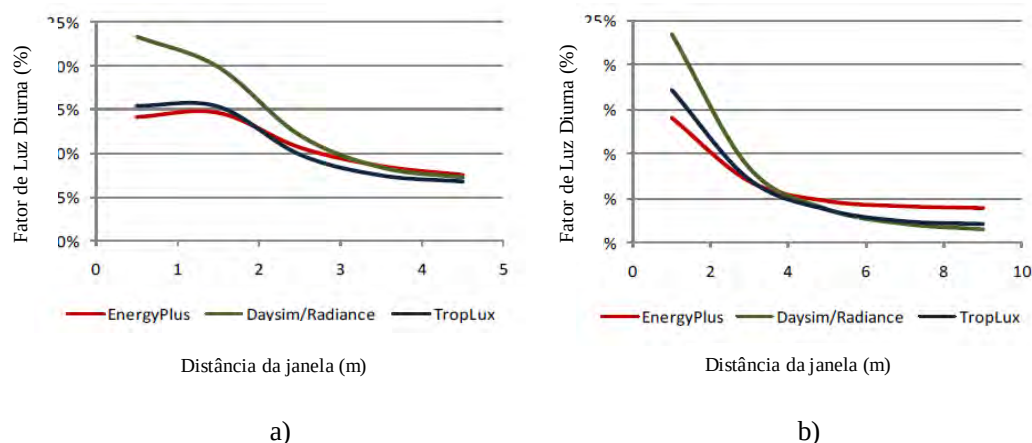
$\rho$  : coeficiente de reflexão da superfície;

E: iluminância dessa superfície (lux).

A Figura 4-a apresenta os resultados do FLD encontrados pelos três programas para o modelo de proporção 1:1, com PJF de 50%. Verificou-se comportamento semelhante entre o FLD dos diferentes programas. O programa Daysim/Radiance tem o FLD máximo próximo ao local de entrada da luz, enquanto que para os outros dois programas, o FLD máximo está a 1,5 m da abertura.

Na Figura 4-b, o modelo de proporção 1:2 ( $5\text{m} \times 10\text{m} \times 3\text{m}$ ), apresentou menores valores para o FLD que o modelo anterior. Para esse caso, o FLD resultante do programa EnergyPlus, após os 6 m, mantém-se praticamente constante, mostrando a baixa sensibilidade do programa para simular a iluminação em locais afastados do ponto de entrada da luz no ambiente. Através dessas imagens verificou-se, ainda,

que, enquanto próximo à abertura, o maior FLD é encontrado pelo Daysim/Radiance, e o menor, pelo EnergyPlus. Afastado dela, dá-se o contrário, com o maior FLD para o EnergyPlus, e o menor, para o Daysim/Radiance e o TropLux.



**Figura 4** – Variação do Fator de Luz Diurna (FLD) conforme a distância da janela para os modelos de salas com 5m de largura (a) e 10m de largura (b) simulados com o EnergyPlus, Daysim/Radiance e TropLux

**Fonte:** Ramos e Ghisi (2010)

Com o modelo com proporção de 1:2, verifica-se que, à medida que aumenta a importância da parcela refletida internamente, como no fundo da sala, onde existe menor incidência da luz direta, a diferença entre os resultados do programa EnergyPlus e dos outros dois programas aumenta, enquanto as diferenças entre o Daysim/Radiance e o TropLux diminuem. Uma possível causa para esse aumento na diferença está nos métodos utilizados para resolver a reflexão interna, uma vez que o primeiro programa utiliza o método do fluxo dividido e, o último, o método do raio traçado. Como no método do fluxo dividido a parcela refletida é dividida igualmente pelo espaço, alguns pontos acabam recebendo uma parcela maior do que a que realmente ocorre. O método do fluxo dividido se aplica melhor às salas com formas que se aproximam à cúbica.

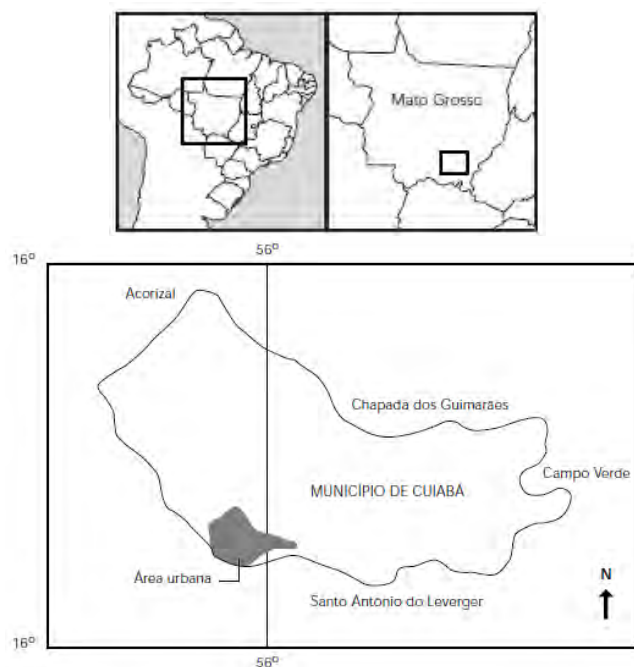
Para a avaliação da iluminância externa, as iluminâncias horizontais externas coletadas de 2003 a 2005 foram comparadas com as calculadas pelo programa EnergyPlus. Nas condições desta pesquisa, os valores calculados superestimaram as iluminâncias e, quanto mais claro o céu, melhor a correlação entre

as duas grandezas e menor o erro encontrado. Portanto, tanto para a iluminação difusa quanto para a iluminância direta, os maiores erros ocorreram para as condições de céu mais encoberto.

## 2.2. CLIMA NA REGIÃO DE ESTUDO

Estudos que pretendam analisar a concepção e o desempenho das edificações tendo o clima como condicionante devem se fundamentar em uma descrição detalhada e precisa do clima e da ocupação local. Para atender a este requisito, buscaram-se referências históricas de caracterização climática do estado de Mato Grosso e da cidade de Cuiabá.

O estado de Mato Grosso localiza-se a oeste da Região Centro-Oeste e ocupa uma área de 906.806km<sup>2</sup>. Tem como limites os estados do Amazonas e Pará, ao norte; Tocantins e Goiás, ao leste; Mato Grosso do Sul, ao sul, e Rondônia, a oeste. Também faz divisa a oeste com a Bolívia (MAITELLI, 1994). Sua capital é o município de Cuiabá, localizado no centro-sul do estado (Figura 5).



**Figura 5** – Localização geográfica do estado de Mato Grosso

**Fonte:** Adaptado de Maitelli (1994)

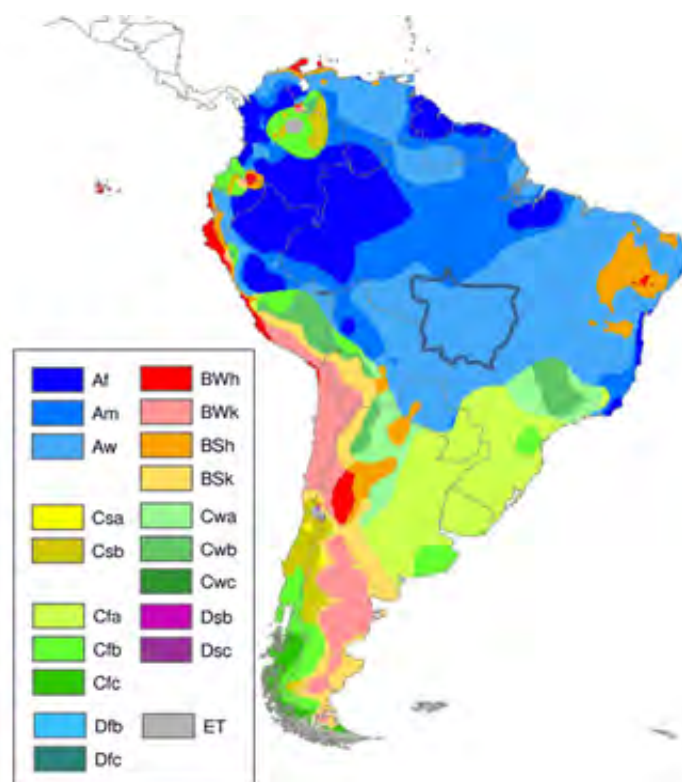
Moreno et al. (2005), considerando as chuvas, temperatura e vegetação regional, apresentam Mato Grosso com os seguintes tipos de clima: tropical chuvoso, tropical de savana e tropical de altitude, subdividido em quente úmido e subquente úmido, ambos com três meses secos, e subquente semiúmido, com quatro a cinco meses secos (Figura 6).



**Figura 6** – Classificação climática de Mato Grosso

**Fonte:** MORENO et al. (2005)

No mapa da atualização da classificação climática de Koppen elaborado por Peel et al. (2007), Mato Grosso tem cerca de 90% de seu território inserido no clima do tipo Aw (tropical com chuvas de verão) e cerca de 10%, no extremo norte, em clima do tipo Am (tropical com clima de monção com precipitação total anual média maior que 1500mm e precipitação do mês mais seco menor que 60mm) (Figura 7).



**Figura 7** – Classificação climática de Köppen-Geiger para a América do Sul

**Fonte:** Peel et al. (2007)

Cuiabá, juntamente com o município vizinho de Várzea Grande, constitui um aglomerado urbano de cerca de 900.000 habitantes (IBGE, 2010). A população total do município até 1960 mantinha-se em aproximadamente 50 mil habitantes; na década de 60, duplicou, chegando a mais de 100 mil habitantes em 1970, continuando a se incrementar com levas de migrantes durante as décadas de 70 e 80 (CUIABÁ, 2007).

A cidade é conhecida pelo seu rigor climático, cujas características de clima tropical são acentuadas por sua localização geográfica da cidade, situada numa área rebaixada situada entre o Planalto dos Guimarães e a província serrana, com altitudes variando entre 200m, no limite sul, e 450 m no alto vale dos rios Cuiabá e Manso, denominada Baixada Cuiabana (CUIABÁ, 2007). O comportamento dos ventos na cidade é influenciado pelo relevo que a circunda, caracterizando baixa ventilação

durante o ano todo. Nos seus terrenos, na direção sul, iniciam-se os primeiros declives do Pantanal Mato-grossense (Figura 8).



**Figura 8** - Corte esquemático do relevo mato-grossense e a localização da cidade de Cuiabá

**Fonte:** Moreno et al. (2005)

Também merecem destaque, a presença de áreas alagáveis, representadas por várzeas e embaciados, situadas principalmente na planície inundável do rio Cuiabá, e as áreas do seu dique marginal, entre a calha do rio e a planície de inundação (CASTRO JR., 1990 apud VASCONCELOS, 2009<sup>1</sup>).

Sua cobertura vegetal é constituída principalmente pela vegetação de cerrado e a mata ciliar aparece próxima aos córregos. Nas áreas periféricas da cidade domina a vegetação de cerrado, com árvores de 4 metros de altura, caule e ramos retorcidos e cerradão. A mata ciliar acompanha os corpos d'água e tem árvores com 10 metros de altura. A mata semi-decídua e a mata de encosta, com espécies arbóreas com estratos contínuos de 10 metros de altura, ocorrem mescladas aos demais tipos de vegetação e nas áreas de relevo mais acentuado. Assim, a vegetação nativa da região e espécies remanescentes do cerrado formam um verdadeiro cinturão verde em torno da área urbanizada de Cuiabá (GUARIM, 1990).

---

<sup>1</sup> CASTRO JR., P. R. **Carta Geotécnica de Cuiabá**. Cuiabá-MT: Universidade federal de Mato Grosso. Convênio: UFMT/Prefeitura Municipal de Cuiabá, 1990. Relatório Final: Versão preliminar apud VASCONCELOS, L. C. S. **Os efeitos da urbanização no microclima do Bairro Morada da Serra, Cuiabá – MT**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT.

A distribuição de chuvas é tipicamente de clima tropical, com o máximo de precipitação no verão e clima seco no inverno. Cerca de 70% das chuvas são acumuladas entre os meses de novembro e março. Assim, os ciclos estacionais possuem um período chuvoso com duração de seis a sete meses (geralmente de outubro a novembro e de março a abril) e um período seco que prolonga de quatro a cinco meses (normalmente de maio a setembro), mantendo, ao longo do ano, uma temperatura média e um índice pluviométrico de 25°C e de 1.450 mm, respectivamente (MAITELLI, 1994). Para Duarte (2000), o clima da região é definido por três períodos: uma estação seca e mais fresca no inverno; uma estação de transição seca e mais quente, um pouco antes das chuvas, e uma estação úmida e quente, durante as chuvas do verão.

Uma característica do ritmo climático da região é a presença de períodos de curta duração com temperaturas baixas, alternados com períodos de temperaturas moderadas ou elevadas. Esse fenômeno acontece durante o inverno, quando a queda das temperaturas decorre da atuação da Massa Polar Atlântica. Já na primavera e no verão, ocorrem apenas altas temperaturas, influenciadas pela Massa Tropical Continental (MAITELLI, 1994).

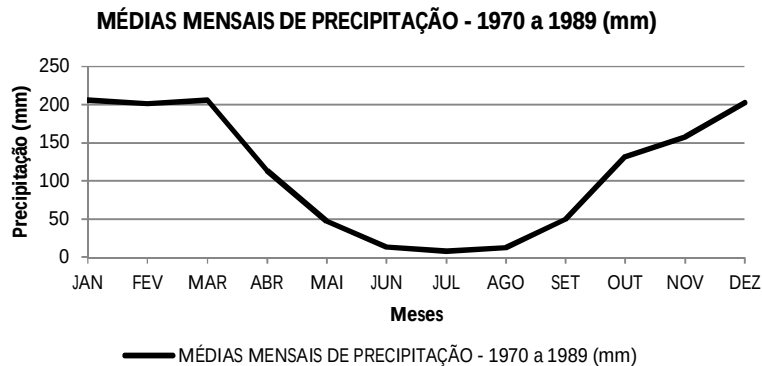
Campelo Jr, Priante Filho e Caseiro (1992) elaboraram estudo pioneiro intitulado *Caracterização Macroclimática de Cuiabá*, com base nos dados coletados na estação meteorológica convencional de superfície do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada a -15,620S; -56,11°O e 145m de altitude, no qual apresentam as médias mensais de precipitação, velocidade do vento, pressão, temperatura e umidade média, temperatura mínima e máxima, evaporação e insolação período de 1970 a 1989, conforme a Tabela 2.

A precipitação foi avaliada de 1901 a 1989. O valor médio anual foi de 1.346,90mm e os valores médios mensais são apresentados na Figura 9. Podem-se distinguir os meses de janeiro, fevereiro e março, nos quais a precipitação é acima de 200mm e os meses de junho, julho e agosto, nos quais a precipitação é inferior a 20mm. De abril a junho ocorre diminuição gradativa da precipitação e de setembro a novembro, aumento gradativo, sendo que em outubro os índices são de cerca de 150mm.

**Tabela 2** - Médias mensais de precipitação (mm) no período de 1901 a 1989; velocidade do vento (m/s), módulo da velocidade resultante (m/s), módulo da direção resultante do vento (graus) e direção relativa da resultante do vento período de 1970 a 1989, em Cuiabá/MT

| Meses | Médias mensais de precipitação (mm) | Velocidade média (m/s) | Módulo da velocidade do vento resultante (m/s) | Módulo da direção resultante do vento (graus) | Direção relativa da resultante do vento |
|-------|-------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| JAN   | 205,8                               | 1,7                    | 0,7                                            | 334                                           | NO                                      |
| FEV   | 201,0                               | 1,6                    | 0,5                                            | 299                                           | NO                                      |
| MAR   | 205,4                               | 1,6                    | 0,5                                            | 317                                           | NO                                      |
| ABR   | 113,2                               | 1,5                    | 0,1                                            | 349                                           | NO                                      |
| MAI   | 47,1                                | 1,4                    | 0,1                                            | 172                                           | SE                                      |
| JUN   | 13,1                                | 1,5                    | 0,2                                            | 317                                           | NO                                      |
| JUL   | 8,3                                 | 1,7                    | 0,1                                            | 282                                           | NO                                      |
| AGO   | 12,8                                | 1,6                    | 0,2                                            | 217                                           | SO                                      |
| SET   | 49,3                                | 1,8                    | 0,4                                            | 241                                           | SO                                      |
| OUT   | 131,6                               | 2,1                    | 0,5                                            | 333                                           | NO                                      |
| NOV   | 157,2                               | 1,8                    | 0,7                                            | 343                                           | NO                                      |
| DEZ   | 202,1                               | 1,9                    | 1,0                                            | 337                                           | NO                                      |

Fonte: Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992)



**Figura 9** - Médias mensais de precipitação em Cuiabá/MT, período de 1901 a 1989

Fonte: Adaptado de Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992)

Para o vento, tem-se a velocidade média mensal e respectiva direção da resultante no período de 1970 a 1989 (Tabela 3), sendo a frequência relativa dos ventos em cada direção. É importante ressaltar que apesar da baixa velocidade do vento predominante (valores maiores que 1m/s só ocorrem em dezembro) ocorrem rajadas (picos de velocidade de curta duração) em diversas direções. A direção predominante é a norte nos meses de agosto a maio, ocorrendo também ventos de

oeste, noroeste e sul, nos meses de junho e julho, com os quais se alternam condições de calmaria e ventos de norte.

**Tabela 3** – Frequências relativas da direção do vento em Cuiabá/MT, de 1970 a 1989

| DIREÇÃO         | FREQUÊNCIAS RELATIVAS (%) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | JAN                       | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
| <b>N</b>        | 26                        | 22  | 17  | 16  | 17  | 13  | 16  | 13  | 17  | 21  | 33  | 35  |
| <b>NE</b>       | 4                         | 5   | 6   | 4   | 4   | 4   | 6   | 4   | 3   | 7   | 5   | 5   |
| <b>E</b>        | 9                         | 11  | 6   | 12  | 7   | 5   | 6   | 8   | 9   | 6   | 7   | 6   |
| <b>SE</b>       | 6                         | 7   | 6   | 9   | 11  | 7   | 7   | 8   | 8   | 8   | 5   | 3   |
| <b>S</b>        | 8                         | 10  | 9   | 17  | 21  | 18  | 17  | 20  | 25  | 11  | 12  | 6   |
| <b>SO</b>       | 4                         | 6   | 9   | 7   | 4   | 10  | 5   | 7   | 8   | 9   | 4   | 4   |
| <b>O</b>        | 14                        | 13  | 13  | 11  | 8   | 10  | 9   | 15  | 10  | 9   | 9   | 13  |
| <b>NO</b>       | 21                        | 20  | 16  | 13  | 12  | 9   | 11  | 11  | 10  | 17  | 17  | 20  |
| <b>CALMARIA</b> | 8                         | 6   | 18  | 12  | 16  | 24  | 23  | 14  | 10  | 12  | 8   | 8   |

**Fonte:** Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992)

As características marcantes do clima da cidade de Cuiabá no período estudado são a ocorrência de curtos períodos de baixas temperaturas alternados a temperaturas moderadas ou elevadas no período de inverno, decorrentes da Massa Polar Atlântica, e a ocorrência de temperaturas elevadas durante os meses de outubro e novembro, decorrentes da Massa Tropical Continental.

Em média, ocorreram 54 dias por ano com temperatura média superior a 28°C, no período de 21/08 a 07/04, e 7 dias por ano com temperatura média superior a 30°C, no período de 24/09 a 11/10. O mais frequente é que os dias de temperaturas acima de 28 e 30°C ocorram isoladamente, mas podem ocorrer em períodos contínuos de até 16 dias e 7 dias, respectivamente (CAMPELO JR, PRIANTE FILHO e CASEIRO, 1992).

Em média, ocorreram 17 dias por ano com temperatura média inferior a 20°C, no período de 11/05 a 04/09, e 8 dias por ano com temperatura média inferior a 18°C, no período de 09/05 a 05/09. O mais frequente é que os dias de temperaturas abaixo de 20 e 18°C ocorram isoladamente, mas podem ocorrer em períodos contínuos de até 10 e 8 dias, respectivamente (CAMPELO JR, PRIANTE FILHO e CASEIRO, 1992).

A Tabela 4 apresenta as médias mensais de pressão, temperatura média, máxima e mínima, umidade relativa média, evaporação à sombra e insolação.

**Tabela 4** - Médias mensais de pressão, temperatura média, máxima e mínima, umidade relativa média, evaporação à sombra e insolação em Cuiabá/MT, de 1970 a 1989

| Meses | Pressão<br>(mb) | Tempe-<br>ratura<br>média<br>(°C) | Tempe-<br>ratura<br>máxima<br>(°C) | Tempe-<br>ratura<br>mínima<br>(°C) | Umidade<br>Relativa<br>Média<br>(%) | Evaporação<br>à sombra<br>(cm/dia) | Insolação<br>(h/dia) |
|-------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| JAN   | 991,8           | 26,6                              | 32,5                               | 23,4                               | 78                                  | 2,8                                | 5,4                  |
| FEV   | 992,3           | 26,5                              | 32,5                               | 23,0                               | 80                                  | 3,0                                | 5,6                  |
| MAR   | 992,4           | 26,5                              | 32,7                               | 23,0                               | 80                                  | 2,4                                | 5,9                  |
| ABR   | 993,6           | 26,4                              | 32,6                               | 22,2                               | 79                                  | 3,1                                | 6,7                  |
| MAI   | 995,2           | 25,0                              | 31,4                               | 20,6                               | 76                                  | 3,4                                | 7,2                  |
| JUN   | 997,4           | 23,0                              | 30,9                               | 17,8                               | 74                                  | 3,8                                | 7,4                  |
| JUL   | 995,8           | 22,8                              | 31,9                               | 16,6                               | 65                                  | 5,0                                | 8,2                  |
| AGO   | 994,5           | 24,7                              | 33,5                               | 18,2                               | 60                                  | 5,7                                | 7,1                  |
| SET   | 992,7           | 26,3                              | 33,8                               | 20,9                               | 63                                  | 5,4                                | 5,7                  |
| OUT   | 991,8           | 27,4                              | 34,2                               | 22,6                               | 67                                  | 5,1                                | 7,0                  |
| NOV   | 991,4           | 27,1                              | 33,2                               | 23,1                               | 73                                  | 4,3                                | 6,3                  |
| DEZ   | 993,7           | 26,8                              | 32,5                               | 23,5                               | 78                                  | 3,2                                | 5,4                  |
| ANUAL | 993,7           | 25,8                              | 32,6                               | 21,2                               | 73                                  | 3,9                                | 6,5                  |

**Fonte:** Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992)

### 2.3. OS ARQUIVOS CLIMÁTICOS DE SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE EDIFÍCIOS

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente relacionado às condicionantes externas do tempo, como temperatura do ar, umidade e radiação. A representação do fenômeno em modelos matemáticos exige, então, o registro destes dados do clima, razão pela qual os programas computacionais que simulam o desempenho térmico de edificações necessitam dos dados climáticos. Os arquivos climáticos dos diversos locais foram, então, padronizados para utilização pelos diversos *softwares* de avaliação de desempenho de edifícios, de forma que se pudesse

convergir resultados e estabelecer uma metodologia de tratamento dos dados generalizada para aplicação na avaliação de desempenho de edifícios.

Nesse sentido, destaca-se a metodologia do Ano Climático de Referência, com a qual são elaborados os arquivos climáticos no formato Test Reference Year (TRY), preparado pelo National Climatic Center o Typical Meteorological Year (TMY) que foi preparado pelo Sandia Laboratories na cidade de Albuquerque (EUA), ambos para utilização em simulação de desempenho de eficiência energética de edifícios.

O arquivo climático de simulação possui formato Test Reference Year (TRY) (ENERGY PLUS, 2009) e é formado por meio de uma metodologia baseada na eliminação de anos, cujos dados contêm temperaturas médias mensais extremas (altas e baixas) até que se obtenha apenas um ano de dados médios.

O procedimento para selecionar o ano climático TRY consiste em eliminar do banco de dados os anos de temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas), até permanecer um ano, somente.

Na primeira etapa, analisam-se os valores médios mensais de temperatura do ar, anotando-se o mês mais quente e o mês mais frio, o segundo mês mais quente e o segundo mês mais frio e assim por diante, conforme aparecem as maiores e as menores temperaturas médias mensais, respectivamente. Concluídos doze meses, repete-se o procedimento, invertendo-se o sentido de análise, ou seja, onde é mês quente passa a ser mês frio e vice-versa.

Com isso, os anos que apresentarem temperaturas médias mensais extremas (mais altas ou mais baixas) serão eliminados, obtendo-se o ano designado como TRY, que é, portanto, um ano real. Contêm informações climáticas para as 8.760 horas do ano e é disponibilizado em forma digital, por ser extenso, conforme a sequência apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5** – Dados e formato de um arquivo TRY

| NOME DO CAMPO                                 | POSICÃO | UNIDADE                |
|-----------------------------------------------|---------|------------------------|
| Número oficial da estação meteorológica       | 01-05   |                        |
| Temperatura de bulbo seco (Tbs)               | 06-08   | °C                     |
| Temperatura de bulbo úmido (Tbu)              | 09-11   | °C                     |
| Temperatura operativa (Tpo)                   | 12-14   | °C                     |
| Direção do vento                              | 15-17   | (graus: 0 a 360°)      |
| Velocidade do vento ( $\times 10^{-1}$ )      | 18-20   | m/s                    |
| Pressão nível da pista                        | 21-24   | Pa                     |
| Tempo presente                                | 25      | Ver descrição a seguir |
| Total de nuvens ( $\times 10^{-1}$ )          | 26-28   | 0-10                   |
| Quantidade de nuvens (1ª camada)              | 29-30   | Ver descrição a seguir |
| Tipo de nuvem (1ª camada)                     | 31      | Ver descrição a seguir |
| Altura nuvem (1ª camada) ( $\times 10^{-1}$ ) | 32-34   | (m)                    |
| Quantidade de nuvens (2ª camada)              | 35-36   | Ver descrição a seguir |
| Tipo de nuvem (2ª camada)                     | 37      | Ver descrição a seguir |
| Altura nuvem (2ª camada) ( $\times 10^{-1}$ ) | 38-40   | (m)                    |
| Soma da quantidade da 1ª e 2ª camada          | 41-42   |                        |
| Quantidade de nuvens (3ª camada)              | 43-44   | Ver descrição a seguir |
| Tipo de nuvem (3ª camada)                     | 45      | Ver descrição a seguir |
| Altura nuvem (3ª camada) ( $\times 10^{-1}$ ) | 46-48   | (m)                    |
| Soma da quantidade da 1ª, 2ª e 3ª camada      | 49-50   |                        |
| Quantidade de nuvens (4ª camada)              | 51-52   | Ver descrição a seguir |
| Tipo de nuvem (4ª camada)                     | 53      | Ver descrição a seguir |
| Altura nuvem (4ª camada) ( $\times 10^{-1}$ ) | 54-56   | (m)                    |
| Radiação solar                                | 57-60   |                        |
| Branco                                        | 61-69   |                        |
| Ano                                           | 70-73   |                        |
| Mês                                           | 74-75   |                        |
| Dia                                           | 76-77   |                        |
| Hora                                          | 78-79   |                        |
| Branco                                        | 80      |                        |

Onde:

| Registro | Código do registro   |                      |                 |
|----------|----------------------|----------------------|-----------------|
|          | Tempo presente       | Quantidade de nuvens | Tipo de nuvens* |
| 0        | Nada a relatar       | Céu claro            | Desconhecido    |
| 1        | Precipitação à vista | 1/8                  | Ci e/ou Cc      |
| 2        | Névoa seca/fumaça    | 2/8                  | Cs              |
| 3        | Areia/poeira         | 3/8                  | Ac              |
| 4        | Névoa úmida/nevoeiro | 4/8                  | As              |
| 5        | Chuvisco             | 5/8                  | Ns              |
| 6        | Chuva                | 6/8                  | Sc              |
| 7        | Neve                 | 7/8                  | St e/ou Fs      |
| 8        | Trovoada/relâmpago   | 8/8                  | Cu e/ou Fc      |
| 9        | Granizo              | desconhecido         | Cb              |

\*Ci e/ou Cs=Cirrus e/ou Cirrocumbus, Cs=Cirrostratus, Ac=Alto cumulus, As=Altostratus, Ns=Nimbostratus, Sc=Stratocumbulus, St e/ou Fs= Stratus, Cu e/ou Fc=Cumulus, Cb=Cumulonimbus

**Fonte:** Adaptado Goulart et al. (1997)

A aplicação desta metodologia em estudo específico para a cidade de Cuiabá foi realizada por Leão (2007), que elaborou um arquivo TRY com base de dados de quinze anos (1990-2004), coletados no 9º Distrito de Meteorologia. Para esta sequência de quinze anos, aplicou a metodologia baseada na eliminação de anos cujos dados contêm temperaturas médias mensais extremas, elegendo o ano de 1994 como o TRY de seu estudo, considerado pela autora como um ano representativo do clima local, com características mais amenas diante dos outros anos analisados.

Os arquivos TMY e TMY2 (Test Meteorological Year, versão 2) contêm a compilação de meses sem extremos de temperatura, provenientes de diferentes anos, gerando arquivo climático que apresenta temperaturas sem extremos para cada mês. O TMY2 e o TMY contêm dados de radiação solar global horizontal e direta normal que não existem no formato TRY. Os arquivos TMY se referem ao período de 1952 a 1975. Posteriormente, foram revisados, passando a ser chamados de TMY2 (segunda versão do TMY) (NSRBD, 2011).

O TMY tem seu método de elaboração semelhante ao utilizado para o TRY, mas é baseado em meses individuais, em vez de anos inteiros (CRAWLEY e HUANG, 2007). É uma compilação de meses sem extremos de temperatura provenientes de diferentes anos, gerando um ano climático que apresenta temperaturas sem extremos para cada mês. O TMY seleciona um mês típico baseado em nove índices diários que consistem na máxima, mínima e média de bulbo seco, na temperatura do ponto de orvalho, na máxima e média velocidade do vento e do total de radiação solar global horizontal, cujo critério de seleção é a proximidade de valores em um longo período de tempo. O processo pode ser considerado uma série de passos (NSRBD, 2011), cujo ano consiste de meses representativos dos padrões climáticos.

Os arquivos climáticos que se destinam à simulação no software Energy Plus foram gerados de arquivos TMY2, são do tipo texto e denominados de EnergyPlus Weather File (epw). Consistem em um banco de dados meteorológicos, de radiação solar e iluminância celeste, separados por vírgulas. Os dados de um arquivo epw são descritos por LAMBERTS e CARLO (2005), conforme Tabela 6.

**Tabela 6** – Dados do cabeçalho de um arquivo TMY

| NOME DO CAMPO                    | UNIDADE           |
|----------------------------------|-------------------|
| Data                             |                   |
| Horário expresso em Hora:Min     |                   |
| Temperatura de bulbo seco        | °C                |
| Temperatura de ponto de orvalho  | °C                |
| Umidade relativa                 | %                 |
| Pressão atmosférica              | Pa                |
| Radiação global horizontal       | Whm <sup>-2</sup> |
| Radiação direta normal           | Whm <sup>-2</sup> |
| Radiação difusa horizontal       | Whm <sup>-2</sup> |
| Iluminância global horizontal    | lux               |
| Iluminância direta normal        | lux               |
| Iluminância difusa horizontal    | lux               |
| Luminância no zênite             | lux               |
| Direção do vento                 | (graus)           |
| Velocidade do vento              | m/s               |
| Cobertura total de nuvens        | (.1)              |
| Cobertura opaca de nuvens        | (.1)              |
| Visibilidade                     | km                |
| Altura da abóbada                | m                 |
| Tempo presente                   | n                 |
| Precipitação                     | mm <sup>3</sup>   |
| Profundidade óptica de aerossóis | (.001)            |
| Quantidade de neve               | cm                |
| Dias sem nevar                   |                   |

**Fonte:** Lamberts e Carlo (2005)

Os dados meteorológicos do arquivo epw de Cuiabá são coletados no Aeroporto Marechal Rondon, localizado na cidade de Várzea Grande e disponibilizados pela REDEMET, composto da seguinte forma: janeiro (1977); fevereiro (1977), março (1991), abril (1995), maio (1973), junho (1998), julho (1989), agosto (1997), setembro (1998), outubro (1997), novembro (1978) e dezembro (1981). Apresentam-se os dados das médias mensais de temperatura do arquivo epw (Tabela 7).

**Tabela 7** - Arquivo climático epw de Cuiabá/MT

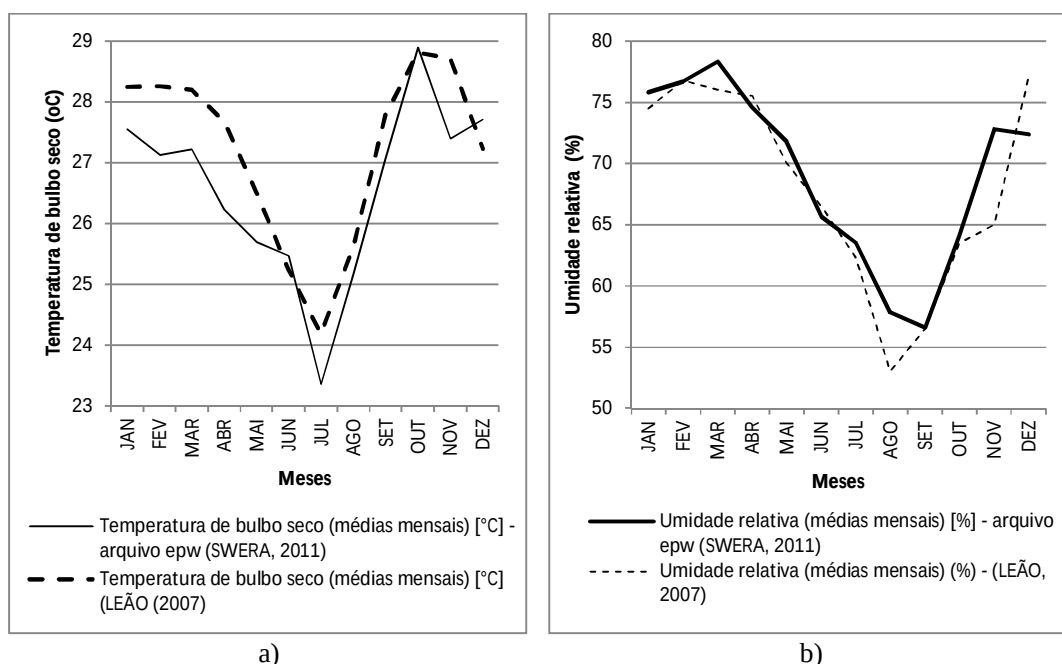
|          | MESES |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | JAN   | FEV   | MAR   | ABR   | MAI   | JUN   | JUL   | AGO   | SET   | OUT   | NOV   | DEZ   |
| <b>A</b> | 524   | 524   | 512   | 516   | 463   | 448   | 481   | 555   | 551   | 528   | 509   | 523   |
| <b>B</b> | 326   | 348   | 362   | 447   | 469   | 477   | 487   | 512   | 416   | 331   | 280   | 296   |
| <b>C</b> | 269   | 251   | 240   | 196   | 160   | 154   | 168   | 197   | 236   | 268   | 284   | 292   |
| <b>D</b> | 1036  | 1052  | 1045  | 935   | 854   | 779   | 840   | 943   | 994   | 1040  | 1022  | 1059  |
| <b>E</b> | 862   | 907   | 897   | 934   | 922   | 853   | 874   | 892   | 858   | 830   | 767   | 915   |
| <b>F</b> | 862   | 907   | 897   | 934   | 922   | 853   | 874   | 892   | 858   | 830   | 767   | 915   |
| <b>G</b> | 5903  | 5865  | 5459  | 4979  | 4423  | 4242  | 4537  | 5272  | 5639  | 6002  | 5808  | 5959  |
| <b>H</b> | 3740  | 3985  | 3943  | 4663  | 4703  | 4742  | 4761  | 5062  | 4442  | 3874  | 3249  | 3432  |
| <b>I</b> | 3059  | 2836  | 2599  | 1926  | 1566  | 1487  | 1628  | 1926  | 2458  | 3080  | 3293  | 3365  |
| <b>J</b> | 58858 | 58838 | 57653 | 57898 | 51660 | 49468 | 52754 | 60654 | 60964 | 58800 | 56857 | 58529 |
| <b>K</b> | 28484 | 30950 | 32038 | 41978 | 44276 | 45105 | 46378 | 49457 | 39257 | 29738 | 24214 | 25463 |
| <b>L</b> | 27    | 27    | 27    | 26    | 25    | 25    | 23    | 27    | 27    | 29    | 27    | 27    |
| <b>M</b> | 22    | 22    | 22    | 21    | 19    | 17    | 15    | 14    | 18    | 20    | 21    | 22    |
| <b>O</b> | N75   | 76    | 77    | 74    | 71    | 65    | 62    | 51    | 60    | 63    | 72    | 72    |
| <b>P</b> | 192   | 149   | 104   | 141   | 89    | 108   | 102   | 145   | 141   | 145   | 53    | 95    |
| <b>Q</b> | 2     | 2     | 1     | 2     | 1     | 1     | 1     | 2     | 2     | 2     | 1     | 2     |
| <b>R</b> | 28    | 28    | 27    | 27    | 26    | 25    | 24    | 24    | 24    | 25    | 26    | 27    |

**Fonte:** Adaptado de Liggett e Milne (2010)

Onde:

|          |                                                                                |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b> | Radiação global (médias horárias) ( $\text{Whm}^{-2}$ )                        |
| <b>B</b> | Radiação direta (médias horárias) ( $\text{Whm}^{-2}$ )                        |
| <b>C</b> | Radiação difusa (médias horárias) ( $\text{Whm}^{-2}$ )                        |
| <b>D</b> | Radiação global horizontal (máximas horárias) ( $\text{Whm}^{-2}$ )            |
| <b>E</b> | Radiação normal direta (máximas horárias) ( $\text{Whm}^{-2}$ )                |
| <b>F</b> | Radiação difusa (máximas horárias) ( $\text{Whm}^{-2}$ )                       |
| <b>G</b> | Radiação global horizontal (médias diárias totais) ( $\text{Whm}^{-2}$ )       |
| <b>H</b> | Radiação normal direta (médias diárias totais) ( $\text{Whm}^{-2}$ )           |
| <b>I</b> | Radiação difusa (médias diárias totais) ( $\text{Whm}^{-2}$ )                  |
| <b>J</b> | Iluminação global horizontal (médias horárias) (lux)                           |
| <b>K</b> | Iluminação direta normal (médias horárias) (lux)                               |
| <b>L</b> | Temperatura de bulbo seco (médias mensais) ( $^{\circ}\text{C}$ )              |
| <b>M</b> | Temperatura de ponto de orvalho (médias mensais) ( $^{\circ}\text{C}$ )        |
| <b>O</b> | Umidade relativa (médias mensais) (%)                                          |
| <b>P</b> | Direção do vento (médias mensais) (graus)                                      |
| <b>Q</b> | Velocidade do vento (médias mensais) (m/s)                                     |
| <b>R</b> | Temperatura do solo (médias mensais de 3 profundidades) ( $^{\circ}\text{C}$ ) |

Diferenças entre os resultados dos estudos podem ter origem nos diversos arquivos, que existem em função da metodologia de estruturação de cada um deles. Verificaram-se, por exemplo, algumas diferenças entre o arquivo TRY trabalhado por Leão (2007) e o epw em termos de temperatura e umidade. A temperatura média anual do TRY de Leão (2007) é de 27,2°C, ligeiramente maior que a do arquivo epw, de 26,5°C. As maiores diferenças de temperatura entre o primeiro e o segundo foram encontradas nos meses de abril (-1,44°C), novembro (-1,31°C), fevereiro (-1,13°C) e março (-0,98°C) (Figura 10-a). A umidade média anual Leão (2007) é de 68,05%, ligeiramente menor que a do arquivo epw, de 69,17%. As maiores diferenças de umidade entre o primeiro e o segundo foram encontradas nos meses de novembro (7,84%), dezembro (-4,64%), agosto (4,83%) e março (2,32%) (Figura 10-b).



**Figura 10** – Dados comparativos das médias mensais da temperatura de bulbo seco (a) e umidade relativa (b) do arquivo epw (SWERA, 2011) e TRY (LEÃO, 2007)

**Fonte:** Adaptado de Leão (2007)

A coerência entre os resultados medidos e simulados tem aumentado conforme os programas vêm sendo refinados, conforme verificado por diversos autores. Wite et al. (2001) validaram o Energy Plus comparando-o com os programas

anteriores DOE-2.1E, BLAST e ESP e os resultados indicaram bom ajuste entre eles. Henninger et al. (2003), utilizando da metodologia do Building Energy Simulation Test (BESTEST) da International Energy Agency (IEA) comparando-o com outros sete programas de simulação de edifícios, e consideraram o desempenho Energy Plus satisfatório.

Grings (2003) comparou cargas térmicas medidas e simuladas com o Energy Plus. Considerou a ferramenta poderosa para simulações de edifícios termicamente pesados e observa que dependendo das opções de simulação adotados pelo usuário, as diferenças poderão ser maiores ou menores. Condições específicas do microclima podem ser simuladas a partir da inserção de dados locais nos arquivos de simulação (BALTAR, 2006). Westphal (2007) denominou o processo de ajuste dos dados de entrada verificando suas influências nos de saída como análise de sensibilidade, que pode ser feita comparando-se os dados de monitoramento existentes da edificação com os resultados simulados.

Como instrumento para compreensão do macro clima da cidade de Cuiabá elaborou-se estudo comparativo entre os dados da temperatura do ar de Campelo Jr., Priante Filho e Caseiro (1992), registros mais atualizados das estações meteorológicas da cidade e registros dos dados do arquivo epw.

Atualmente, as estações climáticas com coleta regular de dados são as da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMETS<sup>2</sup>, 2011) e INMET, ambas localizadas no município de Várzea Grande, e do Centro de Previsão do Tempo e Clima (CPTEC), localizada na região leste da cidade de Cuiabá, em altitudes de 187, 157 e 237m, respectivamente. Distam entre si de 3,5km (REDEMETS-INMET), 11,5km (REDEMETS-CPTEC) e 8,5km (CPTEC-INMET), com altitudes de 187, 157 e 237 metros, respectivamente (Figura 11).

---

<sup>2</sup>Disponível em: <http://www.redemet.aer.mil.br>



**Figura 11** - Estações climatológicas com coletas regulares em Cuiabá/MT

**Fonte:** Adaptado de GOOGLE (2009)

A análise comparativa é mostrada na Figura 12, em que se apresentam dados de Campelo Jr., Priante Filho e Caseiro (1992), referentes ao período de 1970 a 1991, anteriormente apresentados e discutidos, cuja temperatura média, a média das máximas (mês de outubro) e a média das mínimas (mês de julho) foram de 25,8; 32,6 e 21,8°C, respectivamente, e os dados das estações meteorológicas nos seguintes períodos:

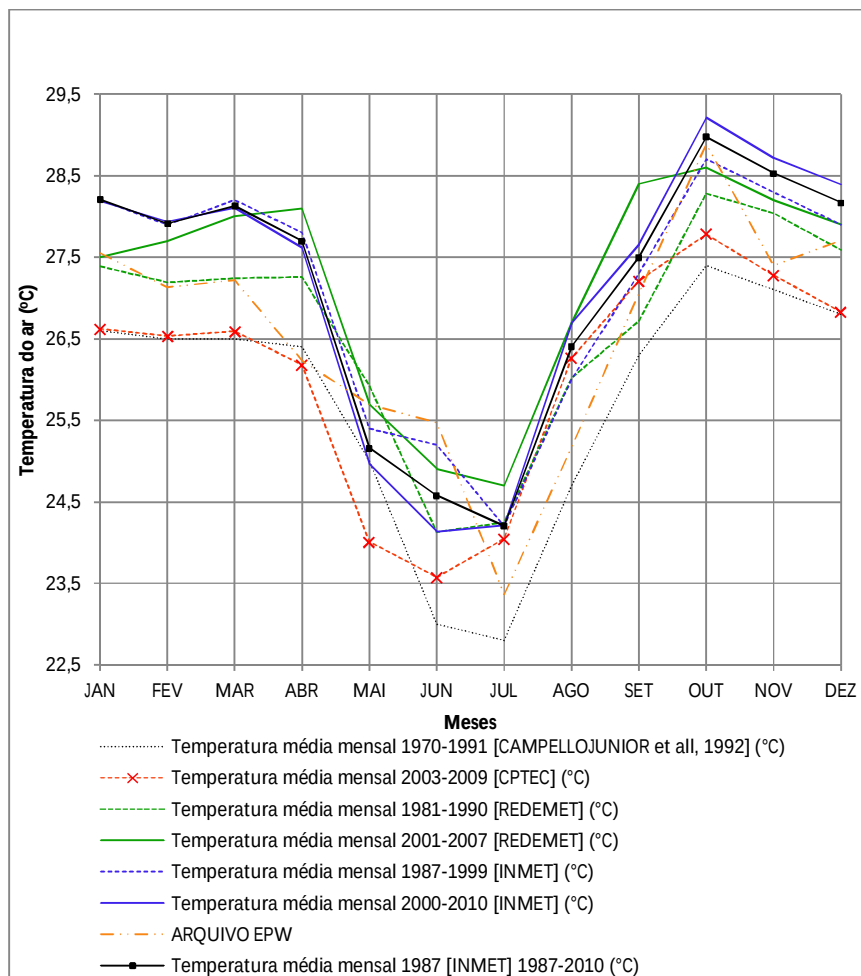
a) Os dados de INMET (2011), organizados nos períodos de 1987 a 1999 e de 2000 a 2010, na forma em que o banco de dados digitalizado foi disponibilizado pelo INMET para utilização em pesquisas no Programa de Pós-graduação em Física Ambiental (PGFA);

b) Os dados da REDEMET (2011), considerando o período de 1987 a 2010;

c) Os dados da REDEMET (2011), referentes a dois períodos: de 1981 a 1990 (cujo acesso se deu a partir das tabelas climatológicas) e de 2001 a 2007 (cujo acesso se deu apenas a gráficos dos quais extraíram-se os valores utilizando-se um software de desenho assistido por computador). Neste período, a REDEMET (2011)

também fornece a temperatura de referência, definida como a média das temperaturas máximas diárias do mês mais quente do ano. O mês mais quente do ano é o que apresenta a maior média mensal de temperatura, que para esta estação do Aeroporto Marechal Rondon foi o mês de outubro, com temperatura de referência de 34,3°C.

d) Os registros do CPTEC (2011), para o período de 2003 a 2009, cujos dados são disponibilizados na página do CPTEC. Este período apresenta a média das máximas (mês de outubro) e mínimas (mês de julho) de 27,8 e 23,6°C, respectivamente.



**Figura 12** – Dados históricos de médias mensais de temperatura do ar em Cuiabá/MT

Ao se compararem as médias mensais da temperatura do ar apresentadas por REDEMET (2011) nos períodos de 1981 a 1990 e 2001 a 2007, observa-se que no primeiro período a temperatura média, a média das máximas e a média das mínimas foram de 27,1, 32,7 (mês de outubro) e 21,4°C (mês de junho), respectivamente. No segundo período, a temperatura média, a média das máximas (mês de outubro) e a média das mínimas (mês de julho) foram de 27,1, 33,7 e 21,1°C, respectivamente.

Ao se compararem as médias mensais da temperatura do ar apresentadas por INMET (2011), nos períodos de 1981 a 1990 e de 2001 a 2007, observa-se que o primeiro período apresenta a média das máximas (mês de outubro) e mínimas (mês de julho) de 28,1 e 24,1°C, respectivamente. Para o período de 2001 a 2007, tem-se que a temperatura média mensal atinge valor máximo no mês de outubro e o valor mínimo no mês de julho, com valor médio de 28,6 e 24,6°C, respectivamente.

Ao se compararem as médias mensais da temperatura do ar apresentadas por Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992) e CPTEC (2011), observa-se similaridade entre elas no período chuvoso – de dezembro a março. Na estação seca, os registros de Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992) assumem valores menores que CPTEC, o que pode ser justificado pela sua localização próxima ao Rio Cuiabá, em baixa altitude, que lhe confere maior umidade e, conseqüentemente, menores valores de temperatura, se comparado ao CPTEC e também à estação da REDEMET.

Ressalta-se que as observações dos períodos de 1981-1990 (REDEMET, 2011) e 1987-1999 (INMET, 2011) com 1970-1991 (Campelo Jr, Priante Filho e Caseiro, 1992), embora sejam, na maior parte, referentes a períodos concomitantes, apresentam diferenças de valores de até 1°C entre este e o primeiro, que podem ser justificadas pelas distintas localizações, altitudes, uso e ocupação do solo e pela distinta padronização de coleta de dados entre elas, dentre outras. Entre este e o segundo, além de concomitância, foram tomadas na mesma estação, não deixando de se observar, porém, valores maiores no segundo, que podem estar relacionados ao aquecimento do local como consequência do processo de urbanização. A diferença entre os valores de Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992) e o período de 2000-2010 (INMET, 2011) também pode ser observada, reforçando a justificativa exposta.

O arquivo climático, de acordo com sua estruturação anteriormente descrita, elimina os valores extremos, constituindo-se de uma boa referência para estudos de avaliação de desempenho térmico, planejamento urbano, dentre outros.

## **2.4. ESTRATÉGIAS DE ADEQUAÇÃO DA ARQUITETURA AO CLIMA E CONFORTO TÉRMICO**

Tendo em vista as diversidades culturais e climáticas dos locais habitados pelo homem, desenvolveram-se estudos de padrões que pudessem expressar a sensação térmica de seus habitantes.

A definição desses modelos de conforto baseou-se em índices que quantificam as respostas das sensações humanas às diferentes condições de exposição térmica ambiental e que servem de referência para a definição de zonas de conforto.

Dois modelos de conforto são definidos na ASRHAE (2004): o modelo de conforto térmico do PMV/PPD e o modelo de Conforto Adaptativo.

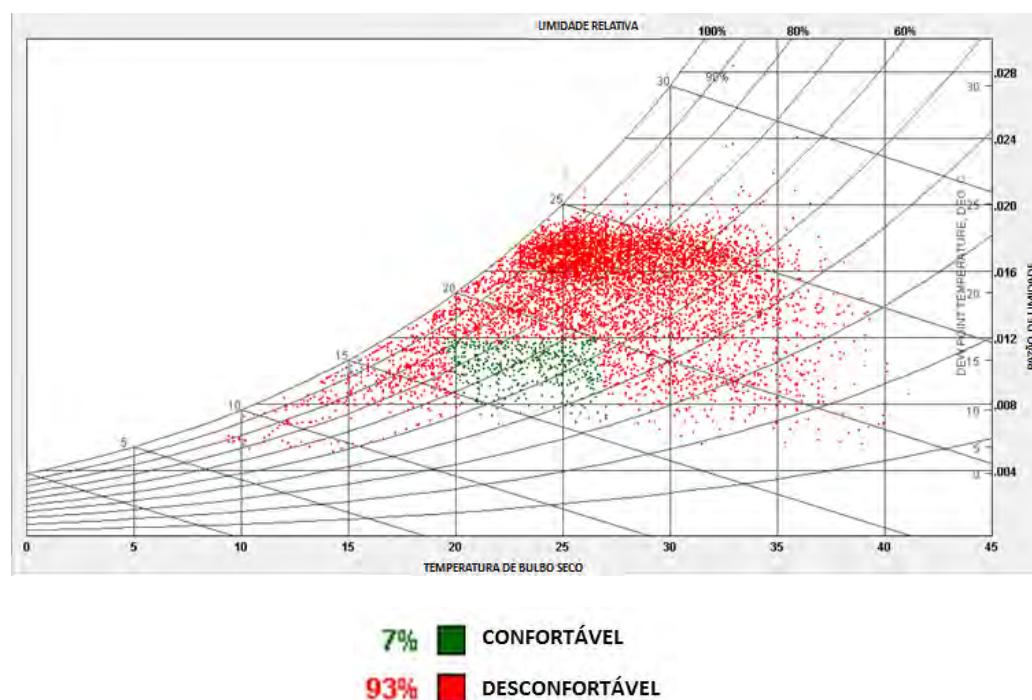
O modelo de conforto térmico do PMV/PPD é estabelecido na ASRHAE 55 (2004) para ambientes condicionados artificialmente. Foi desenvolvido por Fanger, em 1972 e normalizado pela ISO 7730 (1984). Considera a temperatura de bulbo seco, a vestimenta (clo), a atividade metabólica (met), a velocidade do ar (m/s), a umidade (%) e a temperatura média radiante ( $^{\circ}\text{C}$ ). Recomenda que para espaço de ocupação humana, o Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) deve ser menor que 10%, o que corresponde a um Voto Médio Previsto (VMP) de -0,5 a +0,5.

O conceito de conforto adaptativo leva em consideração a adaptabilidade do ser humano às mudanças de temperatura, considerando que quando alguma mudança no ambiente térmico ocorre, causando um desconforto térmico, as pessoas reagem no sentido de restabelecer este conforto, sendo o ambiente naturalmente condicionado.

Da definição da zona de conforto resulta um diagrama chamado Carta Bioclimática, que expressa as relações entre zona de conforto térmico dos ocupantes, o clima do entorno da edificação e as estratégias requeridas pelo projeto da

edificação a fim de se conseguir níveis de conforto térmico nas diversas condições climáticas.

A Carta Bioclimática para Cuiabá, gerada com base no arquivo climático epw e utilizando o modelo de conforto do Voto Médio Previsto/Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PMV/PPD) proporciona, originalmente, porcentagens de 7 e 93% do total de horas do ano horas como confortáveis e desconfortáveis, respectivamente (Figura 13).



**Figura 13** – Zona de Conforto na Carta Bioclimática gerada com o critério do PMV

**Fonte:** Adaptado de Liggett e Milne (2010)

As estratégias de projeto destinam-se a orientar a concepção de edifícios como casas, lojas, salas de aula e pequenos escritórios, cujas atividades não dispõem grandes cargas térmicas internas e nas quais, portanto, o envelope do prédio tem grande impacto sobre o conforto térmico dos ocupantes.

Em Cuiabá, a estratégia de Condicionamento Térmico Artificial usada de forma isolada proporciona conforto a 54% das horas anuais. Esta é regulada pela

temperatura e estabelecida na Carta para temperaturas efetivas acima da zona de conforto térmico de verão (26,7°C).

É possível reduzir o uso do Condicionamento Artificial adotando-se as estratégias passivas de Massa Térmica para Resfriamento (-4,7%), Massa Térmica para Resfriamento com Ventilação Seletiva Noturna (-5,2%), Resfriamento Evaporativo Direto (-4,0%), Resfriamento Evaporativo Indireto (-5,4%), Ventilação Noturna (-1,0%) e Ventilação Noturna Forçada (-1,6%). A Tabela 8 mostra o impacto de cada uma dessas estratégias na melhoria das condições internas dos edifícios.

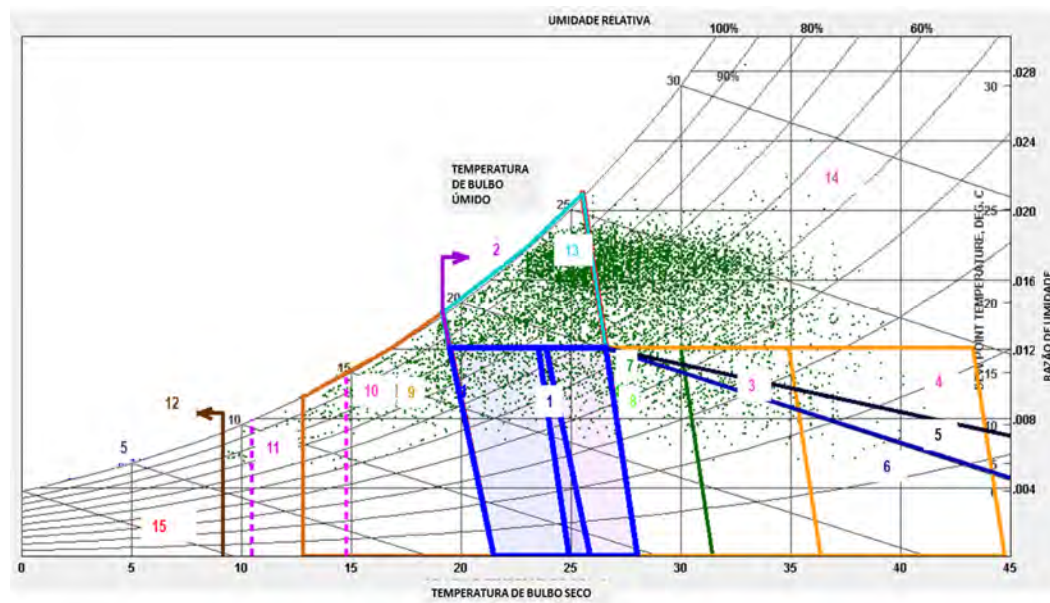
**Tabela 8** – Estratégias bioclimáticas para Cuiabá e horas correspondentes de acordo com o modelo do PMV da ASHRAE 55 (2004)

| % DE HORAS | HORAS DO ANO | ESTRATÉGIA DE PROJETO                                | IMPACTO NO TOTAL DE HORAS DE CONFORTO |             |
|------------|--------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------|
|            |              |                                                      | Conforto                              | Desconforto |
| 0,40%      | 33           | Massa Térmica para Aquecimento Solar                 | 7                                     | 93          |
| 1,00%      | 89           | Ventilação Noturna                                   | 15                                    | 85          |
| 1,60%      | 141          | Ventilação Noturna Forçada                           | 15                                    | 85          |
| 2,50%      | 216          | Aquecimento Solar Passivo com Isolamento Térmico     | 9                                     | 91          |
| 4,00%      | 347          | Resfriamento Evaporativo                             | 20                                    | 80          |
| 4,30%      | 373          | Aquecimento Artificial e Umidificação, se necessário | 13                                    | 87          |
| 4,70%      | 411          | Massa Térmica para Resfriamento                      | 18                                    | 82          |
| 5,20%      | 452          | Massa Térmica para Resfriamento e Ventilação Noturna | 19                                    | 81          |
| 5,40%      | 472          | Resfriamento Evaporativo Indireto                    | 20                                    | 80          |
| 6,00%      | 526          | Ganho de Calor Interno                               | 13                                    | 87          |
| 6,60%      | 574          | Conforto                                             | 6,6                                   | 93,3        |
| 31,00%     | 2712         | Proteção Solar das Aberturas                         | 20                                    | 80          |
| 32,90%     | 2880         | Ventilação Diurna (Desumidificação)                  | 53                                    | 47          |
| 47,30%     | 4144         | Condicionamento Artificial                           | 100                                   | 0           |

**Fonte:** Adaptado de Liggett e Milne (2010)

Garantidas todas as estratégias bioclimáticas em conjunto, totalizam-se 53% das horas do ano em situação de conforto térmico. O restante, correspondente à estratégia de Condicionamento Artificial, equivale a um percentual máximo de conforto térmico de 47% das horas do ano, na qual as temperaturas de bulbo seco e as umidades são elevadas e não é possível obter condições de conforto utilizando-se estratégias passivas de adequação da arquitetura ao clima.

Embora o clima seja predominantemente quente, em 0,5% das horas é requerido Aquecimento Artificial e Umidificação, nos fenômenos chamados de “friagem”, que duram cerca de 3 a 4 dias. Dentre as estratégias passivas, as mais relevantes são a Ventilação Diurna e Desumidificação e a Proteção Solar das Aberturas, recomendadas para 32,9 e 31% das horas do ano, respectivamente. Observa-se que as estratégias se sobrepõem, como, por exemplo, as estratégias de proteção solar das aberturas, Resfriamento Artificial, Desumidificação e Ganhos de Calor Interno, dentre outras. As estratégias sobrepostas podem ser usadas isoladamente ou em conjunto (Figura 14).



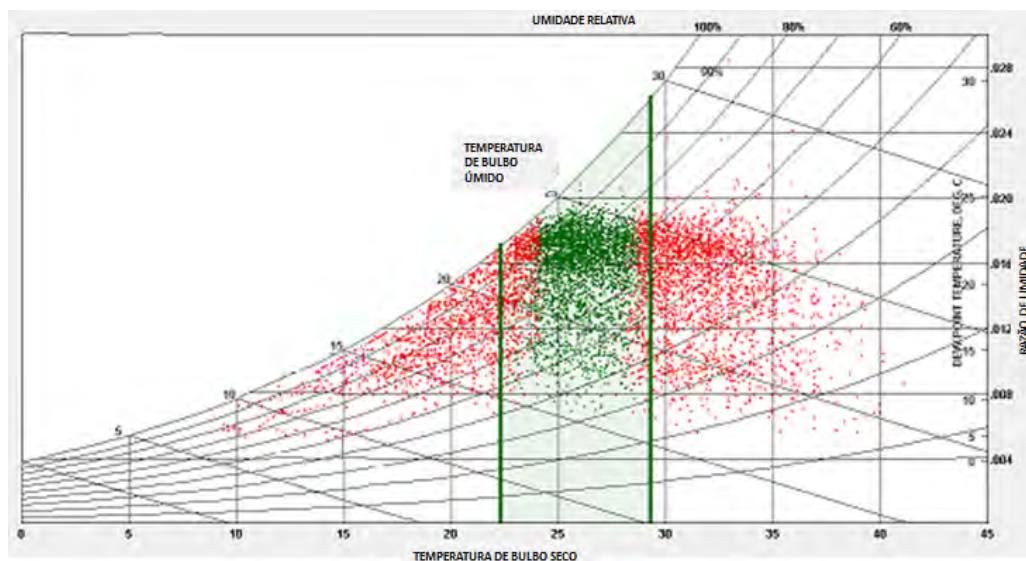
**Figura 14** – Carta bioclimática de Cuiabá de acordo com o modelo de conforto do PMV

**Fonte:** Adaptado de Liggett e Milne (2010)

Onde:

- 1 – Zona de conforto
- 2 – Sombreamento das aberturas
- 3 – Massa térmica para resfriamento
- 4 – Massa térmica para resfriamento e ventilação noturna
- 5 – Resfriamento evaporativo direto
- 6 – Resfriamento evaporativo de dois estágios
- 7 – Ventilação natural
- 8 – Ventilação forçada
- 9 – Ganho de calor interno
- 10 – Ganho de calor solar direto por baixa massa térmica
- 11 – Ganho de calor solar direto por elevada massa térmica
- 12 – Proteção contra o vento em espaços abertos
- 13 – Desumidificação
- 14 – Refrigeração
- 15 – Aquecimento

No Modelo Adaptativo (ASHRAE, 2004), tem-se 56% das horas desconfortáveis e 44% das horas dentro da zona de conforto térmico (Figura 15).



**Figura 15** – Carta bioclimática de Cuiabá de acordo com o modelo de Conforto Adaptativo

**Fonte:** Adaptado de Liggett e Milne (2010)

Existem algumas variáveis que possibilitam um controle individual do conforto térmico, como, por exemplo, as vestimentas, o abrir e o fechar de janelas e a

regulação da velocidade do ar que permitem que, mesmo em temperaturas mais altas, o conforto seja restabelecido (KRUGGER e LAROCA, 2009).

Este modelo pressupõe vestimentas adequadas às condições térmicas e livremente assumidas pelos ocupantes e atividade sedentária (1,0 a 1,3 met). (ASHRAE, 2004). É aplicável aos espaços naturalmente condicionados, nos quais não deve haver nenhum sistema de refrigeração ou aquecimento em operação, sendo permitida ventilação mecânica.

Baseou-se em experimentos de campo derivado de um banco de dados global de 21.000 medições, realizadas, principalmente, em edifícios de escritórios, que demonstraram que a resposta térmica dos ocupantes desses ambientes não obedece aos mesmos critérios dos espaços condicionados artificialmente. Em ambientes deste tipo, os ocupantes têm expectativas térmicas diferentes e mais ampliadas, oriundas da possibilidade de controle das aberturas e da vestimenta, o que resulta em uma faixa de conforto maior do que nos ambientes climatizados, que dependem das condições climáticas externas.

Segundo De Dear & Brager (2002), o clima externo influencia a percepção térmica e provavelmente dá-se um efeito psicológico, particularmente em edifícios naturalmente ventilados, nos quais há uma relação direta entre as temperaturas internas e externas. A edificação construída é naturalmente ventilada (não se prevê a utilização de equipamentos de climatização artificial) e os ocupantes tem a possibilidade de regular velocidade do ar no interior por meio do controle de aberturas para obtenção de conforto. A temperatura de conforto adaptativo é obtida utilizando a média mensal da temperatura externa como dado de entrada, calculada por meio da Equação 4.

$$T_{conf} = 0,31 T_{ext} + 17,8 \quad \text{..... Equação 4}$$

Onde:

$T_{conf}$ : temperatura de conforto ( $^{\circ}\text{C}$ )

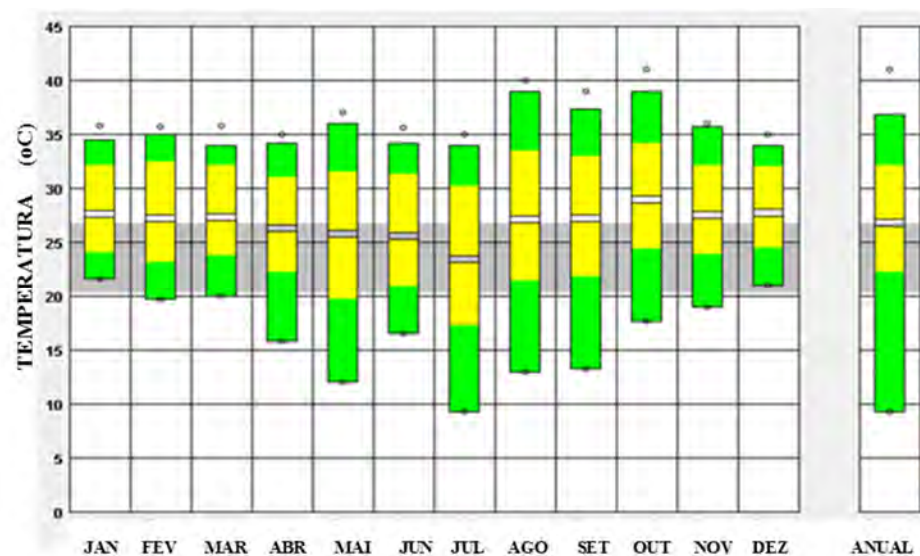
$T_{ext}$ : temperatura média externa mensal ( $^{\circ}\text{C}$ )

Em estudos de desempenho de edificações é importante conhecer as relações entre as variáveis climáticas e as condições de conforto térmico dos ocupantes. Nesse sentido, tem-se o diagnóstico climático das Figuras 16-a e 16-b, que apresentam as médias mensais das temperaturas de bulbo seco máximas e mínimas registradas (pontos abertos), temperaturas de projeto máximas e mínimas (barras verdes superiores e inferiores) e temperatura de bulbo seco médias (barras centrais abertas), bem como as temperaturas de conforto térmico, para o modelo de conforto do PMV (ambientes condicionados artificialmente - PPD máxima admitida de 10%) e para o modelo de conforto Adaptativo, admitindo-se 90% de aceitabilidade para com o ambiente térmico.

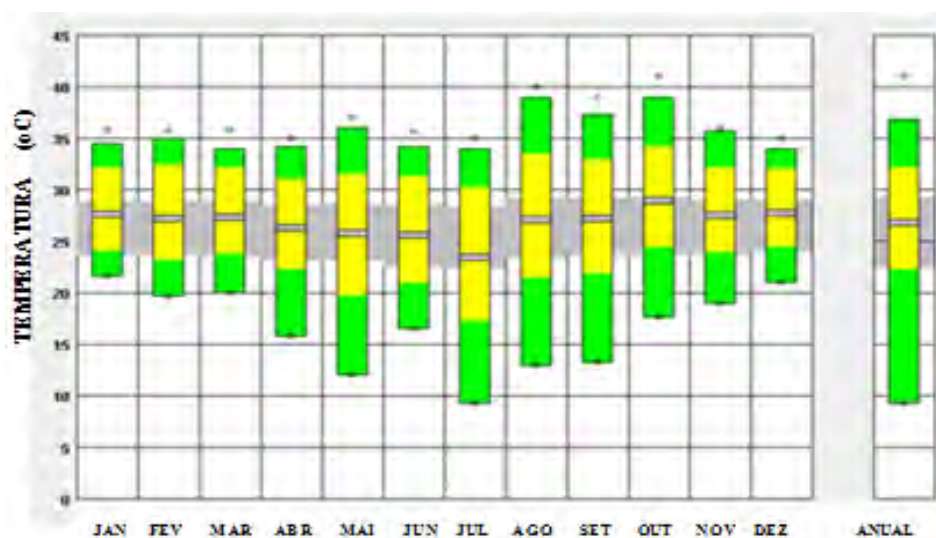
No primeiro, a temperatura mínima e máxima de conforto é de 20,3 a 26,7°C, respectivamente. No segundo, a faixa de conforto é expandida para os limites de 22,3 a 29,3°C. Entende-se por temperatura de projeto anuais as usadas para calcular a perda de calor e o ganho de calor dos edifícios, para fins de dimensionamento de equipamentos de aquecimento ou refrigeração. A temperatura mínima de projeto garante que ocorrem 0% das horas no arquivo climático com valores abaixo dessa temperatura. A temperatura máxima de projeto garante que apenas 1,0% ou 88 horas estão acima dessas temperaturas (ABNT, 2008).

Observa-se que a média mensal da temperatura de bulbo seco encontra-se acima da zona de conforto do PMV nos períodos do ano de janeiro a março e de agosto a dezembro, permanecendo na referida zona apenas nos meses de abril a julho. Já no modelo de conforto Adaptativo, a média mensal da temperatura de bulbo seco enquadra-se na zona de conforto em todos os meses do ano.

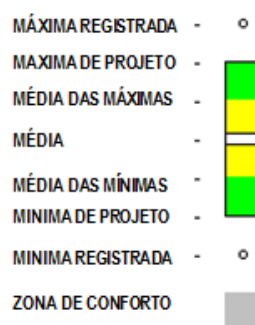
Esse enquadramento indica que é possível utilizar os edifícios, nestes períodos, de forma menos dependente do condicionamento térmico, se previstas nos projetos estratégias passivas de adequação da arquitetura ao clima.



a)



b)

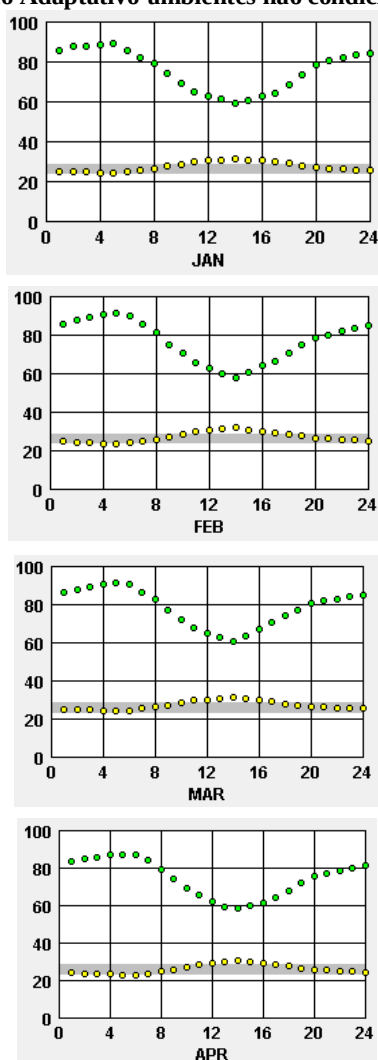


**Figura 16** – Diagnóstico climático da Temperatura de Bulbo Seco em Cuiabá/MT e zona de conforto para o modelo de conforto do PMV (a) e modelo de conforto Adaptativo (b)

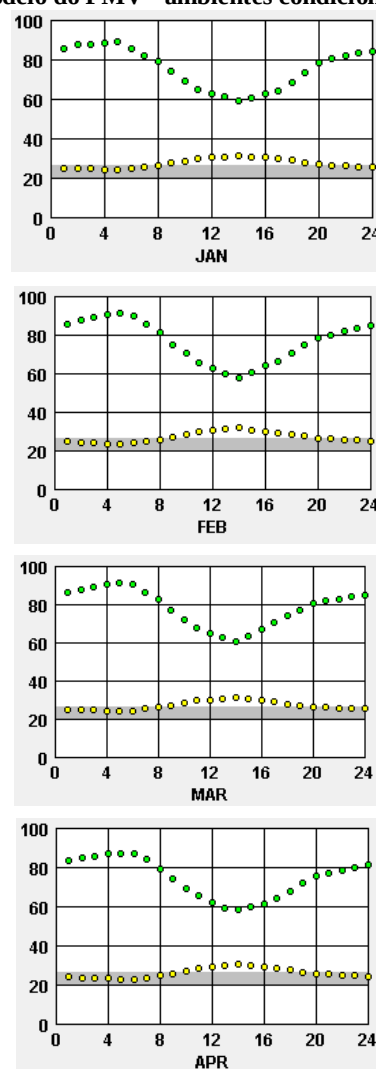
**Fonte:** Adaptado de Liggett e Milne, 2010.

Analisando as variáveis externas em termos de médias horárias, tem-se na Figura 17, a temperatura de bulbo seco (círculos amarelos) e umidade (círculos verdes), com as zonas de conforto térmico do modelo PMV (de 20,3 a 26,7°C) e Adaptativo (de 22,3 a 29,3°C), plotadas em um mesmo gráfico, conforme LIGGETT e MILNE (2010). Pode-se observar que, no período vespertino, a temperatura de bulbo seco fica sempre acima da zona de conforto, muito embora se saiba que a sensação de conforto não dependa só desta variável.

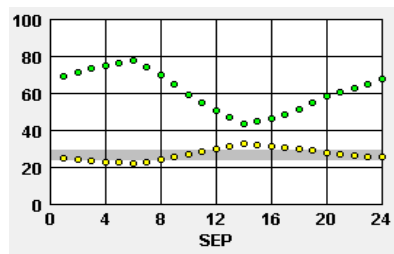
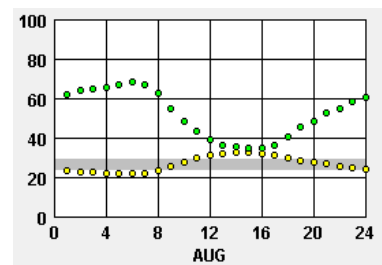
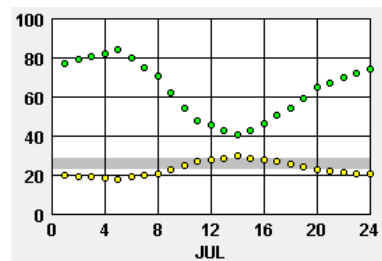
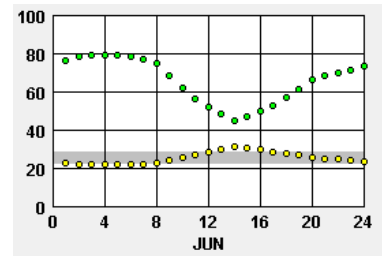
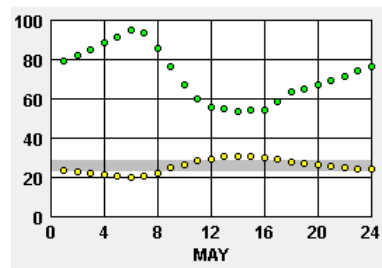
**Modelo Adaptativo-ambientes não condicionados**



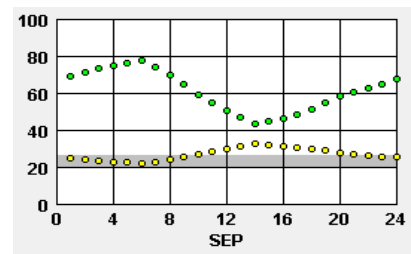
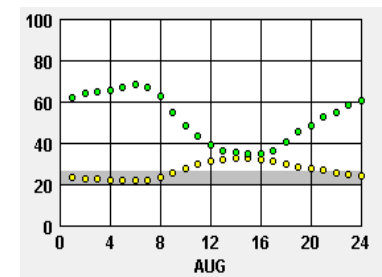
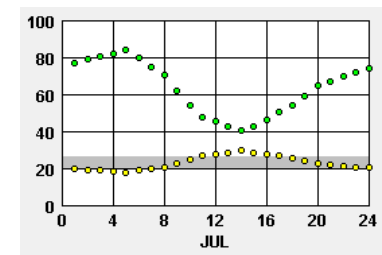
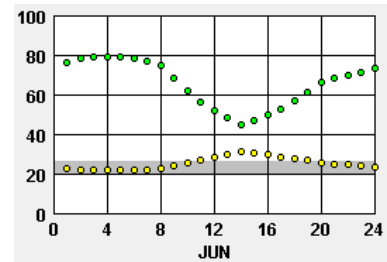
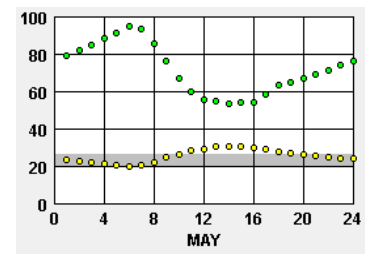
**Modelo do PMV - ambientes condicionados**

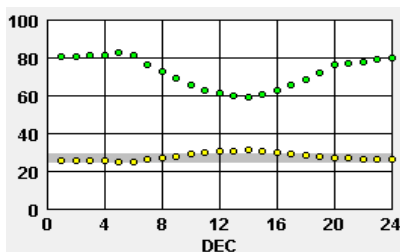
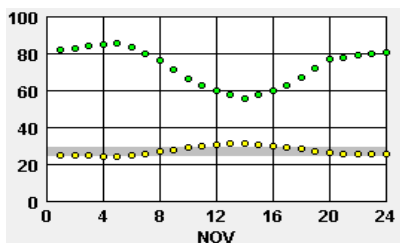
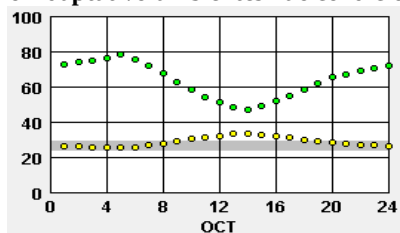


Modelo Adaptativo-ambientes não condicionados

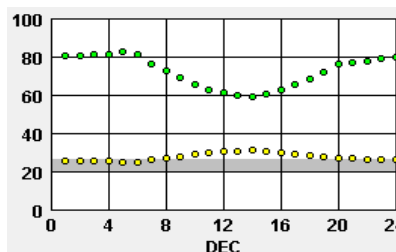
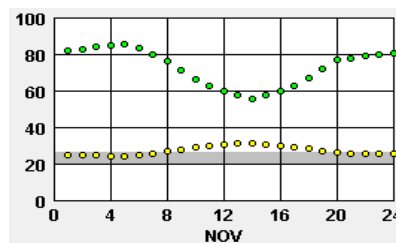
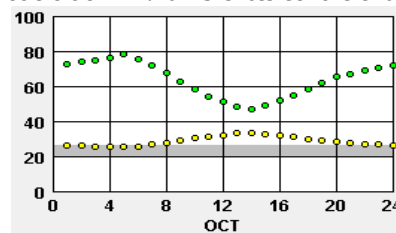


Modelo do PMV-ambientes condicionados

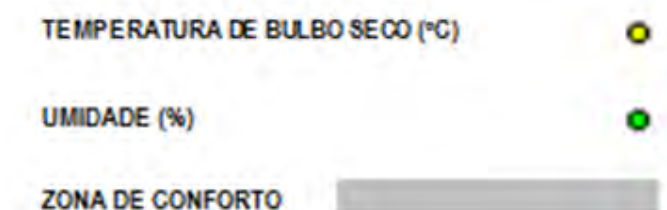


**Modelo Adaptativo-ambientes não condicionados**

a)

**Modelo do PMV-ambientes condicionados**

b)

**Figura 17** – Médias da temperatura de bulbo seco e umidade em Cuiabá/MT e as zona de conforto térmico do modelo Adaptativo (a) do PMV (b)**Fonte:** Adaptado de Liggett e Milne (2010)

Na prática, o que se tem nas edificações é a dependência total do sistema de condicionamento e iluminação artificiais, sendo a utilização do edifício restritamente permitida à disponibilização desses recursos.

Nas edificações escolares, isso também é uma tendência, tendo em vista a meta do governo estadual de suprir a totalidade das salas de aula com condicionamento artificial. As escolas que já possuem sistemas instalados procedem

por vedar as aberturas, por motivos de segurança e privacidade, privando a entrada da iluminação e ventilação naturais, o que leva à impossibilidade de funcionamento sem os sistemas artificiais.

Nesse sentido, esta pesquisa contribui com a necessária gestão de decisões de adequação da arquitetura ao clima, bem como com a construção do conhecimento acerca da produção arquitetônica escolar.

Diversos estudos já foram realizados na região com foco nas edificações escolares, tendo este, no entanto, objetivos que contemplam o diagnóstico aprofundado das variáveis de desempenho termo-energético de edificações escolares existentes e estabelecimento de um protocolo de medição detalhado. Além disso, a metodologia permite a extrapolação de resultados, sendo possível seu desenvolvimento e aplicação para outras variáveis distintas das estudadas.

Assim sendo, tendo em vista a forma de abordagem do problema e a significância de seu alcance, a pesquisa garante seu ineditismo e contribuição para as questões locais relacionadas à temática do conforto ambiental.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Papst (2004) cita que para análise de desempenho térmico de edificações, pode-se utilizar de medições ou de modelos matemáticos - teóricos ou derivados de dados experimentais -, e comenta as vantagens e desvantagens das duas abordagens:

*“As vantagens da utilização de modelos matemáticos para verificação do desempenho térmico são: (1) rapidez dos resultados; (2) possibilidade de análises paramétricas e (3) verificação de possíveis problemas antes da execução do projeto, permitindo alterar critérios construtivos para melhorar a eficiência energética e conforto dos ocupantes. As desvantagens dos modelos matemáticos podem estar associadas aos seguintes aspectos: (1) os dados do arquivo climático serem medidos em aeroportos e estações meteorológicas (muitas vezes não representam o micro-clima onde a edificação está inserida); (2) tanto o ano climático TRY (Test Reference Year) quanto o ano climático TMY (Typical Meteorological Year) utilizados para simulações, são dados de temperaturas de períodos amenos; (3) a maioria dos modelos teóricos não considera a influência da umidade do ar nos cálculos de transferências de calor; (4) à falta de conhecimento preciso das propriedades termo-físicas dos elementos construtivos do Brasil e por isso adota-se valores de pesquisas feitas em outros países; (5) à necessidade de aferição dos resultados obtidos com dados medidos, pois diferentes códigos computacionais analisando o desempenho térmico da mesma edificação, podem apresentar diferenças nos resultados finais.”*

As diferenças entre a modelagem e as medições são justificadas pela metodologia de cálculo de transferência de calor utilizada pelos modelos, sendo que estas aumentam em ambientes em uso, por causa das incertezas nas intervenções dos usuários no gerenciamento e na ocupação do ambiente.

No delineamento desta pesquisa, adotou-se a realização de medições locais e simulações matemáticas. As medições permitiram a calibração do modelo simulado e este, por sua vez, subsidiou a extrapolação de resultados para diferentes cenários que não apenas os medidos, possibilitando uma maior abrangência dos mesmos.

### **3.1. MATERIAIS**

#### **3.1.1. Local do estudo**

Este estudo consiste de uma extensão da pesquisa de DURANTE (2000), da qual mantém-se o universo amostral de edificações escolares ofertantes de ensino médio, da rede pública estadual, localizadas na zona urbana de Cuiabá/MT.

Para fins de atualização das amostras, foi feito com auxílio do Google Earth (GOOGLE, 2009) um levantamento expedito identificando nas imagens aéreas das 43 edificações escolares existentes - conforme SEDUC (2009) - as implantações semelhantes, determinando-se o número de três edificações. Doravante, essas escolas denominam-se por Escolas 1, 2 e 3, respectivamente, cuja numeração foi estabelecida em função da ordem crescente de distância das mesmas em relação ao centro urbano (Figura 18).

As três escolas estaduais selecionadas localizam-se nas regiões Centro Leste (Escola 1), Centro-Oeste (Escola 2) e Nordeste (Escola 3) e possuem as seguintes coordenadas geográficas no centro do pátio: Escola 1-  $56^{\circ}04'O$ ;  $15^{\circ}35'S$ , Escola 2-  $56^{\circ}07'O$ ;  $15^{\circ}35'S$  e Escola 3-  $53^{\circ}03'O$ ;  $15^{\circ}33'S$ .

Ressalta-se que, embora o projeto das três edificações seja idêntico, as mesmas diferem-se nos aspectos de orientação solar da fachada principal (azimute solar), altitude e topografia do terreno. As edificações das Escolas 1, 2 e 3 possuem fachada principal orientada a Noroeste, Nordeste e Sudeste, respectivamente (Tabela 9). A Escola 3 localiza-se em região de maior altitude (233m), seguida pelas Escolas 1 (197m) e 2 (179m).



**Figura 18** – Localização das escolas selecionadas para a pesquisa no perímetro urbano de Cuiabá

**Fonte:** Adaptado de Cuiabá (2007)

**Tabela 9** – Dados relativos à implantação e situação das escolas

| c | ALTITUDE<br>(m) | AZIMUTE SOLAR<br>DA FACHADA<br>PRINCIPAL | AZIMUTE SOLAR<br>DA FACHADA<br>SECUNDÁRIA |
|---|-----------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1 | 197             | 339°<br>(fachada NO)                     | 159°<br>(fachada SE)                      |
| 2 | 179             | 83°<br>(fachada NE)                      | 263°<br>(fachada SO)                      |
| 3 | 233             | 138°<br>(fachada SE)                     | 318°<br>(fachada NO)                      |

Com o intuito de quantificar exclusivamente a influência do sombreamento arbóreo nas condições termo-higrométricas dos ambientes internos, adotou-se como objetos de pesquisa edificações escolares com características semelhantes,

minimizando. Já a seleção dos ambientes para realização das medições teve como premissa a posição relativa do sombreamento arbóreo nas salas, tendo sido selecionadas salas com sombreamento arbóreo pela fachada secundária (dos fundos).

As amostras consistiram de duas salas de aula por edificação escolar, nas condições de exposição com e sem sombreamento arbóreo, conforme mostrado na Figura 19, em que se visualizam, também, as diferentes implantações das três edificações escolares, as salas que compuseram a amostra, codificadas com o número de cada escola (1, 2 ou 3) e conforme sua condição de exposição sem sombreamento (sl) e com sombreamento (sb).



**Figura 19** – Posição relativa das edificações e das salas sem sombreamento (sl) e na condição de sombreamento arbóreo (sb) nas Escolas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

**Fonte:** Adaptado de GOOGLE (2009)

O sombreamento das salas “2sb” e “3sb” provinha de um agrupamento de indivíduos arbóreos e da sala “1sb” era oriundo de um único indivíduo arbóreo.

Nas três escolas, a posição relativa das salas sem sombreamento (sl) e do pátio central foi idêntica.

Quanto às salas com sombreamento (sb), nas edificações das Escolas 2 e 3, a posição relativa das salas em relação à massa vegetada foi idêntica. Na Escola 1, por inexistência de massa vegetada e proximidade com um muro (Figura 20), optou-se

pela seleção de uma sala no mesmo bloco da sala exposta, porém em lado oposto da circulação central.



**Figura 20** – Muro da divisa dos fundos da Escola 1

Esta seleção caracterizou semelhança entre as amostras das salas “sb”, com sombreamento arbóreo pela fachada secundária e sem sombreamento arbóreo pela fachada principal. As salas 2sb e 3sb possuíam sombreamento por agrupamento de indivíduos arbóreos pela fachada secundária (dos fundos).

Considerou-se na seleção das salas apenas a existência das unidades arbóreas de sombreamento e nenhum aspecto de quantificação e qualificação das mesmas, como porte ou espécie.

Quanto à posição relativa no bloco, as salas da Escola 2 (sala 2sb e sala 2sl) eram alinhadas (ver Figura 19). Na Escola 3, a sala sombreada (sala 3sb) ocupou posição ligeiramente deslocada da sala sem sombreamento (sala 3sl), pelo fato de que a sala sombreada que era alinhada com a sala não sombreada não ter sido disponibilizada para a pesquisa, pois seu uso não se destinava à sala de aula.

### **3.1.2. Caracterização dos objetos de estudo**

Realizou-se o levantamento arquitetônico *as built* das escolas a partir das plantas disponibilizadas pela SEDUC-MT, fazendo-se as devidas atualizações e correções necessárias.

As edificações das três escolas possuem plantas e sistemas construtivos idênticos, diferenciando-se entre si por pequenas adaptações feitas para adequação às necessidades de cada unidade escolar ao longo da ocupação. Caracterizam-se por blocos horizontais de salas de aula, distribuídos à esquerda e direita de uma circulação central que se inicia no acesso principal da escola. Entre os blocos, formam-se espaços livres e há um pátio central principal entre o primeiro e segundo blocos à direita da circulação central.

O sistema estrutural é em concreto armado, com pórticos a cada 3,00m portando balanços de 1,25m. Esses balanços formam beirais que desempenham a função de circulação coberta para as salas (Figura 21).



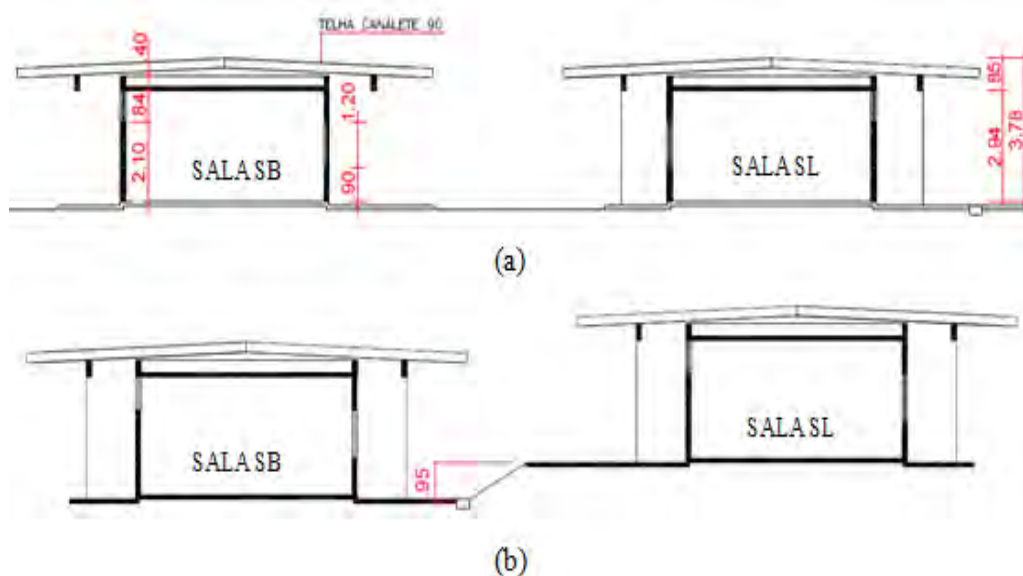
**Figura 21** – Circulação externa na lateral das salas constituída pelo beiral

As salas medem 6,0x8,0m, possuem forro em laje com pé-direito de 2,9m. São providas de iluminação natural oriundas das janelas de peitoris baixos (0,90m) e altos (2,10m) nas paredes laterais (Figura 22).

Nos cortes esquemáticos apresenta-se a altura total das edificações de 3,78m e o desnível existente de 0,95m entre os blocos da Escola 2 (Figura 23). Os vãos das telhas de fibrocimento Canalete 90 no sentido longitudinal permitem a ventilação do ático. As janelas baixas e altas possuem peitoris de 0,90 e 2,10m, com alturas de 0,84 e 1,20m, respectivamente.



**Figura 22** – Interior das salas de aula com iluminação lateral por janelas baixas e altas



**Figura 23** – Corte esquemático das Escolas 1 e 3 (a) e Escola 2, com desnível de 1,00m entre blocos (b)

As alvenarias são de bloco cerâmico de oito furos rebocados em ambas as faces, cobertura em telha de fibrocimento, modelo Canaleta 90, espessura de 8mm, forro em laje, esquadrias de chapa metálica com vidros 4mm e piso em granilite. Os valores adotados para as propriedades termo físicas dos materiais construtivos e cores são os relacionados nas especificações das Tabelas 10 e 11, respectivamente.

**Tabela 10** – Materiais construtivos e características técnicas

| ELEMENTO CONSTRUTIVO  | MATERIAL               | e (mm) | d (Kg <sup>m</sup> <sup>-2</sup> )                           | c (J°C <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> ) | γ (Wm <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ) |
|-----------------------|------------------------|--------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| Fechamentos verticais | Argamassa              | 25     | 2000                                                         | 1000                                    | 1,15                                   |
|                       | Tijolo                 | 100    | 1600                                                         | 920                                     | 0,90                                   |
|                       | Argamassa              | 25     | 2000                                                         | 1000                                    | 1,15                                   |
| Laje de forro         | Concreto               | 100    | 2200                                                         | 1000                                    | 1,75                                   |
| Porta                 | Chapa de aço           | 3      | 7800                                                         | 450                                     | 50                                     |
| Janela                | Vidro                  | 6      | 2500                                                         | 840                                     | 1,00                                   |
| Cobertura             | Fibrocimento           | 8      | 1900                                                         | 840                                     | 0,95                                   |
|                       | Câmara de ar ventilada | 250    | Resistência térmica de 0,21 m <sup>2</sup> °CW <sup>-1</sup> |                                         |                                        |

Onde: e = espessura; d = densidade; c = calor específico e γ = condutividade térmica

Fonte: Lambert et al. (2011)

**Tabela 11** – Cores das paredes externas e internas

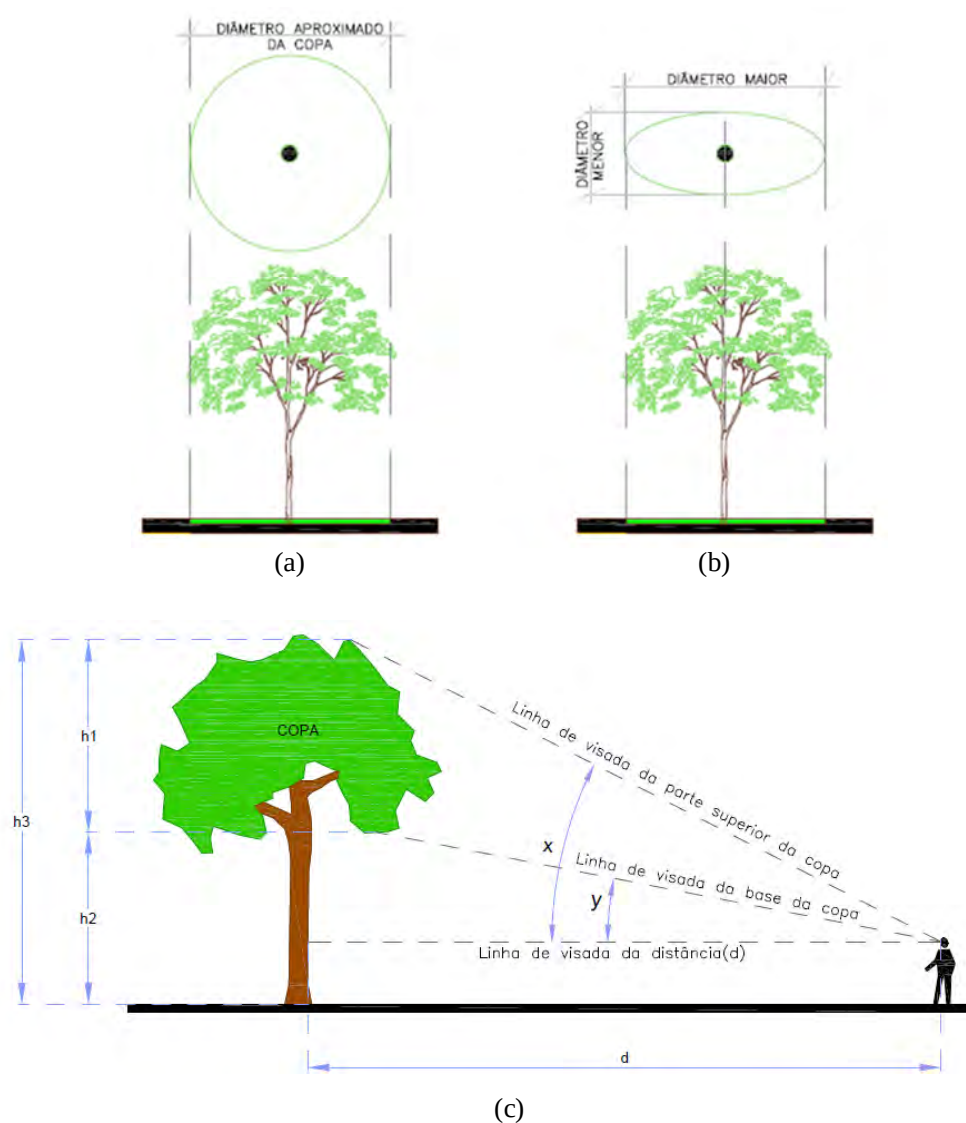
| ESCOLA | PAREDE INTERNA                               | PAREDE EXTERNA                                    | TETO   | PISO        | ESQUADRIAS    |
|--------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------|-------------|---------------|
| 1      | Amarelo claro                                | Amarelo médio com barrado de 1,5m cor de cerâmica | branco | Cinza claro | Grafite       |
| 2      | Rosa médio                                   | Rosa médio                                        | branco | Cinza claro | Marrom escuro |
| 3      | Branco com barrado de 1,5m cor amarelo médio | Amarelo médio                                     | branco | Cinza claro | Vermelho      |

A fim de caracterizar a arborização de sombreamento das salas em cada escola, realizou-se um inventário no qual foram identificadas e quantificadas as espécies arbóreas existentes, conforme metodologia proposta por Oliveira (2011): localização das espécies, nomes comuns e científicos, altura das árvores, das copas e fustes e diâmetros das copas. Paralelamente ao inventário proposto, realizou-se levantamento fotográfico e extração de amostras de folhas e flores. A identificação das espécies se deu por meio de bibliografia especializada da flora arbórea brasileira, tais como Lorenzi (2002), Lorenzi et al.(2003), Lorenzi et al. (2004) e por meio do site ARVORESBRAZIL (2010), constando a caracterização das mesmas do Anexo 1.

Levantou-se a projeção e altura da copa e a posição relativa da vegetação de sombreamento em relação às salas avaliadas. A projeção da copa foi medida no solo

como o diâmetro da árvore, em caso de projeção circular (Figura 24-a), e como média dos diâmetros maior e menor, em caso de projeção assimétrica (Figura 24-b).

A altura do fuste ( $h_2$ ) e da copa ( $h_1$ ) foi obtida com um clinômetro da seguinte forma: posicionou-se a uma distância adequada para visualizar a altura total da árvore, tomando-se a distância deste ponto até a mesma ( $d$ ). Em seguida, foram visados os ângulos  $x$  e  $y$  com um clinômetro. De posse destas medidas, determinou-se trigonometricamente as referidas alturas (Figura 24-c).



**Figura 24** – Projeção de copa esférica (a), elipsoidal (b) e representação esquemática do procedimento de determinação da altura das árvores (c)

**Fonte:** SANTANA (2011)

Fez-se o inventário das unidades arbóreas sob as quais foram realizadas as medições e das unidades próximas à elas, no caso da Escola 1, ou que constituíam o agrupamento, no caso das Escolas 2 e 3. A caracterização das espécies encontra-se no Anexo 2.

O inventário traz a identificação das espécies, projeção da copa e altura (Tabela 12). A identificação das unidades arbóreas foi feita pelo número da escola (1, 2 ou 3) seguido por um número de identificação da árvore. Na Escola 1, têm-se as unidades arbóreas de número 29 e 31. Na Escola 2, tem-se a de número 01 e 87 e na Escola 3, a de número 10. Na Tabela 13 são apresentadas as posições das unidades arbóreas relativamente às fachadas das três salas.

**Tabela 12** – Inventário das unidades arbóreas de sombreamento (UA) das salas

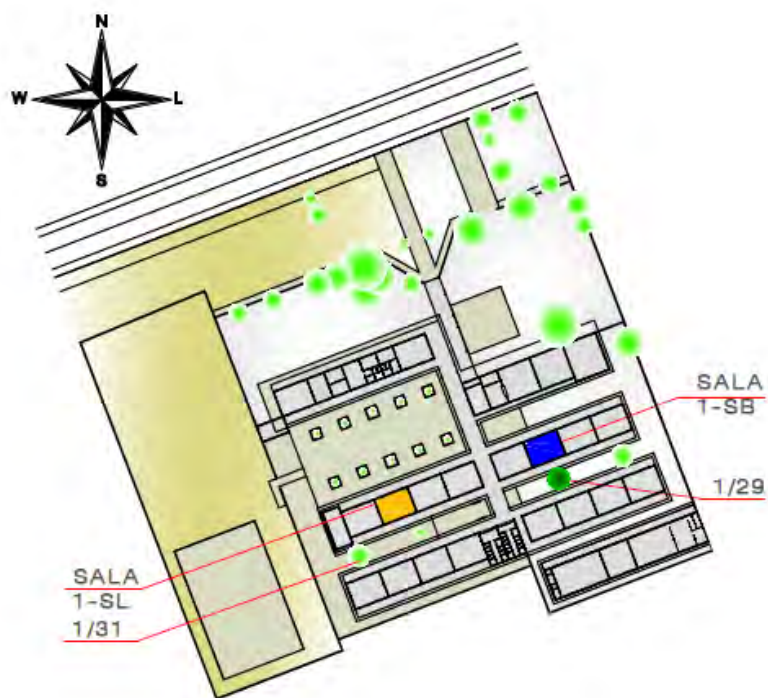
| ESCOLA/<br>UA | ESPÉCIE/ FAMÍLIA                                      | NOME<br>POPULAR | PROJEÇÃO<br>DA COPA<br>(m) | ALTURA (m) |       |      |
|---------------|-------------------------------------------------------|-----------------|----------------------------|------------|-------|------|
|               |                                                       |                 |                            | TOTAL      | FUSTE | COPA |
| 1/29          | <i>Ficus benjamina</i> Linn /<br><i>Moraceae</i>      | Ficus           | 4,0                        | 4,14       | 2,45  | 1,70 |
| 1/31          | <i>Ficus benjamina</i> Linn /<br><i>Moraceae</i>      | Ficus           | 2,0                        | 4,16       | 2,15  | 2,01 |
| 2/01          | <i>Mangifera indica</i>                               | Mangueira       | 10,0                       | 10,00      | 2,79  | 7,21 |
| 2/87          | <i>Mangifera indica</i>                               | Mangueira       | 11,0                       | 10,89      | 3,52  | 7,38 |
| 3/10          | <i>Licania tomentosa</i> /<br><i>Chrysobalanaceae</i> | Oiti            | 12,7                       | 12,04      | 3,98  | 8,06 |

**Tabela 13** – Posições relativas das unidades arbóreas de sombreamento

| UNIDADE ARBÓREA (UA)              | ESCOLA |      |      |
|-----------------------------------|--------|------|------|
|                                   | 1      | 2    | 3    |
| Identificação das UA medidas      | 29     | 87   | 10   |
| Dimensão paralela à fachada (m)   | 5,0    | 11,0 | 11,8 |
| Dimensão perpendicular à fachada  | 5,0    | 11,0 | 12,0 |
| Distância do tronco à fachada (m) | 6,0    | 5,0  | 6,0  |

A vegetação dos pátios foi levantada em número de 31, 94 e 29 unidades arbóreas nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente, representadas nas Figuras 31-a, 31-b e 31-c, nas quais contam as salas pesquisadas (sb=sala com sombreamento arbóreo e sl=sala sem sombreamento arbóreo) e as unidades arbóreas sob as quais realizaram-se as medições destacadas em verde escuro. Identificou-se, também, o uso e

ocupação do solo nas três escolas, em termos de áreas construída, pavimentada e verde e o solo nu, conforme legenda da Figura 25.



(a)

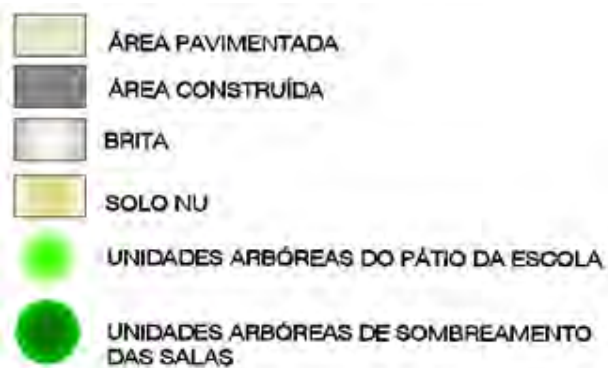


(b)



**Figura 25** – Uso e ocupação do solo na Escola 1 (a), Escola 2 (b) e Escola 3 (c)

Onde:



### 3.1.3. Equipamentos de medição

Utilizaram-se sensores com datalogger marca HOBO U12-013 (Figura 26-a), em um total de trinta unidades, que registra temperatura na faixa de  $-20$  a  $70^{\circ}\text{C}$ , umidade relativa de 5 a 95% e iluminância de 10 a 32.280lux. O equipamento disponibiliza um canal externo, o qual foi utilizado para medição de temperatura, por meio do cabo TMC20HD, com sensor na faixa de utilização de  $-20$  a  $+70^{\circ}\text{C}$  (Figura 26-b), em número total de trinta unidades.



a)



b)

**Figura 26** - Sensor HOBO U12-012 de temperatura de bulbo seco do ar, umidade relativa do ar e iluminância (a) e cabo TMC20HD com sensor de temperatura (b)

A iluminância externa foi medida com sensor HOBO UA002-64 (Figura 27-a), cuja faixa de medição é de 0 a 320.000lux. Foram utilizados seis desses sensores.

O IAF foi medido por meio do equipamento Ceptômetro de Barra, modelo LP-80 AccuPAR, Decagron Devices (Figura 27-b), que mede a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) na faixa de 0 a  $2,500 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Pode ser operado em condições de 0 a  $50^{\circ}\text{C}$  de temperatura e de 0 a 100% de umidade relativa. Também calcula o IAF automaticamente, de forma não destrutiva.

A radiação solar global foi coletada na estação seca por meio de uma estação micrometeorológica automática Vantage Pro 2 Plus marca Davis Instruments (Figura

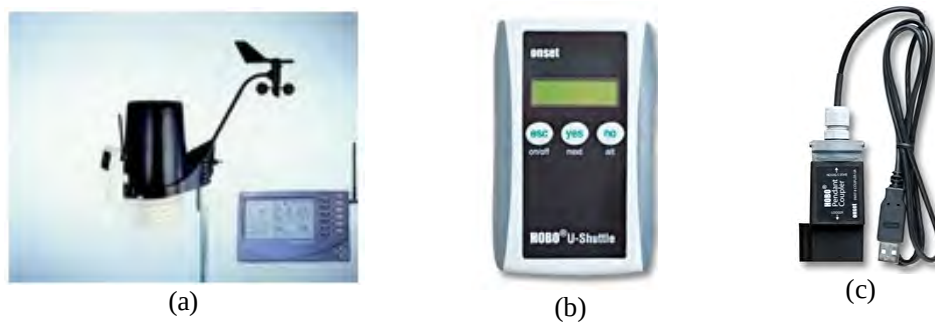
28-a). Na estação chuvosa, por questões de segurança dos equipamentos, optou-se por utilizar dados secundários de radiação de Callejas (2011).



**Figura 27** – Sensor HOBO UA002-64 de iluminância externa (a) e Ceptômetro de Barra (b)

Para transporte de dados utilizou-se um HOBO U-SHUTTLE (Figura 28-b) para transferência de dados dos HOBO U12-013 e uma base óptica do tipo Base U1, Optic USB Base Station for Pendant (Figura 28-c), para transferência de dados dos HOBO UA002-64.

Todos os equipamentos utilizados nesta pesquisa estavam devidamente calibrados de fábrica, com exceção da estação meteorológica, calibrada em laboratório com outros sensores de maior acurácia.



**Figura 28** – Estação micrometeorológica automática Vantage Pro 2 Plus (a), transportador de dados HOBO-U-SHUTTLE (b) e Optic USB Base Station Pendant (c)

## **3.2. MÉTODO**

### **3.2.1. Variáveis da pesquisa e condições internas de medição**

Para estudo do desempenho termoenergético das edificações escolares de acordo com os objetivos propostos, foram definidas variáveis da pesquisa relativas às condições ambientais internas e externas às salas de aula.

As variáveis internas da edificação foram temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, temperatura de globo, iluminância, temperatura superficial das paredes nas faces interna e externa e temperatura superficial interna do forro das salas. As variáveis externas foram a temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar e temperatura de globo ao sol e à sombra de unidades arbóreas, iluminância ao sol e à sombra, radiação solar global e índice de área foliar (IAF) das unidades arbóreas de sombreamento das salas de aula.

Este conjunto de variáveis permitiu a avaliação do comportamento das unidades amostrais compostas pelas salas de aula nas diferentes condições propostas pelo estudo: com e sem sombreamento arbóreo. Permitiu, também a análise do microclima em que os objetos de estudo se inserem e a quantificação de sua influência no desempenho termoenergético das edificações escolares estudadas.

Optou-se por realizar as medidas com as salas desocupadas, justificado pelo fato de que a ocupação, embora influencie decisivamente nas condições ambientais internas das salas, não permitiria a instalação dos equipamentos, pois ocorreriam problemas funcionais que colocariam em risco a integridade e segurança dos mesmos. Além disso, as salas desocupadas permitiram que as variáveis iluminação e ventilação natural fossem controladas, o que foi de encontro à premissa da pesquisa de que as diferenças nas condições ambientais encontradas entre as salas expostas e sombreadas eram devidas, exclusivamente, às distintas condições de sombreamento.

### **3.2.2. Período de realização das medições**

As medições foram realizadas em duas etapas, sendo uma na estação seca, em julho/2010, e outra na estação chuvosa, em dezembro/2010 e janeiro/2011.

No período de 19 a 26/07/2010 (estação seca), efetuaram-se medições das seguintes variáveis, nas Escolas 1 e 2:

- a) temperatura de bulbo seco, umidade do ar e temperatura de globo externamente ao sol e à sombra de unidades arbóreas;
- b) temperatura de bulbo seco, umidade do ar, temperatura de globo, e iluminância no centro das salas;
- c) temperatura superficial das paredes internas e externas das fachadas principal e secundária, temperatura do forro e telha de fibrocimento pela face interna e pavimentação externa (piso de concreto).

No período de 11/12/2101 a 23/01/2011 (estação chuvosa), efetuaram-se medições das seguintes variáveis, nas Escolas 1, 2 e 3 e conforme a simultaneidade da Tabela 14:

- a) temperatura de bulbo seco, umidade do ar, temperatura de globo e iluminância externamente ao sol e à sombra de unidades arbóreas;
- b) temperatura de bulbo seco, umidade do ar, temperatura de globo, e iluminância no centro das salas;
- c) temperatura superficial das paredes internas e externas das fachadas principal e secundária, temperatura do forro pela face interna.

Foram também realizadas medições preliminares em maio/2010, cujos resultados subsidiaram o planejamento e a tomada de decisões da instrumentação final, apresentadas no Anexo 2.

**Tabela 14** – Simultaneidade das medições nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa

| ESCOLAS  | 11/12 a<br>16/12/2011 | 29/12/2010 a<br>05/01/2011 | 06/01 a<br>17/01/2011 | 18/01/2011 a<br>23/01/2011 |
|----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Escola 1 |                       | X                          | X                     | X                          |
| Escola 2 | X                     | X                          | X                     |                            |
| Escola 3 |                       | X                          |                       | X                          |

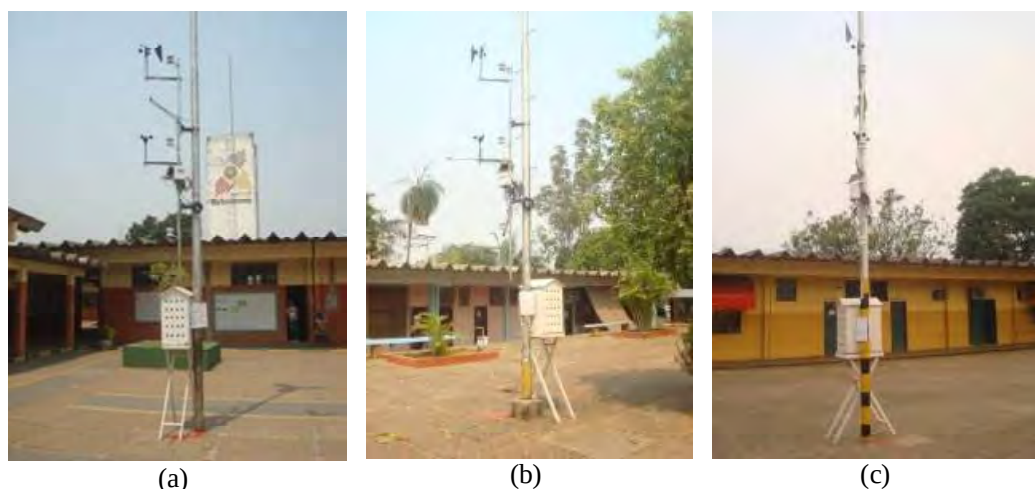
As medições do IAF foram feitas em outubro/2010, com início às 11h15min e término às 12h20min do dia 27/10/2010, na Escola 1; das 11h30min às 13h30min do dia 29/10/2010, na Escola 2 e das 12h30min às 13h30min do dia 28/10/2011, na Escola 3.

### 3.2.3. Instrumentação

Em cada escola instalou-se um abrigo termométrico a céu aberto (no centro dos pátios) e à sombra (sob a copa de uma unidade arbórea). A Figura 29 apresenta o abrigo termométrico e a estação micrometeorológica portátil, na coleta da estação seca, nas Escolas 1 e 2, e a Figura 30, apresenta os abrigos meteorológicos e as estações micrometeorológicas instaladas nos postes para coleta de radiação solar global, da qual se tomou os dados secundários, na estação chuvosa.



**Figura 29** – Abrigos termométricos e estações meteorológicas portáteis instalados no sol (centro dos pátios) da Escola 1 (a), Escola 2 (b), estação seca

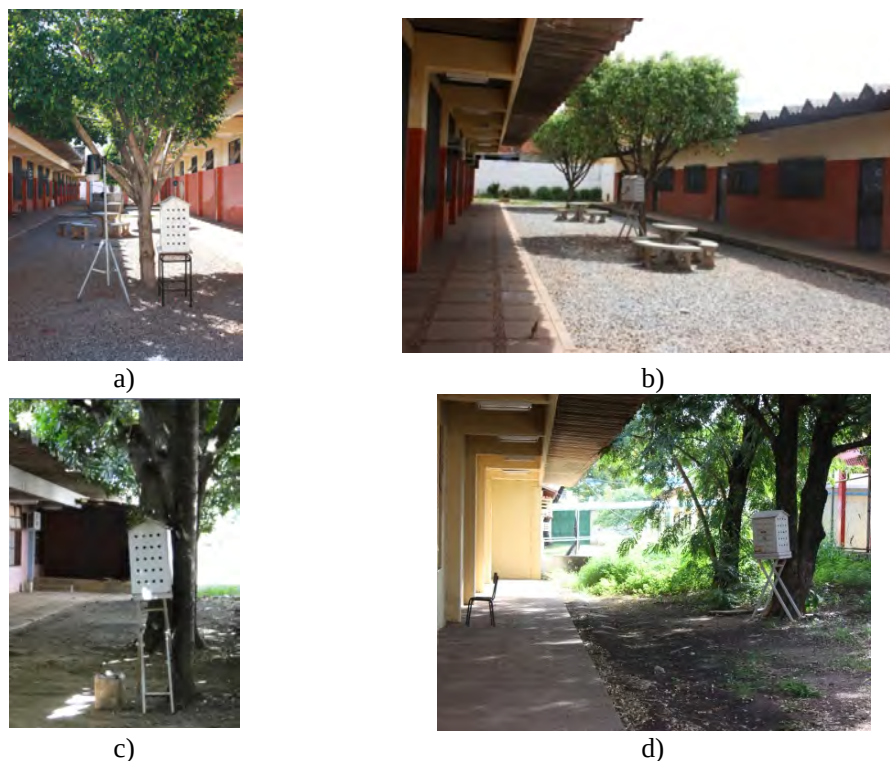


**Figura 30** – Abrigos meteorológicos instalados no sol (centro dos pátios) da Escola 1 (a), Escola 2 (b) e Escola 3 (c), estação chuvosa

Na estação seca, os abrigos foram instalados sob um Ficus (*Ficus benjamina*) na Escola 1 (Figura 31-a) e uma Mangueira (*Mangifera indica*) na Escola 2. O critério de escolha dessas árvores foi o porte e a proximidade com a sala de aula.

Na estação chuvosa, a escolha dos locais para a instalação do abrigo da sombra condicionou-se às salas “sb” selecionadas para medição, de forma que na Escola 1, o mesmo foi instalado sob o único indivíduo arbóreo de sombreamento da sala 1sb. Já nas Escolas 2 e 3, como a vegetação de sombreamento constituía-se um agrupamento de indivíduos arbóreos, foi possível escolher um local representativo do sombreamento, respeitando-se o alinhamento com a sala de aula avaliada.

Os abrigos termométricos da sombra foram instalados sob espécies arbóreas distintas, pois não havia indivíduos de mesma espécie nos locais de sombra. Na estação chuvosa foram instalados sob um Ficus (*Ficus benjamina*) na Escola 1, uma Mangueira (*Mangifera indica*) na Escola 2 e um Oiti (*Licania tomentosa*) na Escola 3 (Figuras 31-b, 31-c e 31-d).



**Figura 31** - Abrigo termométrico e estação meteorológica portátil sob a copa de Ficus na Escola 1, estação seca (a) e estação chuvosa (b); sob a copa de Mangueira na Escola 2, estação chuvosa (c) e sob a copa de Oiti na Escola 3, estação chuvosa (d)

A temperatura de bulbo seco externa ( $T_e$ , em  $^{\circ}\text{C}$ ) e a umidade relativa do ar externa ( $U_e$ , em %) foram medidas com datalogger marca HOBO U12-013 disposto no interior de abrigo termométrico, em cujo canal externo foi monitorado a temperatura de globo ( $T_{Ge}$ , em  $^{\circ}\text{C}$ ) utilizando-se uma esfera de plástico de 2,5” de diâmetro, fixada em suporte na parte superior do abrigo, conforme proposto por Souza et al (2002). As Figuras 32-a e 32-b apresentam o HOBO no interior do abrigo termométrico e a fixação da esfera para obtenção da temperatura de globo.



**Figura 32** – Detalhe da instalação do HOBOT no interior do abrigo meteorológico (a);  
Detalhe da instalação da esfera para medição da temperatura de globo

A iluminância externa foi medida com o sensor HOBOT UA002-64, instalado na posição horizontal e fixado nos abrigos termométricos do pátio e da sombra (Figura 33).



**Figura 33** – Sensor HOBOT UA002-64 de iluminância externa fixado em posição horizontal em abrigo meteorológico

O método para medição do IAF por meio do equipamento Ceptômetro de Barra modelo LP-80 AccuPAR, Decagron Devices, consiste da medição da radiação solar global, seguida de quatro medições da radiação à sombra da copa da unidade arbórea (Figuras 34-a e 34-b), após o que se lê diretamente o IAF. Os horários de

medição devem ser com altura de sol próxima a 90º, tendo sido, portanto, efetuadas próximo ao meio-dia.



**Figura 34** - Procedimento de medição da radiação solar global, a céu aberto (a) e em quatro quadrantes sob a copa da unidade arbórea (b)

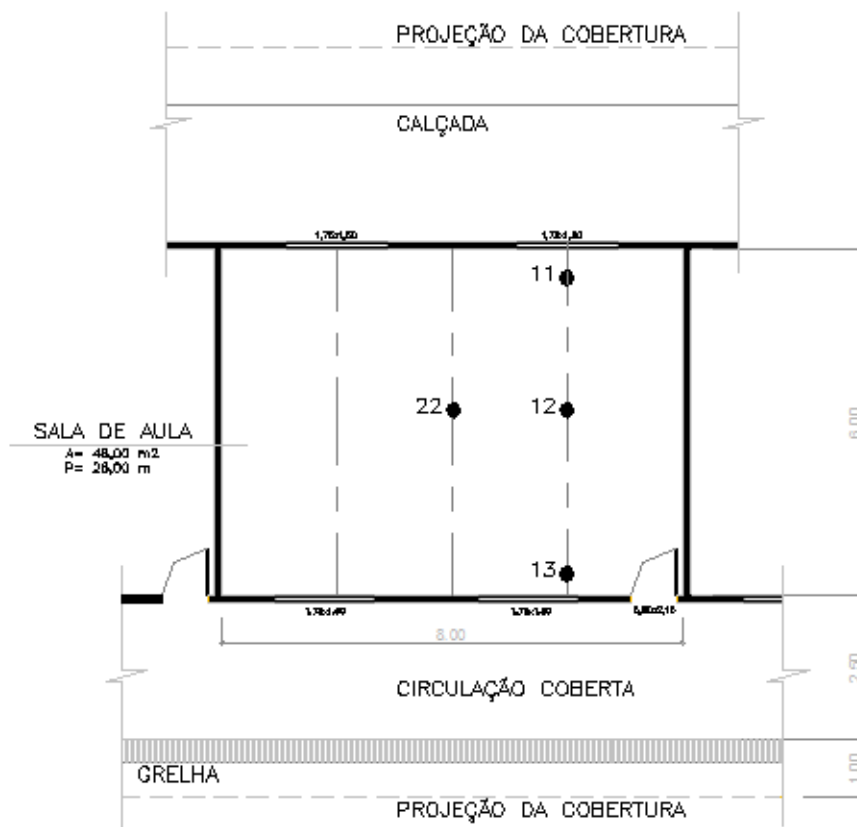
No interior das salas, os pontos de medição foram dispostos em uma malha de 1x3m, alinhada com a janela da frente da sala. Além desses, foi medido no centro da sala a temperatura, a iluminância, a umidade e a temperatura de globo constituindo quatro pontos de medição em cada sala.

Adotou-se uma nomenclatura para todas as salas, na qual a linha da malha de medição assumiu valores de 1 ou 2 e a coluna, de 1, 2 ou 3, conforme a posição do sensor no lado esquerdo (13), central (12) ou direito da sala (11), conforme Figura 35. A posição do centro foi denominada de posição 22.

O intervalo de medição foi padronizado em cinco minutos, considerado como intervalo ideal para a pesquisa, de forma de que não se obtivesse número excessivo de dados e pudessem ser monitoradas alterações súbitas nas condições ambientais. Todos os equipamentos foram sincronizados.

As variáveis temperatura de bulbo seco ( $T_i$ ), umidade relativa do ar ( $U_i$ ), iluminância ( $E_i$ ) e temperatura superficial ( $T_{Si}$ ) internas foram medidas com

datalogger marca HOBO U-12-012. No canal externo, do sensor do centro da sala, (posição de medição 22) foi acoplado o cabo modelo TMC20HD para medição da temperatura de globo (TGi) utilizando-se uma esfera de plástico de 2,5” de diâmetro.



**Figura 35** - Relação entre posição e nomenclatura dos pontos de medição

Nos canais externos foram acoplados cabos TMC20HD para medição das temperaturas superficiais (TSe) das paredes externas (posição 31 e posição 33) e das temperaturas superficiais das paredes internas (TSi) (posições 21 e 23) (Figuras 36-a e 36-b).



(a)



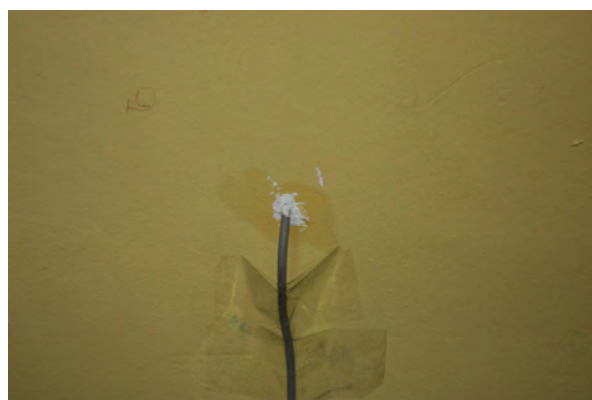
(b)

**Figura 36** – Cabo TMC20HD com sensor para medição de temperatura superficial nas paredes externas proteção com tubo de 100mm de diâmetro cortado ao meio (a) e detalhe da fixação na parede (b)

Para medição da temperatura superficial da parede interna (Figura 37-a e 37-b) e do forro adotou-se o mesmo procedimento, porém, foi dispensada a proteção da radiação. A altura de medição nas paredes internas foi de 90 cm, que corresponde à altura do tórax de um aluno sentado em carteira escolar.



(a)



(b)

**Figura 37** – Fixação do cabo TMC20HD com sensor para medição de temperatura superficial das paredes internas (a); detalhe da vedação do sensor com pasta térmica (b)

### **3.2.4. Método para análise dos resultados**

Apresenta-se, a seguir, o método detalhado para a obtenção de cada um dos objetivos específicos da pesquisa.

#### *3.2.4.1. Método para análise das relações entre o sombreamento arbóreo e condições termo-higrométricas dos pátios escolares*

Para estudo do microclima dos pátios e a identificação da influência do sombreamento nas condições termo-higrométricas ao sol e à sombra, apresentaram-se os resultados das medições em termos de máxima, média e mínima diárias e marcha horária de temperatura do ar e umidade relativa, ao sol e à sombra, para as estações seca (de 19 a 26/07/2010, nas Escolas 1 e 2) e chuvosa (de 11 a 16/12/2010, na Escola 2 e de 29/12/2010 a 23/01/2011, nas Escolas 1, 2 e 3).

Para determinação das atenuações da temperatura proporcionadas pelas unidades arbóreas de sombreamento, foram analisadas as variações relativas dos parâmetros ambientais proporcionadas pelos indivíduos arbóreos e suas características fenológicas, como porte, área foliar total (AFT) e índice de área foliar (IAF).

Sendo as temperaturas externas das três escolas são diferentes, como recurso de normalização, utilizou-se o conceito matemático de variação relativa, que advém do conceito de variação absoluta, definida como a diferença entre os valores inicial e final de uma grandeza.

A variação relativa ou taxa de variação é obtida por comparação da variação absoluta com o valor inicial, geralmente expresso em porcentagem. A variação relativa é, então, a atenuação ou acréscimo na temperatura do ar e umidade relativa do ar ao sol e à sombra, tomando como parâmetro de normalização o valor ao sol, conforme as Equações 5 e 6.

Este conceito também foi utilizado por Bueno-Bartolomei e Labaki (2003) aplicado à variável radiação solar e por Ayres et al. (2004), aplicado à temperatura.

$$VR_T = \frac{T_{sl} - T_{sb}}{T_{sl}} \cdot 100 \text{ (%) ..... Equação 5}$$

Onde:

VR<sub>T</sub>: variação relativa das médias horárias de temperatura ao sol e à sombra;

T<sub>sl</sub>: médias horárias da temperatura do ar ao sol (°C);

T<sub>sb</sub>: médias horárias da temperatura do ar sob a copa do indivíduo arbóreo (°C).

$$VR_{UR} = \frac{UR_{sb} - UR_{sl}}{UR_{sb}} \cdot 100 \text{ (%) ..... Equação 6}$$

Onde:

VR<sub>U</sub>: variação relativa das médias horárias de umidade relativa ao sol e à sombra;

U<sub>sl</sub>: médias horárias da umidade relativa do ar ao sol (%);

U<sub>sb</sub>: médias horárias da umidade relativa do ar sob a copa do indivíduo arbóreo (%).

A análise das condições termo-higrométricas externas também foi feita considerando-se a umidade absoluta, foi calculada conforme COX (2008), aplicando-se as Equações 7 a 9.

$$e_s = 610,78 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T(^{\circ}C)}{237,3 + T(^{\circ}C)}} \text{ (mbar) ..... Equação 7}$$

$$UR = \frac{e_{ar}}{e_s} \cdot 100 \text{ (%) ..... Equação 8}$$

$$UA = \frac{217 \cdot e_{ar}}{T(K)} \text{ (g.m}^{-3}\text{) ..... Equação 9}$$

Onde:

$e_s$ : pressão de saturação de vapor de água no ar (mbar);

$T(^{\circ}\text{C})$ : temperatura de bulbo seco ( $^{\circ}\text{C}$ );

$e_{ar}$ : pressão de vapor de água no ar (mbar);

UR: umidade relativa do ar (%);

$T(\text{K})$ : temperatura de bulbo seco (K);

UA: umidade absoluta do ar ( $\text{g.m}^{-3}$ )

Para análise das relações entre o sombreamento arbóreo e os microclimas dos pátios, identificaram-se o uso e a ocupação do solo nas plantas de implantação das três escolas, fazendo-se constar as áreas construídas e os diferentes tipos de revestimentos do solo (solo nu, brita, pavimentação externa e área construída).

#### 3.2.4.2. Método para análise do desempenho termo-lumínico das salas

A incidência de radiação solar direta nos vedos contribui para o aquecimento no interior das salas. Desta forma, para identificar os dias e horas de insolação em cada fechamento, segundo sua orientação, calculou-se os ângulos de sombra frontal vertical, frontal lateral e horizontal e elaboraram-se as máscaras solares devidos aos elementos da própria edificação e às obstruções externas, conforme referencial teórico de Frota e Schiffer (1995).

Após este levantamento, foi possível analisar a influência das eventuais diferenças de implantação dos prédios das três escolas devido a orientação solar, na temperatura superficial dos fechamentos verticais e nos ganhos térmicos das salas.

A avaliação dos impactos do sombreamento arbóreo das salas nas variáveis ambientais foi adotada a metodologia da NBR 15575 (ABNT, 2008), que estabelece em seu Procedimento 3, para a avaliação em edificações já construídas, que seja

tomado um dia típico de projeto, de verão ou de inverno. Recomenda trabalhar com uma sequência de três dias e analisar os dados do terceiro dia, observando a proximidade das amplitudes térmicas e temperaturas externas. Para efeito da avaliação por medição, o dia típico é caracterizado unicamente pelos valores da temperatura do ar exterior medidos no local.

Assim sendo, selecionou-se o dia 24/07/2010, dentre o período de medição de 19 a 26/07/2010, para análise das salas das Escolas 1 e 2, na estação seca. Na estação chuvosa, selecionou-se o dia 17/01/2011, dentre o período de medição de 11 a 17/01/2010, para análise das salas da Escola 2. O dia 02/01/2011 foi selecionado para análise das salas das três escolas medidas simultaneamente.

Apresentou-se a marcha horária dos resultados das medições dos parâmetros medidos em gráficos comparativos das salas “sl” e “sb” das três escolas, e para os dias típicos apresentou-se gráficos nas condições com e sem sombreamento arbóreo de:

- a) Marcha horária de temperatura e umidade relativa do ar das salas, nas quais se verificou a variação relativa entre as salas sombreadas e expostas;
- b) Distribuição da temperatura do ar e iluminância no plano de trabalho, expressa em termos de FLD (Equação 1), ao longo da largura das salas.

A avaliação do sombreamento arbóreo como estratégia de controle solar foi feita a partir dos resultados das medições da temperatura de globo, da temperatura superficial do forro e das temperaturas superficiais das paredes externa e internamente (conforme a orientação solar) verificando-se a variação relativa da temperatura de globo conforme a Equação 10.

$$VR_{TG} = \frac{T_{G_{sl}} - T_{G_{sb}}}{T_{G_{sl}}} \cdot 100 \text{ (\%)} \dots\dots\dots \textbf{Equação 10}$$

Onde:

VR<sub>TG</sub>: variação relativa das médias horárias de temperatura de globo ao sol e à sombra;

TG<sub>sl</sub>: médias horárias da temperatura de globo ao sol (°C);

TG<sub>sb</sub>: médias horárias da temperatura de globo sob a copa do indivíduo arbóreo (°C).

A avaliação das perdas de iluminação natural devido ao sombreamento foi quantificado utilizando o conceito da transmitância de luz (Equação 11), calculando-se a disponibilidade de luz sob as copa e em pontos das salas a 0,6m. da janela baixa.

$$T = \frac{E_i}{E_{sl}} \cdot 100 \text{ (%) ..... Equação 11}$$

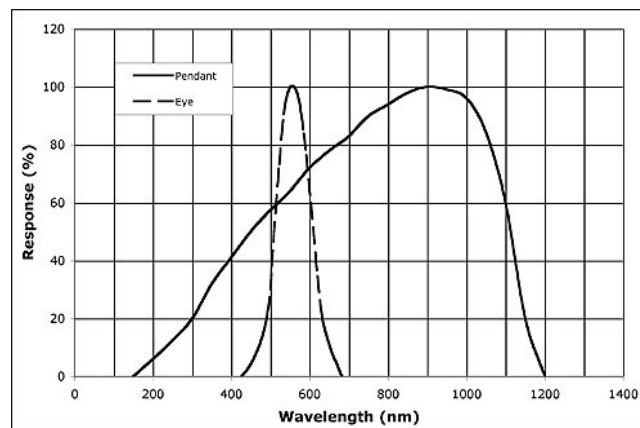
Onde:

T: transmitância da luz (%)

E<sub>i</sub>: iluminância no ponto “i” considerado;

E<sub>sl</sub>: iluminância a céu aberto.

Ressalta-se que as iluminâncias medidas referem-se ao espectro de radiação do sensor HOBO UA002, de 200 a 1200nm, com pico em 900nm (Figura 38).



**Figura 38** - Acurácia do sensor HOBO UA002-64 e o espectro da luz visível

### 3.2.4.3. Método para comparação dos dados medidos e simulados com o EnergyPlus

Dentre os diversos softwares de simulação de edifícios disponíveis, utilizou-se o software EnergyPlus, desenvolvido por iniciativa do Departamento de Energia dos Estados Unidos, a partir de 1996, como resultado da união de dois softwares antecessores, o BLAST (Building Loads Analysis and Thermodynamics) e DOE-2 (Department of Energy), ambos da década de 70 (CRAWLEY et al., 2001).

Este programa estima o consumo de energia considerando as trocas térmicas da edificação com o exterior com base no clima e na caracterização do edifício estudado: desde a geometria, componentes construtivos, cargas instaladas, sistemas de condicionamento de ar e padrões de uso e ocupação e, ainda, permite ao usuário solicitar relatórios com dados estimados durante o processo de simulação, incluindo temperatura interna de cada zona térmica, consumo de energia por uso final e carga térmica retirada pelo sistema de condicionamento de ar.

Utilizou-se, também, o Design Builder um aplicativo acoplado ao software EnergyPlus (licença do Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso) que proporciona uma interface gráfica mais amigável na modelagem da edificação. O Design Builder facilita o processo de modelagem, o que também pode ser feito alternativamente e sem custos com o “*plug in*” do Open Studio no Sketchup.

A simulação compreende as seguintes etapas: inserção da geometria do edifício, inserção dos dados materiais de construção opacos e transparentes, inserção dos padrões de ocupação dos ambientes (*schedules*), inserção dos parâmetros dos sistemas de iluminação, condicionamento de ar e outros sistemas que utilizem energia, como motores de elevadores, bombas, dentre outros.

Após esta sequência, que se chama de modelagem, pode-se escolher o local do edifício, carregando-se o arquivo climático epw e simular consumo de energia

solicitando diversos tipos de relatórios, com dados estimados durante o processo de simulação, incluindo temperatura interna de cada zona térmica, consumo de energia por uso final e carga térmica retirada ou adicionada pelo sistema de condicionamento de ar.

A etapa de simulação de edifícios, segundo PORTO (2010), deve ser trabalhada primeiramente para fins de calibração do aplicativo computacional, por meio da qual é assegurado que as predições do modelo matemático e do objeto estudado estão em consonância. Na sequência, o aplicativo deve ser validado, verificando-se a fidedignidade entre resultados da simulação e as condições reais de funcionamento.

Para comparação dos dados medidos e simulados de temperatura e umidade externos foi escolhido somente o sítio da Escola 2. Como as edificações das três escolas são idênticas, optou-se por esta escola para os procedimentos de calibração do modelo, com a comparação dos dados simulados e medidos internamente.

A metodologia para validação dos dados externos consistiu da comparação das médias horárias de temperatura e umidade do arquivo epw com os dados locais medidos, relativamente ao período de medição de 29/12 a 17/01. Foi analisada a marcha horária das variáveis acima citadas, bem como a correlação entre os valores medidos e do arquivo epw. Os dados implementados no arquivo referem-se à temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa do ar, radiação solar global, velocidade e direção dos ventos. Para alteração do arquivo climático, trabalhou-se em arquivo de texto (do tipo “txt”).

A calibração do modelo foi feita através da comparação dos resultados de temperatura obtidos por simulação da sala exposta ao sol da escola 2 (sala 2sl) com os dados medidos. No ajuste do modelo considerou-se o ambiente, sem ocupação e iluminação e considerando-se um período de 25 dias anterior à data de interesse para

considerar os efeitos de *warm up days* (recomendado). O modelo calibrado foi denominado de modelo-base.

A taxa de infiltração, definida como a ventilação não intencional através das esquadrias do ambiente foi calculada pelo Método da Área de Frestas (Grings, 2003 apud ASRHAE, 2001<sup>3</sup>), conforme Equação 12.

$$V = \frac{A_l}{1000} \sqrt{C_s \cdot \Delta_t + C_w \cdot u^2} \dots\dots\dots \text{Equação 12}$$

Onde:

V: vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);

C<sub>s</sub>: coeficiente de chaminé, em (l/s)<sup>2</sup> · cm<sup>-4</sup> · K<sup>-1</sup>, conforme Tabela 15;

Δt: diferença de temperatura interna e externa (K);

C<sub>w</sub>: coeficiente de vento (l/s)<sup>2</sup> · cm<sup>-4</sup> · (m/s)<sup>-2</sup>, conforme Tabela 16;

u: velocidade do vento local (m/s);

A<sub>l</sub>: área de frestas (cm<sup>2</sup>).

**Tabela 15** - Coeficiente de Chaminé (C<sub>s</sub>)

| Andar padrão   | Um       | Dois     | Três     |
|----------------|----------|----------|----------|
| C <sub>s</sub> | 0,000145 | 0,000290 | 0,000435 |

Fonte: Grings (2003)

---

<sup>3</sup> ASHRAE–American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001. ASHRAE Handbook Fundamentals, Atlanta apud GRINGS, E. T. O. **Comparação entre os resultados computacionais e experimentais do comportamento térmico de um ambiente**. 2003. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS.

**Tabela 16** - Coeficiente de Vento ( $C_w$ )

| Classe de proteção | Posição do Ambiente |          |          |
|--------------------|---------------------|----------|----------|
|                    | Primeiro            | Segundo  | Terceiro |
| 1                  | 0,000319            | 0,000420 | 0,000494 |
| 2                  | 0,000246            | 0,000325 | 0,000382 |
| 3                  | 0,000174            | 0,000231 | 0,000271 |
| 4                  | 0,000104            | 0,000137 | 0,000161 |
| 5                  | 0,000032            | 0,000042 | 0,000049 |

Fonte: Grings (2003)

Nas simulações de edificações térreas a temperatura do solo é um parâmetro importante, pois as trocas de calor entre o piso e o solo são determinantes no resultado final das trocas de calor do ambiente. Para calcular a temperatura do solo utilizou-se o programa Slab, que está vinculado ao EnergyPlus. O programa calcula a temperatura média do solo para cada mês do ano, com base nos valores médios de temperaturas internas e externas da edificação, para o clima escolhido.

Os beirais, as unidades arbóreas de sombreamento e as salas contíguas às salas “sl” e “sb” foram lançados como componentes de sombreamento da edificação, não constituindo zonas térmicas.

O conceito de zona térmica do EnergyPlus não é geométrico e, sim, térmico, relacionado aos dois tipos de superfícies que se pode modelar: as que armazenam energia e as que a transferem. Uma zona é um volume de ar com temperatura uniforme mais as superfícies externas (que transferem energia) e as superfícies interiores ao volume de ar (que armazenam energia). O que define uma zona térmica é o sistema de condicionamento de ar e regime de iluminação. Dessa forma, dois ambientes não adjacentes podem constituir uma mesma zona térmica, desde que

sejam servidos pelo mesmo sistema de condicionamento de ar e regime de iluminação.

Na ausência de medição das propriedades térmicas dos materiais, as propriedades térmicas foram buscadas na literatura, adotando-se os valores recomendados por LAMBERTS et al. (2010). As espessuras das paredes foram medidas e das lajes de forro, estimadas.

Para as superfícies modeladas como componentes de sombreamento (salas adjacentes e beirais), adotou-se as seguintes propriedades térmicas: condutividade= $0,95\text{Wm}^{-10}\text{C}^{-1}$ , densidade= $1000\text{kgm}^{-2}$  e calor específico= $2000\text{J}^0\text{C}^{-1}\text{kg}^{-1}$ . A classificação das paredes externas quanto à absorção da luz visível foi feita conforme Lacchini (2010), tendo sido considerada a cor como de tom médio (Tabela 11) e muito absorviva em relação à luz visível, adotando-se o valor de  $\alpha=0,6$ .

As propriedades termofísicas de condutividade, densidade, calor específico e absorção dos componentes de sombreamento constituintes das árvores foram adotadas de forma que, o material neles especificado fosse representativo do comportamento térmico das árvores.

Os valores adotados classificam os componentes de sombreamento como materiais condutores de calor (condutividade= $0,95\text{Wm}^{-10}\text{C}^{-1}$ ), densos (densidade= $500\text{kgm}^{-2}$ ), de médio aquecimento (calor específico= $754\text{J}^0\text{C}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ) e muito absorvivo (absorção solar= $0,95$ ), tomando-se como referência Lacchini (2010), cuja classificação encontra-se no Anexo 3.

Pietrobon (1999) utilizou a mesma representação de árvores, porém, dispondo os paralelepípedos paralelamente à fachada, o que não constitui uma boa premissa para esta pesquisa, pois as árvores não sombreiam apenas as paredes, mas também a cobertura, importante fechamento no balanço térmico de uma edificação.

Além disso, foi observado nesses dois locais a ocasional existência de “nesgas” de luz (equivalentes aos “*sunflecks*”, definidos por Januário et al. (1992) como pequenas áreas na estrutura da copa das árvores de uma floresta pelos quais passa a luz). Os *sunflecks* produzem sob a copa imagens do sol com a mesma composição espectral da luz direta, porém com intensidade reduzida (EVANS, 1965 apud MACIEL et al., 2009<sup>4</sup>), sendo que a quantidade de luz que atinge o solo depende da estrutura do dossel e da altura solar. Para a consequente iluminação natural do interior das salas é importante considerar essa ocasional iluminância, que não seria verificada se a disposição dos paralelepípedos fosse paralela à fachada das salas.

A determinação do espaçamento entre os paralelepípedos se fez necessária, pois as árvores foram modeladas como elementos de sombreamento externos à edificação, com características de material opaco. Assim, utilizou-se o recurso de modelar o indivíduo arbóreo composto por vários paralelepípedos, de forma a permitir a passagem da luz, o que também foi utilizado por Weiller (2008), ao modelar o sombreamento por meio de um pergolado.

Neste estudo, propõe-se a determinação da transmitância das copas à luz visível, calculando-se a transmitância a partir da fração da iluminância sob a copa da unidade arbórea e a céu aberto, conforme a 11, considerando-se o horário das 11 às 13h, uma vez que o IAF foi medido com o sol próximo do zênite.

Modelou-se a proporção entre os espaçamentos do componente de sombreamento, tomando-se a transmitância proporcionalmente à medida de 1m. Para

---

<sup>4</sup> EVANS, G.C. Model and measurement in the study of woodland light climates. In: (BAINBRIDGE, R.; EVANS, G. C. and RACKHAM, O. eds). **Light as an ecological factor**. p. 53-76 apud MACIEL, M.; WATZLAWICK, L.; SCHOENINGER, E.; YAMAJI, F. Efeito da radiação solar na dinâmica de uma floresta. **RECEN - Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, 4, dez. 2009. Disponível em: <http://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/472/629>. Acesso em: 08 Jan. 2012.

exemplificar, uma transmitância de 10%, equivale a 10cm de vão livre para cada 90cm de largura de base do paralelogramo constituinte do volume da árvore.

Os comprimentos das bases dos paralelepípedos tinham dimensões variáveis, de forma a compor uma base circular, e a altura da copa foi admitida como única, a título de simplificação, embora as formas reais corresponderem à metade de um elipsóide. A Figura 39 exemplifica a modelagem das unidade arbóreas.



**Figura 39** – Modelagem da unidade arbórea de sombreamento

Importante ressaltar que, em outros estudos aplicados à área de vegetação e clima, os métodos avaliam a luminância ( $L$ ) sob a copa e, nesta pesquisa, optou-se por avaliar a iluminância ou fluxo luminoso ( $E$ ). Ambas têm seu conceito originado na intensidade luminosa ( $I$ ).

A modelagem foi feita considerando-se a unidade arbórea da sala sombreada com as alturas do fuste, copa e largura da copa conforme os dados medidos “in loco”, bem como o afastamento do tronco em relação ao prédio da escola.

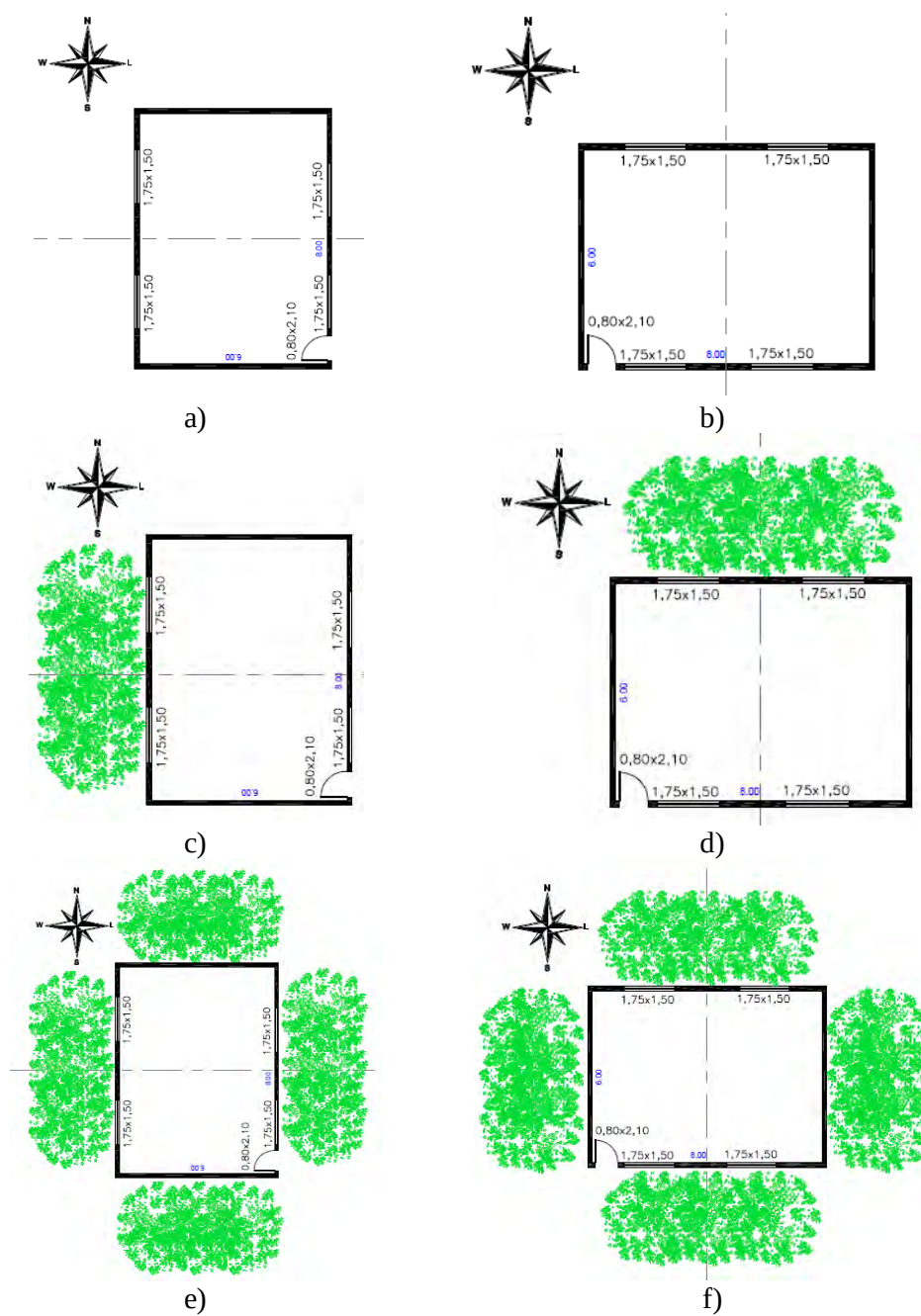
#### *3.2.4.4. Método para simulação dos efeitos do sombreamento em diferentes orientações de fachadas*

Como proposta de generalização dos efeitos do sombreamento arbóreo em uma sala de aula padrão da cidade de Cuiabá, realizou-se a simulação com variações de posicionamento das unidades arbóreas em relação à sua fachada, sendo possível desta forma, quantificar os efeitos desse sombreamento.

Adotou-se a sala de aula padrão de 6,0x8,0x3,0m, com esquadrias na parede à esquerda do quadro (de 8,0m de comprimento) em proporção de 20% da área (duas janelas de 2,04x1,75m) e na parede à direita do quadro na proporção de 12% (duas janelas de 0,84x1,75m). A sala foi localizada no centro de um bloco, tendo, portanto, salas adjacentes idênticas a ela.

Com o modelo acima e a partir do arquivo epw da cidade de Cuiabá, realizaram-se simulações para as 8760 horas anuais para as seguintes implantações, ilustradas na Figura 40.

- a) salas implantadas no sentido norte-sul: sem sombreamento (exposta\_NS), com sombreamento nas quatro fachadas (somb\_total\_NS) e com sombreamento na fachada oeste (sombr\_O);
- b) salas implantadas no sentido leste-oeste: sem sombreamento (exposta\_LO), com sombreamento nas quatro fachadas (somb\_total\_LO) e com sombreamento na fachada norte (sombr\_N).



**Figura 40** - Modelo exposta\_NS (a), exposta\_LO (b), sombr\_O (c), sombr\_N (d), somb\_total\_NS (e) e somb\_total\_LO (f)

A disposição do sombreamento foi feita ao longo de todo comprimento correspondente à orientação da sala, com as seguintes características definidas com base nos dados obtidos nas medições de dezembro/2010: copa densa:  $IAF=10m^2/m^2$ , com atenuação da radiação visível ao meio dia de 96%, proporcionando sombreamento em toda a extensão da sala, distância nula da copa à fachada, altura da copa de 7m e altura do fuste de 2,94m.

A árvore foi representada por um volume correspondente ao volume da copa da Manguieira da Escola 2 (ver Tabela 10), sendo a proporção entre vazios e abertos igual à atenuação da luz sob a copa desta unidade arbórea (96%), o que corresponde ao espaçamento fechado de 0,96m/m de projeção de copa e, aberto, de 0,04m/m.

Analisou-se as temperaturas internas resultantes em cada modelo, comparando-se as diferenças entre estas e a Temperatura Neutra de Conforto (calculada conforme a Equação 4). A análise desta diferença representou o quão distante da condição ideal de conforto adaptativo encontravam-se os modelos, que também foram analisados pelo método do PMV (ISO 7730, 1992).

Para as duas condições de implantação, determinou-se as orientações mais desfavoráveis com base no cômputo simplificado dos ganhos de calor solar para os solstícios de inverno e verão, considerando-se a intensidade de radiação solar para a latitude 13°S, conforme Frota e Schifer (1995). Os fechamentos com orientações mais desfavoráveis são a parede orientada ao norte, no caso do modelo de salas com a maior dimensão implantada no sentido norte-sul e, a parede orientada a oeste, no caso do modelo implantado com a maior dimensão no sentido leste-oeste (Tabela 17). Para essas paredes mais desfavoráveis em termos de ganhos térmicos calculou-se a diferenças entre as temperaturas superficiais internas e externas analisou-se o balanço térmico.

**Tabela 17** – Ganhos de calor solar pelos fechamentos nos modelos

| Orientação da fachada | Ganhos de calor solar total no modelo de maior direção implantada no sentido norte-sul (W/m <sup>2</sup> ) |                           |            | Ganhos de calor solar total no modelo maior direção implantada no sentido leste-oeste (W/m <sup>2</sup> ) |                           |            |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|
|                       | Superfícies opacas                                                                                         | Superfícies transparentes | Total      | Superfícies opacas                                                                                        | Superfícies transparentes | Total      |
| Oeste                 | 92.790,71                                                                                                  | 62.589,97                 | 155.380,68 | 105.443,99                                                                                                | 0,00                      | 105.443,99 |
| Norte                 | 90.535,94                                                                                                  | 0                         | 90.535,94  | 79.671,63                                                                                                 | 62.589,97                 | 142.261,60 |
| Leste                 | 122.666,50                                                                                                 | 23.471,24                 | 146.137,74 | 105.443,99                                                                                                | 0,00                      | 105.443,99 |
| Sul                   | 51.226,46                                                                                                  | 0                         | 51.226,46  | 59.593,45                                                                                                 | 11.402,72                 | 70.996,17  |

Segundo Melo e Lamberts (2008), o balanço térmico tem o objetivo de analisar os ganhos e perdas de calor através dos componentes da edificação. Os dados de saída fornecidos pelo software Design Builder relacionam dados horários de ganhos ou perdas de calor das superfícies da edificação (cobertura, paredes, piso e janelas) baseados no cálculo do fluxo de calor por convecção entre suas temperaturas internas e a temperatura do ambiente no qual está inserida. Além destes, são relacionados os ganhos referentes ao sistema de iluminação, equipamentos e pessoas e as perdas decorrentes da infiltração.

Relacionando as temperaturas superficiais e o balanço térmico, ocorre que, sempre que a temperatura superficial da parede for maior que a temperatura do ar externo, a parede perde calor.

O balanço térmico de toda a edificação também foi calculado de forma análoga à das paredes mais desfavoráveis, para todos os modelos, sendo que a soma horária dos sistemas que envolvem a edificação representa o quanto de calor deve ser adicionado ou retirado do ambiente, também denominada de carga térmica.

A carga térmica é o calor a ser fornecido ou extraído do ar, por unidade de tempo, para manter o ambiente nas condições desejadas, uma vez que a soma hora a hora do balanço térmico representa o quanto de calor deve ser adicionado ou retirado

do ambiente para atender a temperatura de controle adotada. Esta temperatura de controle, no caso deste estudo, foi a própria temperatura externa, visto que os ambientes apresentaram temperatura interna maior que a externa ao longo dos períodos de medição.

Ressalta-se que esta temperatura de controle adotada não se refere à temperatura requerida para obtenção de condições de conforto, mas somente para obtenção do equilíbrio térmico da edificação com fins à obtenção de conforto para o Método Adaptativo (De DEAR e BRAGER, 2002). Obteve-se, desta forma, a demanda média mensal de energia elétrica para resfriamento de cada modelo, em kWh/mês, cujas orientações das fachadas foram comparadas entre si.

## **4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

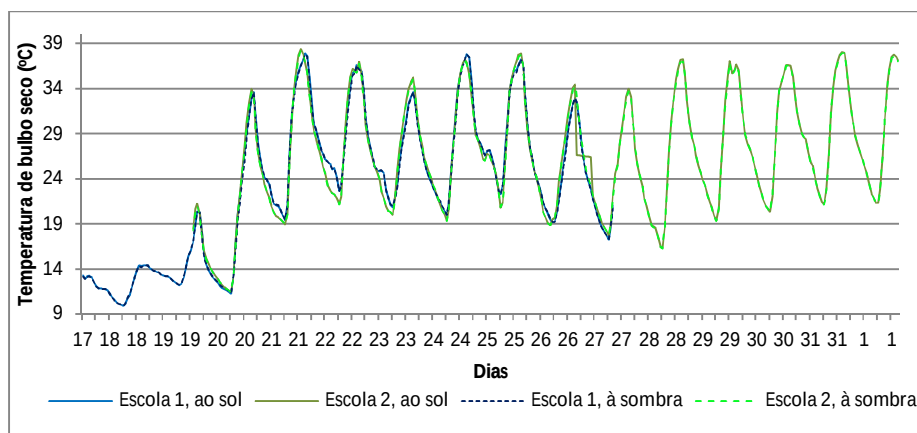
### **4.1. SOMBREAMENTO ARBÓREO E CONDIÇÕES TERMO-HIGROMÉTRICAS DOS PÁTIOS**

#### **4.1.1. Microclima na estação seca**

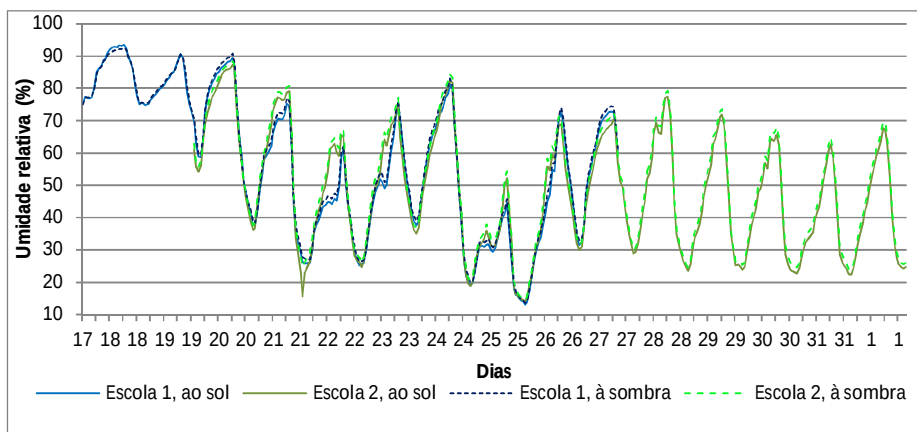
O período de 19 a 26/07/2010 compôs a pesquisa para o estudo do microclima dos pátios escolares na estação seca. Para este fim, foram realizadas nas Escolas 1 e 2, medições de temperatura, umidade e radiação solar global no centro dos pátios e sob unidades arbóreas. Na Escola 1, as medições foram realizadas sob a copa da unidade arbórea de número 1/31 (Figura 25-a) da espécie *Ficus*, e na Escola 2, sob uma Mangueira, identificada pelo número 2/01 (Figura 25-b).

Neste período da estação seca, as amplitudes térmicas diárias são elevadas (maiores que 10°C), sendo que de 17 a 20/07/2010, o tempo encontrava-se sobre a influência de frente fria, com registro de temperatura mínima diária de 11°C, valor excepcionalmente baixo para este fenômeno típico da região. Pelos registros de temperatura em termos de médias horárias, ao sol e à sombra tem-se que, as temperaturas pouco se diferenciam, tendo sido obtidos valores médios ao sol de 25,9 e 25,8°C na Escola 1 e de 25,8°C, ao sol e à sombra, na Escola 2 (Figura 41).

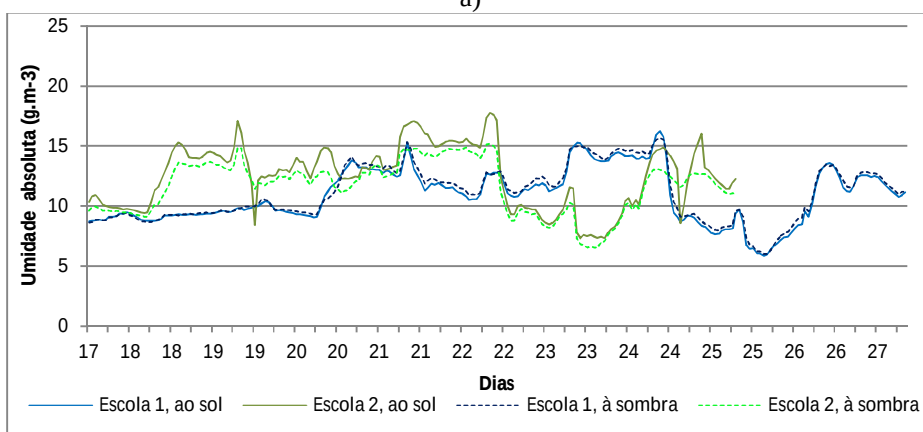
A umidade relativa encontrada ao sol e à sombra foi de 51,4%, na Escola 1 e, de 52,7 e 50,7%, na Escola 2, respectivamente (Figura 42-a). Na análise da umidade absoluta (Figura 42-b) é possível registrar que a Escola 2 apresentou ambiente termo-higrométrico externo com maior umidade, se comparado à Escola 1. Também observou-se a ocorrência de maior umidade absoluta sob a copa das árvores, sendo este menor no *Ficus* da Escola 1 que na Mangueira da Escola 2.



**Figura 41** - Médias horárias da temperatura ao sol e à sombra, nas Escolas 1 e 2, estação seca, período de 19 a 26/07/2010



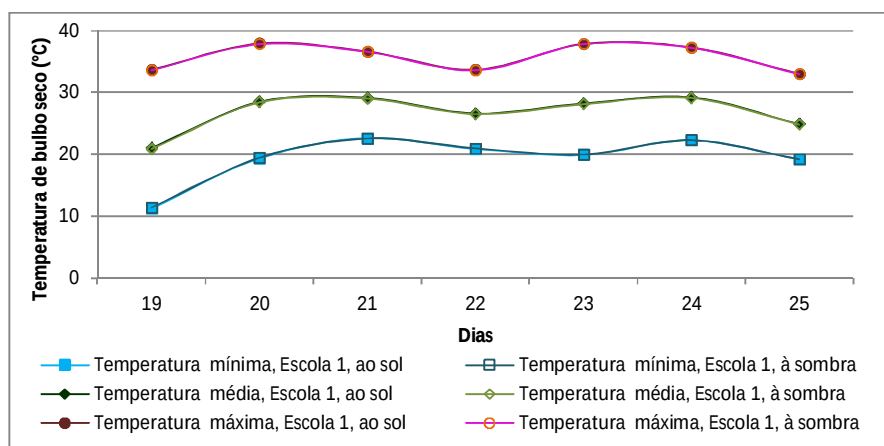
a)



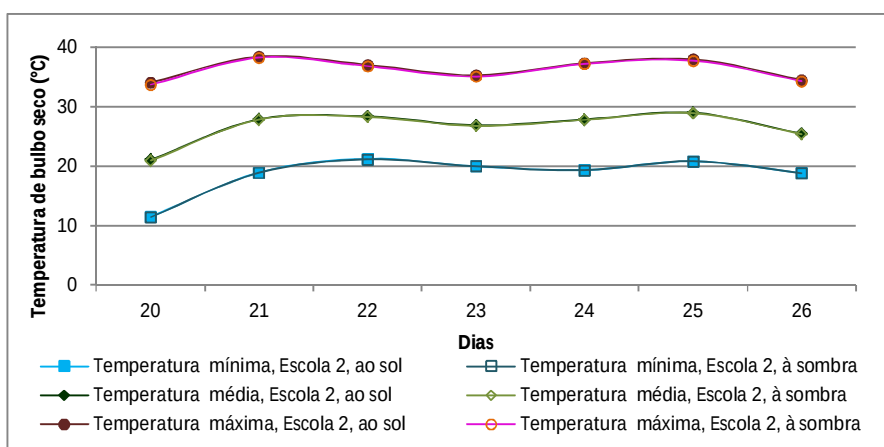
b)

**Figura 42** - Médias horárias da umidade relativa (a) e umidade absoluta (b) ao sol e à sombra, nas Escolas 1 e 2, estação seca, período de 19 a 26/07/2010

Analisando-se as temperaturas máximas, médias e mínimas diárias, tem-se que, na Escola 2, a temperatura máxima ao sol foi de 34,47°C e, à sombra, de 34,25°C. Na Escola 1, a temperatura máxima ao sol foi de 33,8°C e, à sombra, de 33,75°C. As temperaturas médias diárias, na Escola 1, foram de 25,28 e de 25,19°C, e na Escola 2, de 25,46 e 25,37°C, ao sol e à sombra, respectivamente. A média das temperaturas mínimas diárias foi maior na Escola 1, com 18,47 e 18,52°C, ao sol e à sombra, respectivamente, que na Escola 2, cujos valores medidos foram de 18,04°C, ao sol e de 18,01°C, à sombra (Figuras 43-a e 43-b).



a)

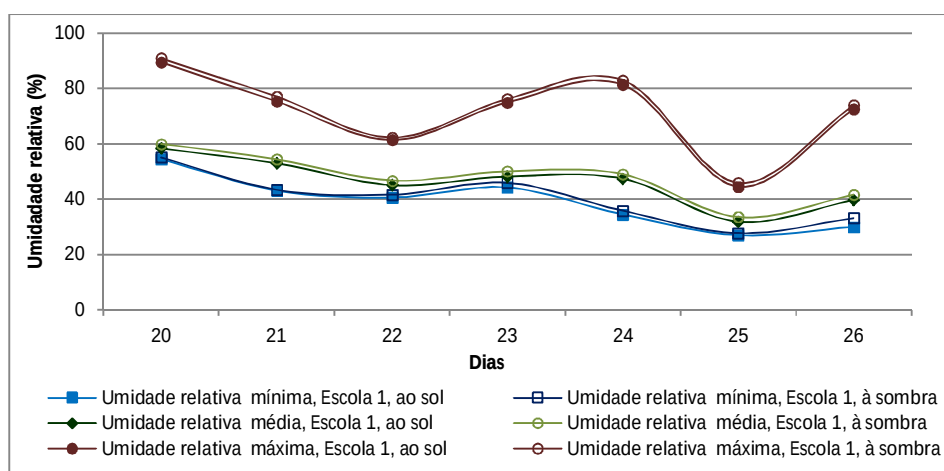


b)

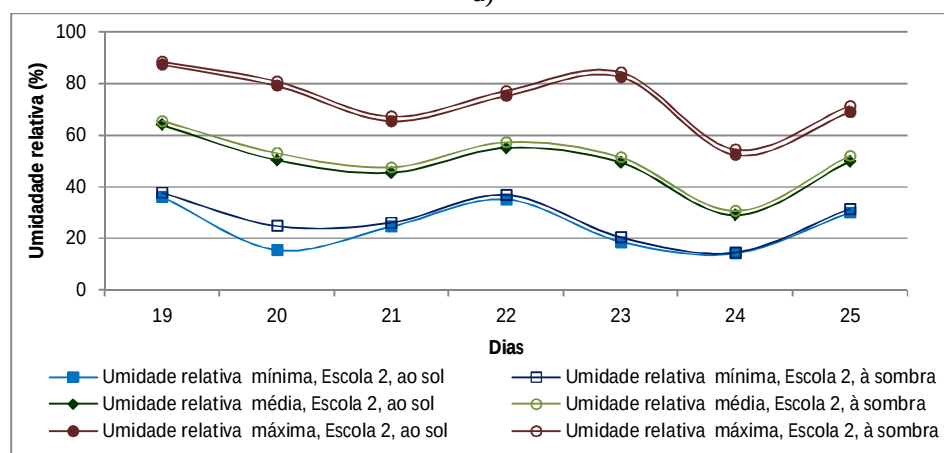
**Figura 43** – Marcha diária da temperatura externa máxima, média e mínima ao sol e à sombra, nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010

Entre as escolas, os valores numéricos de temperatura média diária ao sol e à sombra distinguem-se, em ambas as condições, de  $0,18^{\circ}\text{C}$ , sendo os maiores valores encontrados na Escola 1.

Registraram-se valores para a umidade relativa máxima, média e mínima diária na Escola 1 de 71,3, 46,1 e 39,0%, ao sol, e de 72,7, 47,8 e 40,3%, à sombra, respectivamente (Figuras 44-a e 44-b). Na Escola 2, os valores foram de 72,9, 49,0 e 24,8%, ao sol, e de 74,8, 51,0 e 27,4%, à sombra, respectivamente. Os valores médios são abaixo de 65%, citado por Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992) como médio do mês de julho.



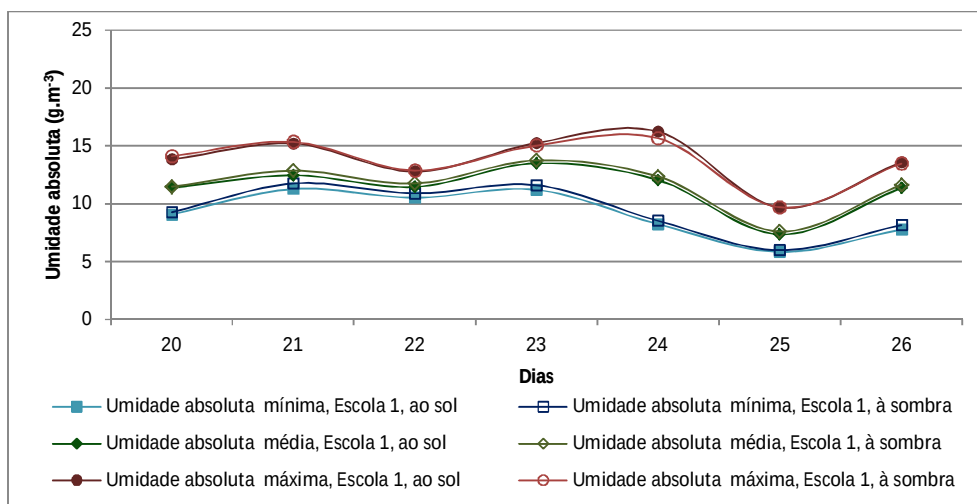
a)



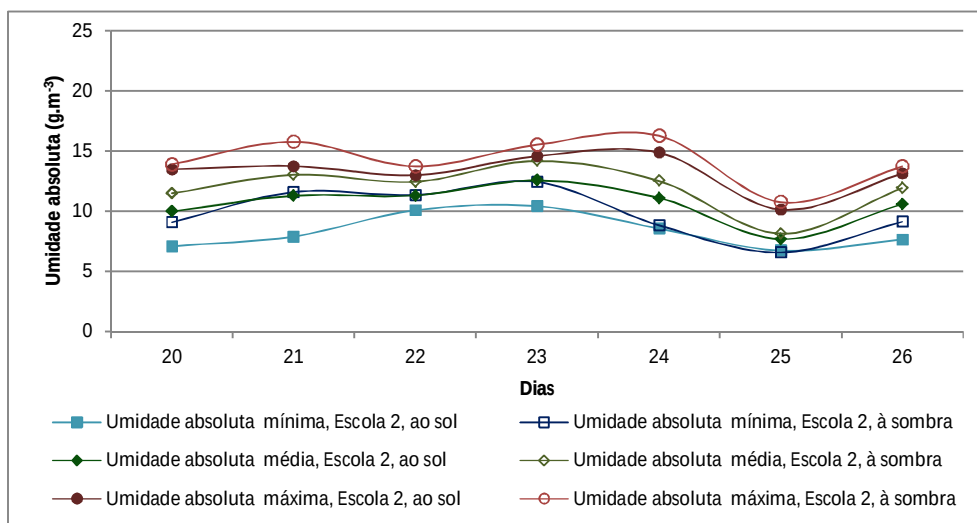
b)

**Figura 44** - Marcha diária da umidade relativa externa máxima, média e mínima a sol e à sombra nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010

Os valores da umidade absoluta máxima, média e mínima diária na Escola 1 foram de 13,8, 11,3 e  $9,1 \text{ g.m}^{-3}$ , ao sol, e de 13,7, 11,6 e  $9,4 \text{ g.m}^{-3}$ , à sombra, respectivamente. Na Escola 2, os valores foram de 13,2 10,6 e  $8,3 \text{ g.m}^{-3}$ , ao sol, e de 14,2, 11,9 e  $9,8 \text{ g.m}^{-3}$ , à sombra, respectivamente (Figuras 45-a e 45-b).



a)



b)

**Figura 45** - Marcha diária da umidade absoluta externa máxima, média e mínima a sol e à sombra nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010

Analisando-se os valores da umidade absoluta, observa-se que sob a copa da Mangueira, na Escola 2, a umidade absoluta é maior que sob a copa do Ficus da Escola 1.

Observou-se um efeito oásis sob a copa da unidade arbórea de maior porte e de copa mais densa, que pode ser quantificado em 2% nos valores de umidade relativa e de 0,2°C na temperatura. Período pequeno de medições e influência de frente fria podem justificar o pequeno acréscimo da umidade e a pequena atenuação da temperatura sob a copa encontrados.

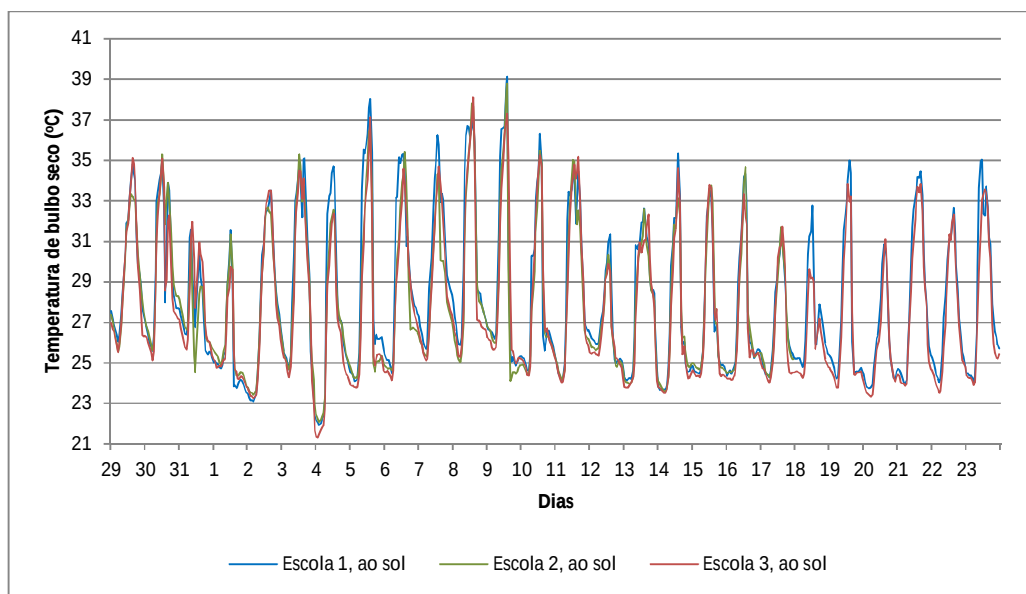
#### **4.1.2. Microclima na estação chuvosa**

O período de medição de 29/12/2010 a 23/01/2011 compôs a pesquisa para a caracterização microclimática da estação chuvosa. Nesta medição, repetiu-se o experimento do mês de julho, dispensando as estações meteorológicas portáteis e utilizando-se dados secundários de radiação solar global de Callejas (2011).

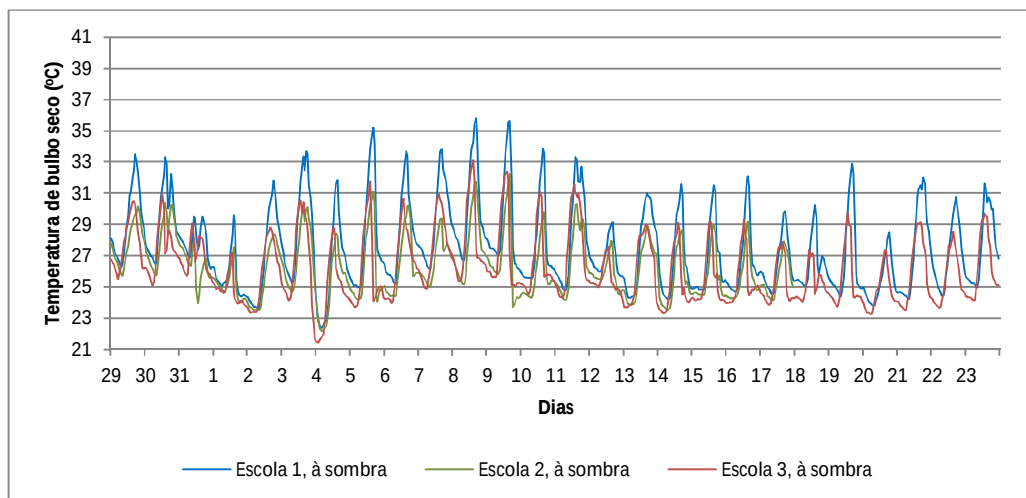
Foram realizadas medições nas três escolas e as unidades arbóreas medidas foram as de número 1/29 (Figura 25-a), 2/87 (Figura 25-b) e 3/10 (Figura 25-c).

Analisando-se os registros de temperatura em termos de médias horárias, ao sol e à sombra, conforme apresentado nas Figuras 46-a e 46-b, destaca-se que as Escolas 2 e 3 apresentam valores mais próximos de temperatura entre si que com a Escola 1.

Na condição de sombra, as temperaturas sob a copa do Ficus são maiores que na Mangueira e Oiti.



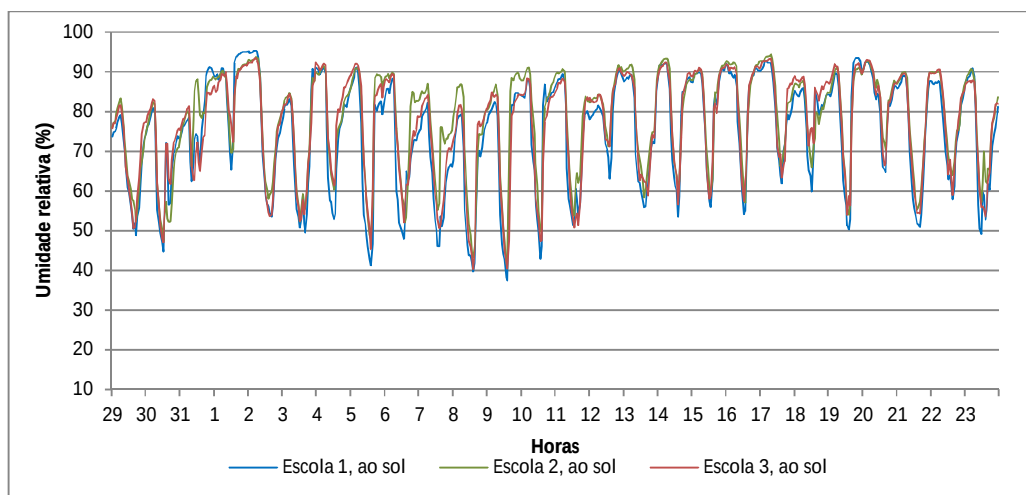
a)



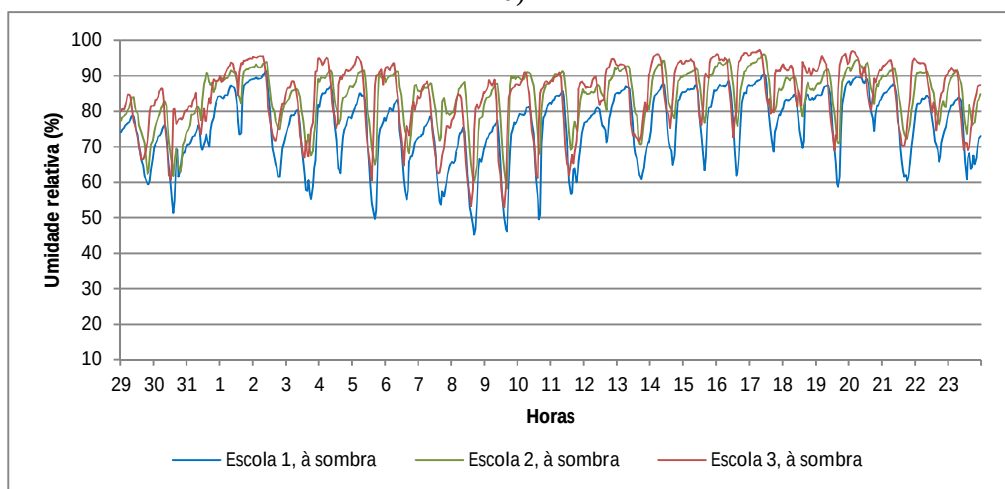
b)

**Figura 46** - Médias horárias de temperatura do ar ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

As Figuras 47-a e 47-b trazem as médias horárias da umidade relativa ao sol e à sombra. Ao sol, o comportamento das três escolas é mais uniforme, com maior semelhança entre as Escola 2 e 3, tendo a Escola 1, maiores picos de mínima.



a)



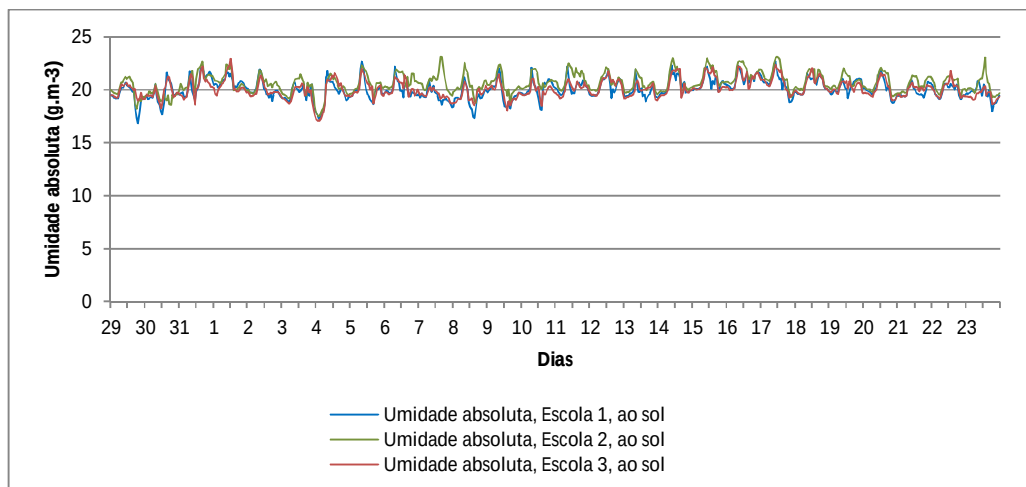
b)

**Figura 47** - Marcha horária da umidade relativa do ar ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

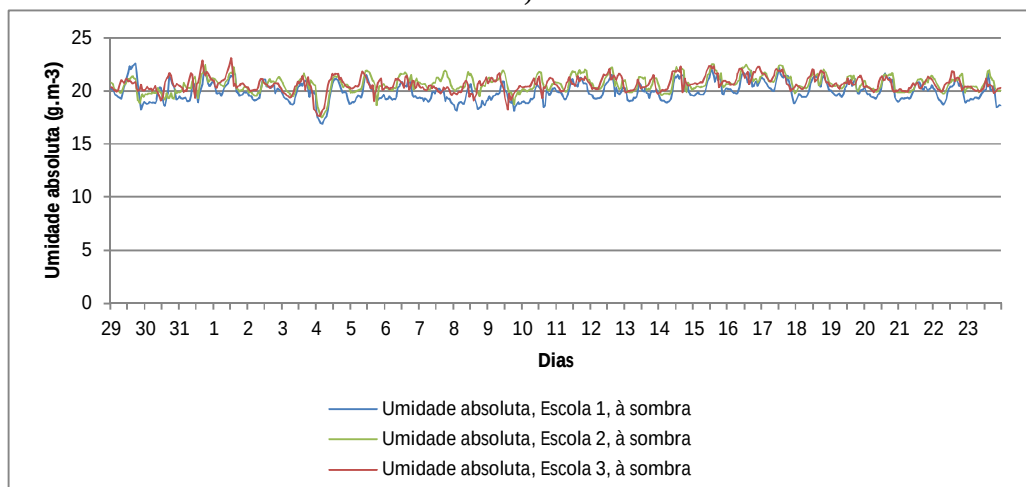
Considerando-se a umidade absoluta, neste período chuvoso, observou-se que a grande quantidade de água presente no ar, resulta em um ambiente higrométrico homogêneo a céu aberto e sob as copas, observando-se um efeito oásis fraco (Figuras 48-a e 48-b).

Na Escola 2, a umidade absoluta média a céu aberto foi de  $27,8 \text{ g.m}^{-3}$  e sob a copa da Mangueira de  $28,6 \text{ g.m}^{-3}$ . Na Escola 3, a umidade absoluta encontrada foi de  $27,8$  e  $28,5 \text{ g.m}^{-3}$  a céu aberto e sob a copa do Oiti, respectivamente. Na Escola 1,

a umidade absoluta a céu aberto foi de  $27,8 \text{ g.m}^{-3}$ , maior que sob a copa do Ficus –  $19,9 \text{ g.m}^{-3}$ , justificado por fatores decorrentes da ocupação, não controlados pela pesquisa.



a)

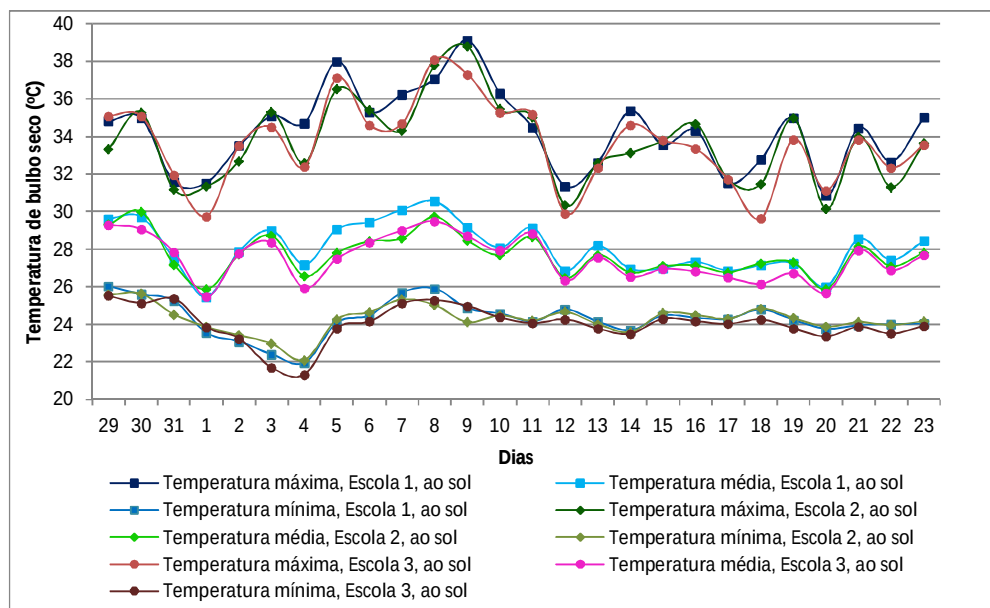


b)

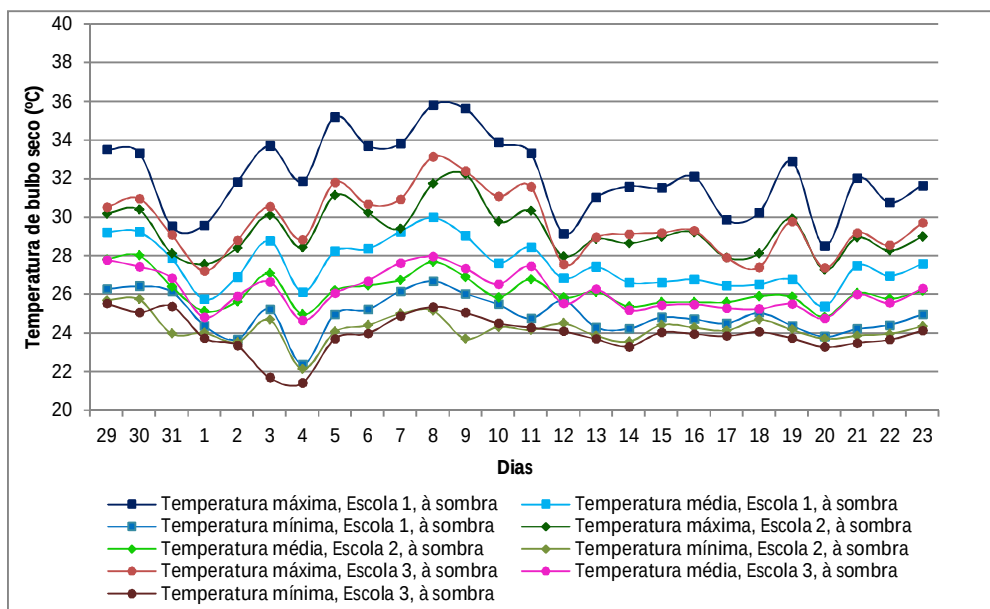
**Figura 48** - Marcha horária da umidade absoluta do ar ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

As Figuras 49-a e 49-b apresentam a marcha diária de temperatura do ar máxima, média e mínima, ao sol e à sombra, nas quais se observa que, neste período

de estação chuvosa, as amplitudes térmicas diárias são menores que no período seco e, geralmente, menores que 10°C.



a)



b)

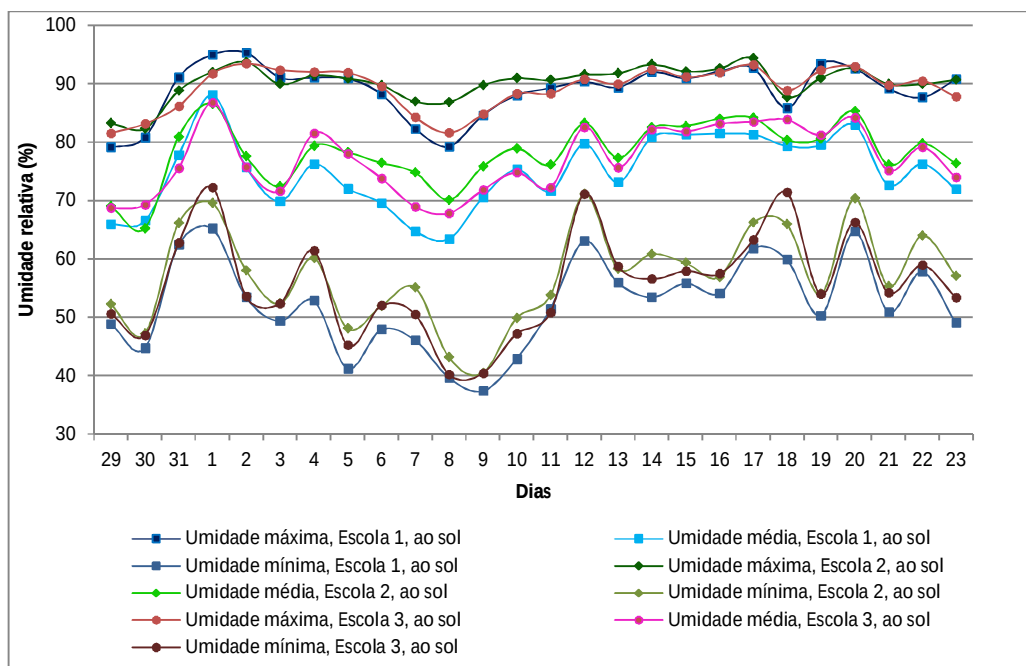
**Figura 49** – Marcha diária das temperaturas máximas, médias e mínimas ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

As temperaturas máximas diárias, tanto ao sol quanto à sombra, apresentaram valores maiores na Escola 1 ( $Te-1(sl)=34,72^{\circ}C$ ;  $Te-1(sb)=32,16^{\circ}C$ ) que na Escola 2 ( $Te-2(sl)=33,73^{\circ}C$ ;  $Te-2(sb)=29,78^{\circ}C$ ) e Escola 3 ( $Te-3(sl)=33,65^{\circ}C$ ;  $Te-3(sb)=29,67^{\circ}C$ ). As temperaturas médias diárias ao sol, na Escola 1 foram de  $28,08^{\circ}C$ ;  $27,70^{\circ}C$  na Escola 2 e na Escola 3, de  $27,51^{\circ}C$ . À sombra, as temperaturas médias foram de  $27,55$ ;  $26,17$  e  $26,16^{\circ}C$ , nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente. As temperaturas mínimas diárias ao sol foram maiores na Escola 1, com  $24,32^{\circ}C$ , seguida pela Escola 2, com  $24,28^{\circ}C$ , e pela Escola 3, com  $24,02^{\circ}C$ . Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992) indicam os valores de  $32,5$ ;  $26,8$  e  $23,5^{\circ}C$  para este mês de dezembro, estando, portanto, as medidas enquadradas em uma situação típica.

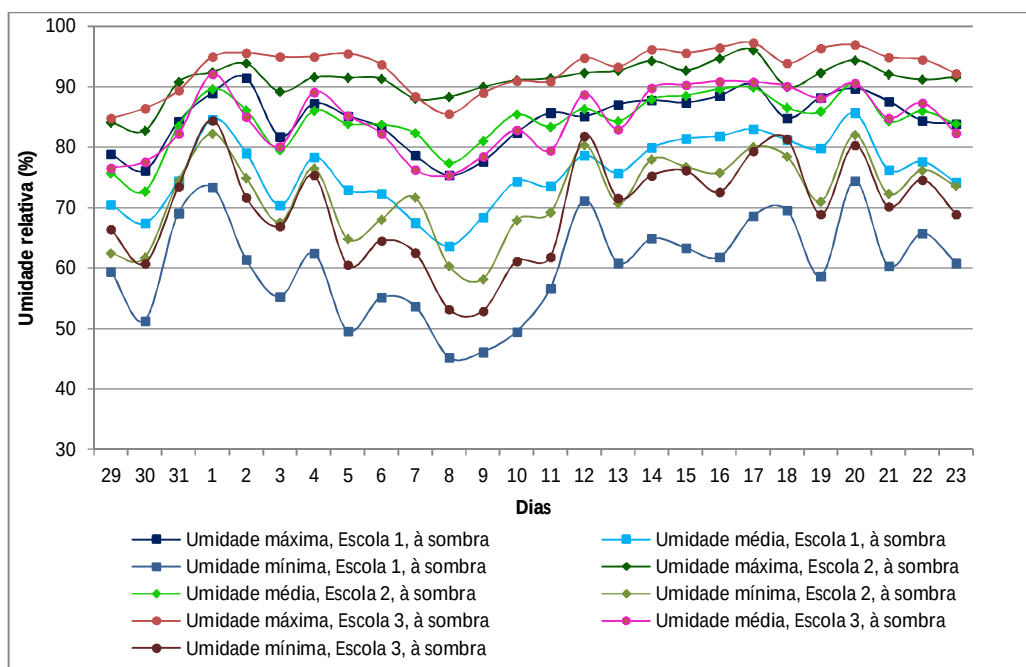
Entre as escolas, a diferença entre os valores numéricos de temperatura média diária ao sol foi ligeiramente na estação chuvosa que na seca. As diferenças encontradas foram  $0,38^{\circ}C$  da Escola 1 para a Escola 2 e, de  $0,56^{\circ}C$ , da Escola 1 para Escola 3. Diferença menor foi encontrada entre as Escolas 2 e 3, no valor de  $0,18^{\circ}C$ . Comportamento semelhante foi verificado nas temperaturas máximas ( $0,6^{\circ}C$  da Escola 1 para 2;  $0,68^{\circ}C$  da Escola 1 para 3 e  $0,08^{\circ}C$  da Escola 2 para 3). Já para as temperaturas mínimas, o maior valor foi encontrado da Escola 1 para 3, de  $0,29^{\circ}C$ ; seguido pela Escola 2 para 3, de  $0,25^{\circ}C$  e da Escola 1 para 2, de  $0,04^{\circ}C$ .

A diferença numérica dos valores de temperatura ao sol e à sombra também é maior que na estação seca, tendo sido encontradas diferenças nas temperaturas máximas de  $2,17$ ;  $4,45$  e  $3,97^{\circ}C$  nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente. Nas temperaturas médias, as diferenças entre sol e sombra são de  $0,53$ ;  $1,53$  e  $1,35^{\circ}C$ . Nas temperaturas mínimas, os valores encontrados foram de  $0,05$  e  $0,06^{\circ}C$  nas Escolas 2 e 3. Na Escola 1, a unidade arbórea era de pequeno porte e proporcionava pouco sombreamento e a temperatura à sombra manteve-se sempre maior que ao sol,  $0,04^{\circ}C$  superior a esta, em média.

As Figuras 50 e 51 apresentam a marcha diária da umidade relativa e absoluta do ar máxima, média e mínima, ao sol e à sombra.

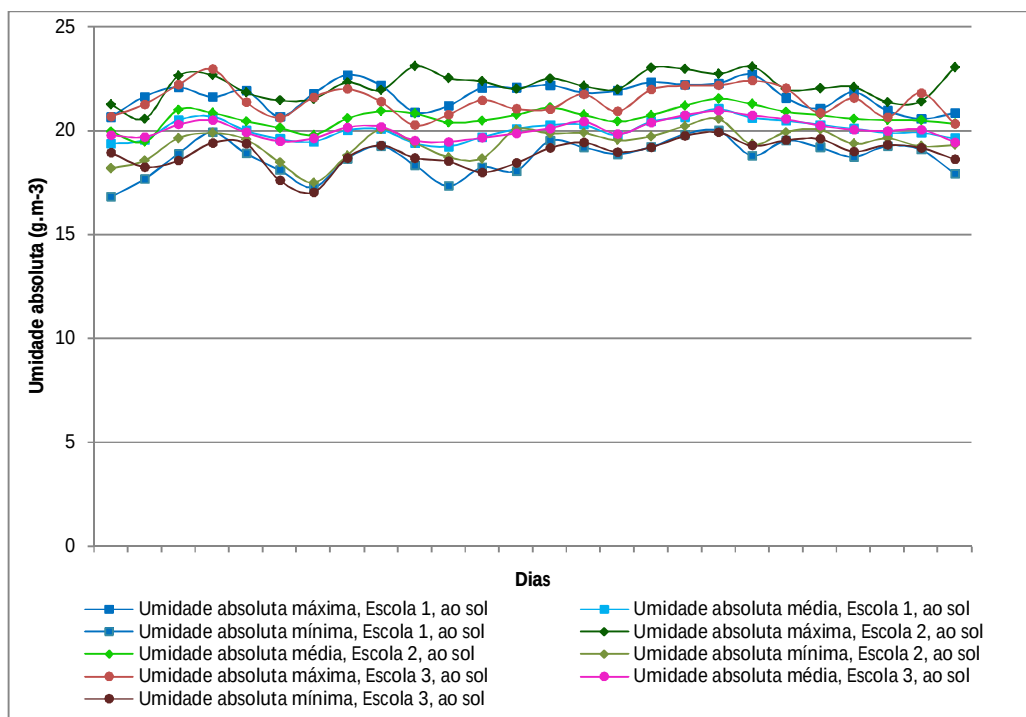


a)

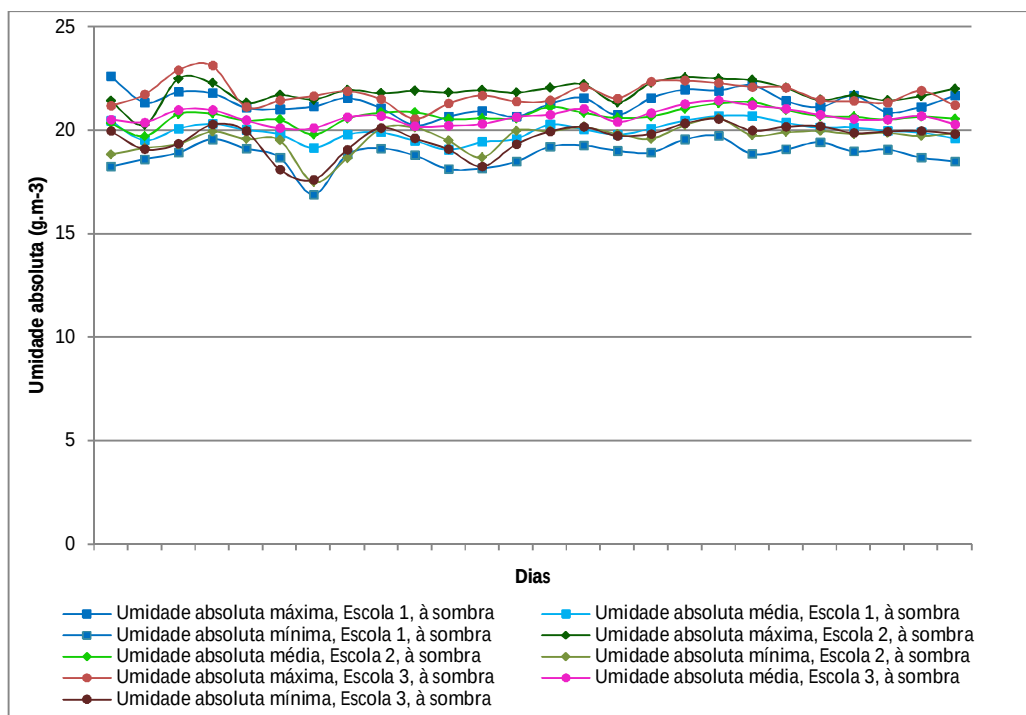


b)

**Figura 50** – Marcha diária das umidades relativas máximas, médias e mínimas ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011



a)



b)

**Figura 51** – Marcha diária das umidades absolutas máximas, médias e mínimas ao sol (a) e à sombra (b), nas Escolas 1, 2 e 3, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

A umidade relativa encontrada ao sol foi de 74,94%, 78,26 e 78,05%, nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente, em coerência com Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992), que indicam 78% para o mês de dezembro. À sombra do Ficus, Mangueira e Oiti, os valores médios foram de 75,90, 84,42 e 84,63%, respectivamente. A média diária da umidade máxima ao sol foi de 89, 90,2 e 89,2% e à sombra de 84,7, 91,2 e 93%, nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente. Assim, as maiores máximas foram encontradas na Escola 1. As mínimas ao sol foram de 52,3, 57,2 e 55,7% e de 60,3, 72,1 e 9% à sombra, nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente.

Em se tratando da umidade absoluta, foram encontrados os valores máximos, médios e mínimos de 21,6, 20,0 e 18,7  $\text{g.m}^{-3}$ , a céu aberto e, de 21,3, 19,9 e 18,8  $\text{g.m}^{-3}$ , sob a copa do Ficus, na Escola 1. Nessa escola, as condições higrométricas a céu aberto e sob a copa, mais uma vez pouco se distinguem, tendo em vista, o pequeno porte do Ficus.

Na Escola 2, os valores máximos, médios e mínimos da umidade absoluta foram de 22,1, 20,6 e 19,3  $\text{g.m}^{-3}$ , a céu aberto e, de 21,8, 20,6 e 19,6  $\text{g.m}^{-3}$ , sob a copa da Mangueira. Na Escola 3, os valores máximos, médios e mínimos da umidade absoluta foram de 21,4, 20,7 e 18,9  $\text{g.m}^{-3}$ , a céu aberto e, de 21,7, 20,6 e 19,6  $\text{g.m}^{-3}$ , sob a copa do Oiti. Em ambas as escolas, a umidade mínima sob a copa manteve-se maior que a mínima a céu aberto.

#### **4.1.3. Atenuação relativa da temperatura do ar proporcionada pelas unidades arbóreas de sombreamento**

Os efeitos do sombreamento nas condições termo-higrométricas dos pátios, os resultados de radiação solar, temperatura e umidade foram comparados entre si e relacionados ao índice de área foliar (IAF), área foliar total (AFT) e porte do indivíduo arbóreo.

Os resultados da medição do índice de área foliar (IAF) constam da Tabela 18, bem como os valores da radiação medida nos quatro quadrantes sob a árvore (PAR 1 a PAR4) e da radiação ao sol (PAR SOL).

O valor de “T” corresponde à fração da radiação PAR medida acima e abaixo da copa. O parâmetro “Fb” é a razão entre a radiação direta e a radiação vinda de todas as fontes do ambiente como a atmosfera ou refletida de outras superfícies. O parâmetro “x” é a razão entre o comprimento horizontal e vertical do esferóide descrito pela distribuição angular das folhas de uma copa. Também pode ser medido como a razão entre a área projetada de um elemento (uma folha, por exemplo) em um plano horizontal e sua projeção em um plano vertical.

O valor padrão para “x” é 1.0, que assume a distribuição esférica para a copa. O ângulo zenital pode ser definido como o ângulo que o sol faz com relação ao zênite. O zênite é definido como sendo 0° e o horizonte é de 90° (DECAGON, 2008).

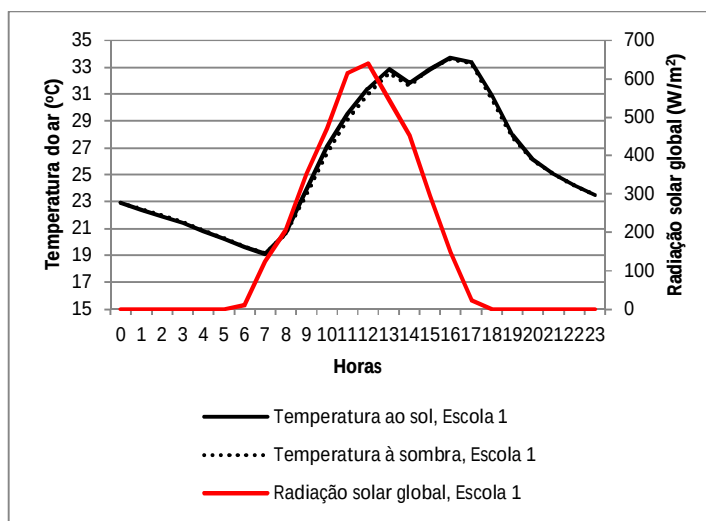
**Tabela 18** – Inventário das unidades arbóreas de sombreamento

| UA | DATA<br>MEDIÇÃO | PAR SOB A UA |      |      |      | PAR<br>SOL | T    | IAF<br>(m <sup>2</sup> .m <sup>-2</sup> ) | Fb   | x | Z <sub>o</sub> |
|----|-----------------|--------------|------|------|------|------------|------|-------------------------------------------|------|---|----------------|
|    |                 | PAR1         | PAR2 | PAR3 | PAR4 |            |      |                                           |      |   |                |
| 29 | 27/10/10        | 103          | 126  | 68   | 70   | 1861       | 0,07 | 5,48                                      | 0,84 | 1 | 4              |
| 31 | 27/10/10        | 38           | 43   | 41   | 33   | 1845       | 0,02 | 7,23                                      | 0,83 | 1 | 5              |
| 01 | 27/10/10        | 95           | 76   | 40   | 72   | 2168       | 0    | 8,3                                       | 0,9  | 1 | 10             |
| 87 | 29/10/10        | 37           | 30   | 84   | 30   | 2178       | 0,01 | 10,1                                      | 0,91 | 1 | 3              |
| 10 | 28/10/10        | 55           | 60   | 51   | 48   | 2225       | 0,03 | 7,4                                       | 0,91 | 1 | 8              |

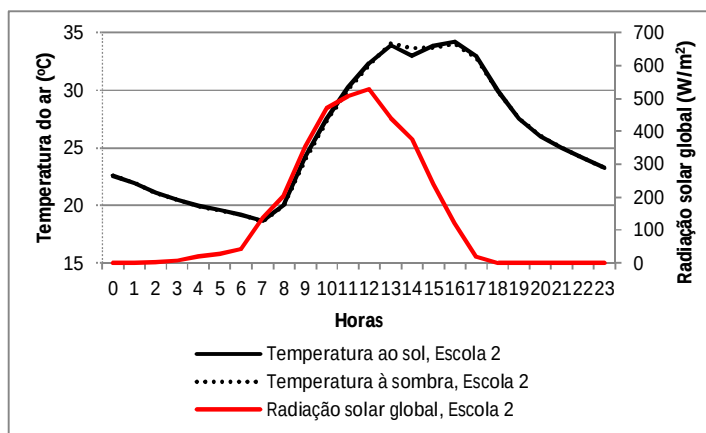
Na medição da estação seca, o Ficus da Escola 1 (UA-31) classificava-se como de pequeno porte, com 2,15m de altura de fuste, 2,01m e 4,16m de altura e projeção de copa, respectivamente. Já a Mangueira da Escola 2 (UA-01), de grande porte, possuía 2,79m de fuste; 10,99m e 10,00m de altura e projeção de copa. Ambas apresentavam equivalentes índices de área foliar – IAF - (7,23m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup> para o Ficus, e 8,3m<sup>2</sup>m<sup>-2</sup> para a Mangueira) e área foliar total – AFT - de 90,85 e 651,86m<sup>2</sup>, respectivamente.

Tem-se que a temperatura do ar se eleva conforme a elevação da radiação solar, até o meio-dia. Após o meio-dia, a elevação solar tem trajetória descendente e, na estação seca, as temperaturas mantêm a ascendência até cerca de 16h, após o que decrescem, tanto na condição de sol quanto de sombra (Figura 52).

A variação relativa média da temperatura no Ficus foi de 0,76%, e na Mangueira, de 0,54%, considerando-se somente o período diurno (das 7 às 17h) de todos os dias de medição. A variação relativa média da umidade na condição de sombra e sol é de 2,95 e 4,19%, para o Ficus e Mangueira, respectivamente.



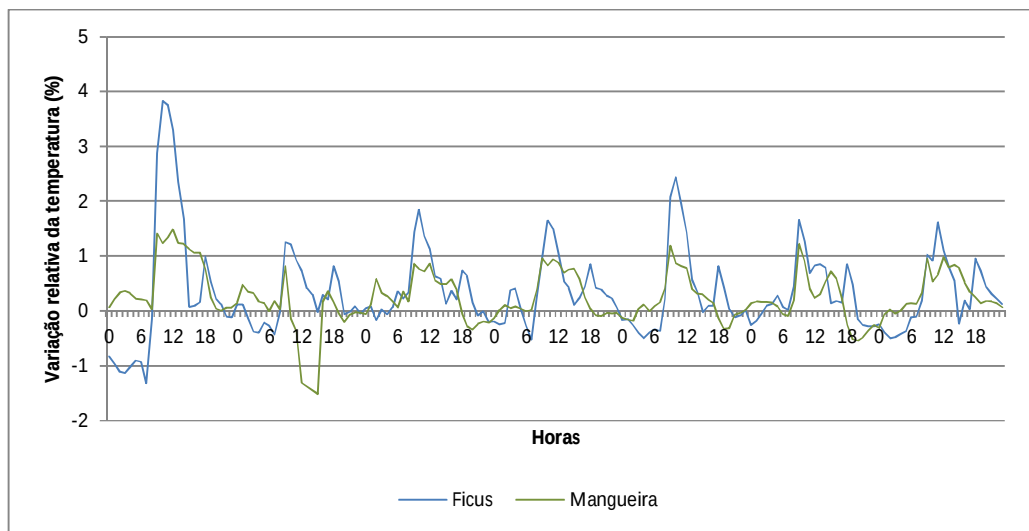
a)



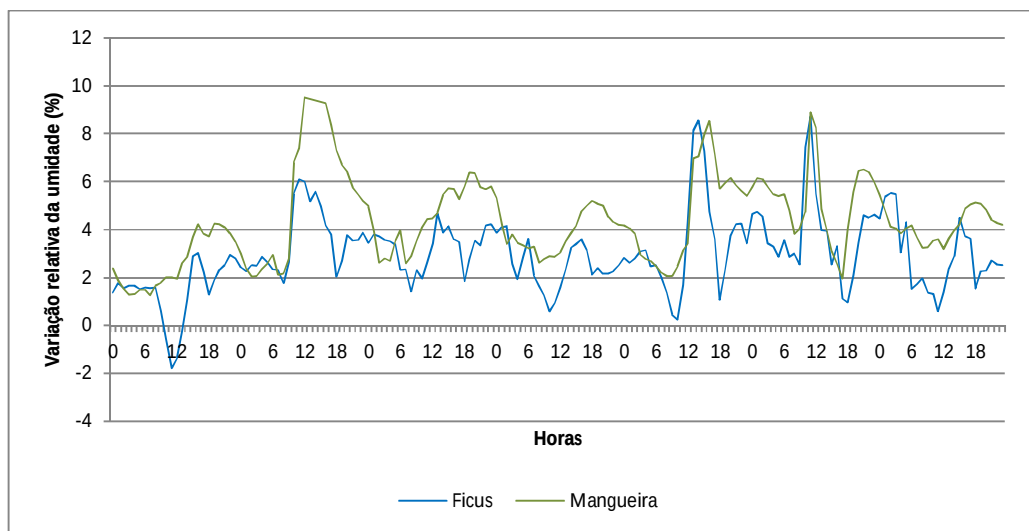
b)

**Figura 52** – Temperatura e radiação solar no período ao longo do dia, Escola 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 19 a 26/07/2010

A Figura 53 apresenta a marcha horária da variação relativa da temperatura a céu aberto e sob a copa, na qual se observa que a atenuação no Ficus foi maior que a da Mangueira.



a)



b)

**Figura 53** - Variação relativa da temperatura (a) e umidade relativa do ar (b), na condição de sol e sombra, todo o período de medição, estação seca, período de 19 a 26/07/2010

Pelas observações no local, tem-se que ocorreram dois fatores que justificam os resultados. O primeiro, o fato de que ocorreu sombreamento pela edificação no ponto de medição sob a copa do Ficus, no horário das 9 às 15h e, segundo, que ocorreu incidência direta de radiação solar sob a copa da Mangueira, que se localizava no limite do pátio, no período matutino, das 8 às 11h. A rigor, tendo o Ficus menor DAF, sua atenuação sem a influência do sombreamento do prédio seria menor que a da Mangueira.

Desta forma, desconsiderando-se as ocorrências citadas no Ficus, a variação relativa da temperatura sob a copa do Ficus foi de 0,16% e na da Mangueira de 0,51%, excluindo-se desse cômputo o período noturno.

É importante constar, para este período de medição, no qual as noites são frias e os dias são quentes, que a árvore desempenha papel de abrigo, ocorrendo a situação em que, no período noturno, a umidade e a temperatura do ar sob a unidade arbórea são maiores que a céu aberto, justificado pelo efeito de barreira proporcionado pela copa, que bloqueia o movimento das camadas de ar e a liberação do calor radiante das superfícies aquecidas após o pôr do sol, resultando em temperaturas mais elevadas sob ela.

A Mangueira manteve a umidade sob a copa mais estável, justificada pelo seu porte e DAF. O sombreamento da porção do solo sob a copa, bloqueando os efeitos da radiação solar direta, o deixa mais úmido e permite a ocorrência de maior taxa de evaporação que a céu aberto (Figura 53-b).

A variação relativa da umidade, durante as horas de brilho solar, sob as copas foi de 2,93 para o Ficus e de 4,17% para a Mangueira, sendo os efeitos da evapotranspiração percebido nesta estação. A Mangueira manteve a umidade sob a copa mais estável, justificado pelo seu porte e DAF. O sombreamento da porção do solo sob a copa, bloqueando os efeitos da radiação solar direta, o deixa mais úmido e permite a ocorrência de maior taxa de evaporação que a céu aberto. Se consideradas as 24 horas do dia, a variação relativa do Ficus foi de 2,9% e da Mangueira, de 4,2%.

Na estação chuvosa, o Ficus da Escola 1 (UA-29) classificava-se como de pequeno porte, com 2,45m de altura de fuste, 1,70m e 4,00m de altura e projeção de

copa, respectivamente. Já a Mangueira da Escola 2 (UA-87), de grande porte, possuía 3,59m de fuste; 7,38m e 10,89m de altura e projeção de copa. O Oiti da Escola 3 (UA-10) tem 12,7m de projeção de copa, altura do fuste e copa de 3,98 e 8,06m, respectivamente. Os índices de área foliar eram de  $5,48 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$  para o Ficus,  $10,1 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$  para a Mangueira e  $7,4 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$  para o Oiti e a área foliar total de 68,9, 940,7 e  $842,5 \text{ m}^2$ , para o Ficus, a Mangueira e o Oiti, respectivamente.

A Figura 54 mostra o comportamento da temperatura e radiação solar ao longo de um dia de medição.

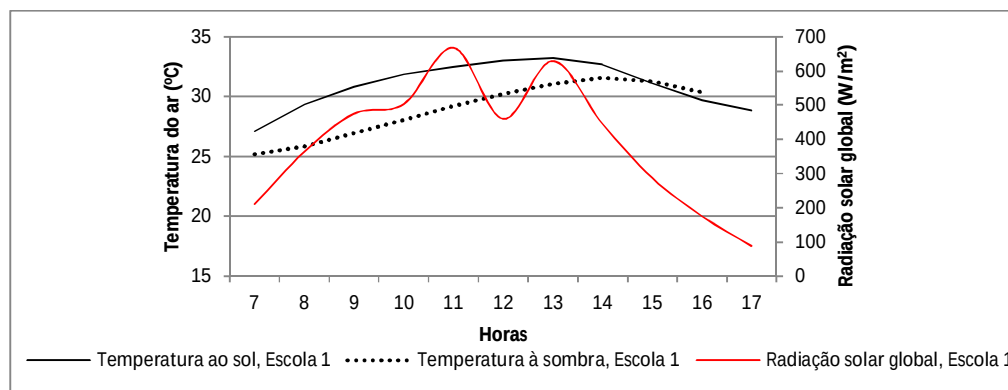
Sob o Ficus, na Escola 1, a temperatura teve máxima de  $31,5^\circ\text{C}$ , às 15h e mínima de  $25,1^\circ\text{C}$ , às 7h, enquanto que a céu aberto, a máxima foi de  $33,24^\circ\text{C}$ , às 13h e, mínima de  $24,64^\circ\text{C}$ , às 5h. Sob a Mangueira, a máxima foi de  $28,7^\circ\text{C}$ , às 15h e a mínima de  $24,5^\circ\text{C}$ , às 7h, enquanto que a céu aberto, a máxima foi de  $32,9^\circ\text{C}$ , às 13h e a mínima de  $25,61^\circ\text{C}$ , às 5h. Sob o Oiti, na Escola 3, a máxima sob a copa foi de  $29,24^\circ\text{C}$ , às 13h e a mínima  $24,22^\circ\text{C}$ , às 5h, enquanto que a céu aberto a máxima foi de  $32,78^\circ\text{C}$ , às 13h e mínima de  $24,29^\circ\text{C}$ , às 7h.

A variação relativa média da temperatura para o período diurno (das 7 às 17h) no Ficus foi de 6,75%; na Mangueira, de 10,55% e, no Oiti, de 8,31%. Se consideradas as 24 horas do dia, a variação relativa da temperatura foi de 1,05, 4,74 e 4,4% para o Ficus, Mangueira e o Oiti, respectivamente (Figura 55-a).

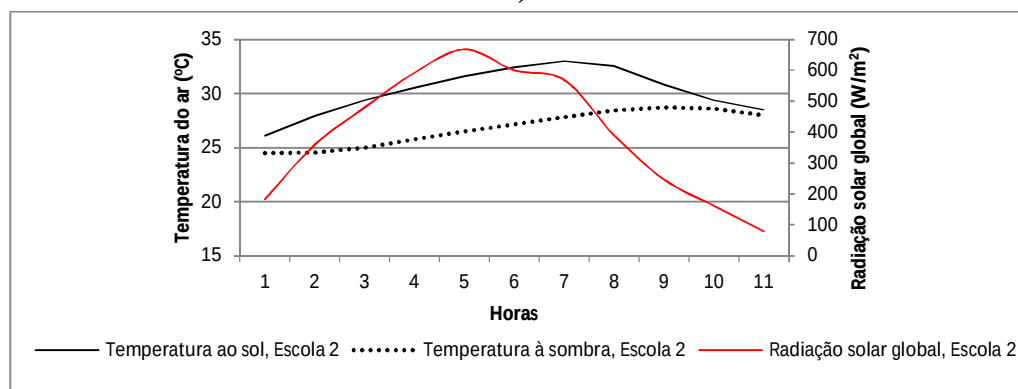
A variação relativa da umidade foi de 10,06; 15,17 e 14,53% para o Ficus, Mangueira e Oiti, respectivamente. Se consideradas as 24 horas do dia, a variação relativa da temperatura foi de 1,04, 7,41 e 9,5% para o Ficus, Mangueira e o Oiti, respectivamente (Figura 55-b).

O Ficus apresentou a menor atenuação dentre as três espécies, seguido pelo Oiti e pela Mangueira. Também foi verificado, o efeito noturno de ocorrência de temperatura maior sob a copa que a céu aberto, mas com a umidade relativa menor. Nesta estação chuvosa, então, no período noturno, o microclima imediatamente abaixo das copas do Ficus e Mangueira manteve uma condição de temperatura mais

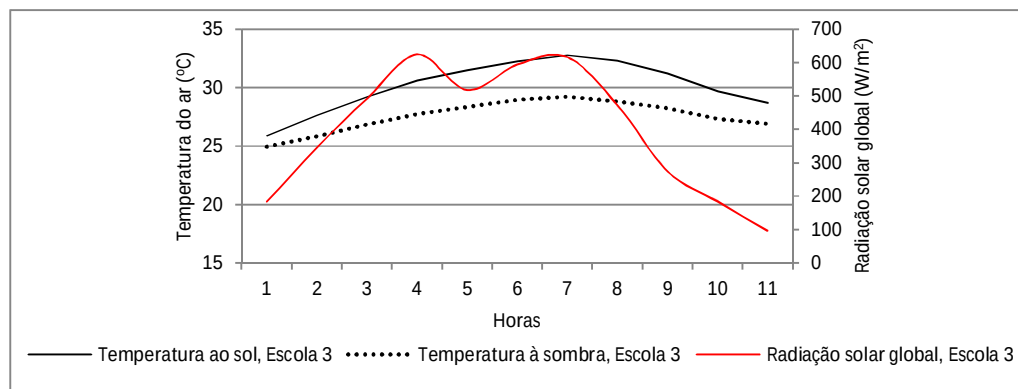
elevada e menor umidade relativa que a céu aberto. Este fenômeno não foi verificado no Oiti.



a)



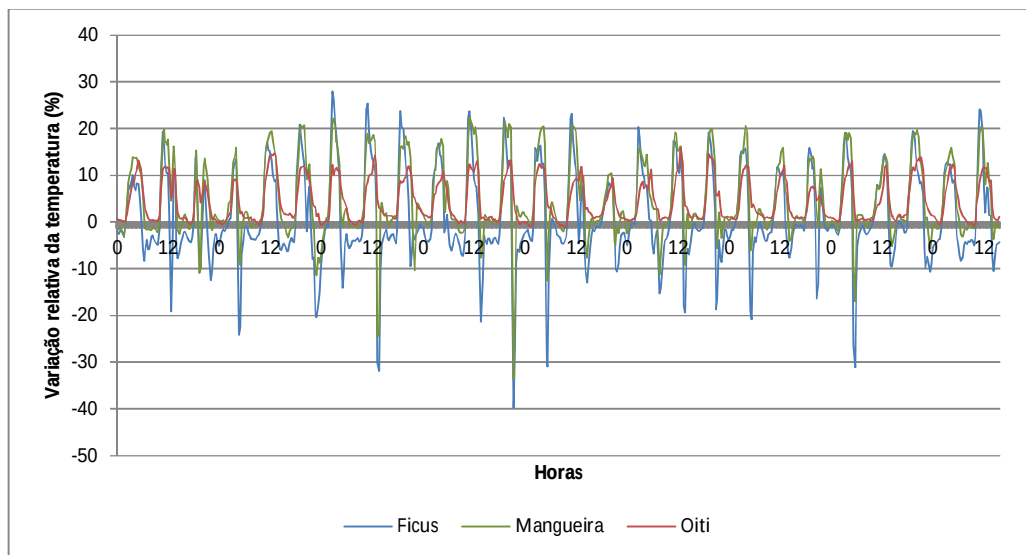
b)



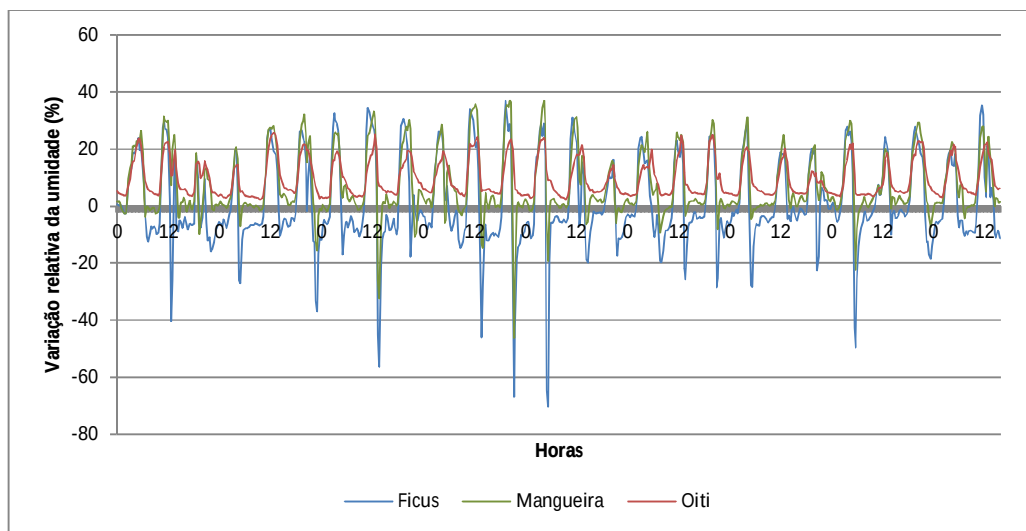
c)

**Figura 54** – Comportamento da temperatura e radiação solar ao longo de um dia de medição, Escola 1 (a), 2 (b) e 3 (c), estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

Tem-se, então, um efeito oásis no período diurno na estação chuvosa. Sob a copa do Oiti, a temperatura é  $2,3^{\circ}\text{C}$  menor que a céu aberto e a umidade, 8% maior. A temperatura sob a copa da Mangueira é  $3,37^{\circ}\text{C}$  menor que ao sol e a umidade, 12,57% maior. À sombra do Oiti, a temperatura é  $2,6^{\circ}\text{C}$  menor que ao sol e a umidade 11,07% maior.



a)



b)

**Figura 55** – Marcha horária da variação relativa da temperatura (a) e da umidade do ar (b) na condição de sol e sombra, estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

Comparando-se os três microclimas, tem-se menor incidência de radiação solar global na Escola 3, provavelmente relacionada à maior nebulosidade na região, que possui maior altitude dentre as três escolas (197m; 179m e 233m, respectivamente às escolas 1, 2 e 3) e a sua localização mais próxima dos limites externos do perímetro urbano. A temperatura ao sol, na Escola 3, foi ligeiramente menor que nas demais escolas, o que pode ser justificado pela sua localização mais afastada do centro da cidade (Figura 24), região onde se configura ilha de calor urbana, já caracterizada por Maitelli (1994), Pinho (2003), Sanches (2005). As temperaturas em regiões mais afastadas das regiões centrais, densamente construídas configuram menores valores.

Comparando-se as condições higro-térmicas ao sol e sombra, tem-se que o impacto da vegetação na temperatura e umidade sob a copa não pode ser percebido na estação seca, pois há pouca disponibilidade hídrica no solo para evaporação e a evapotranspiração das árvores é menos intenso que na estação chuvosa. Neste período, o efeito de maior relevância para o conforto é o bloqueio da radiação solar direta, que ameniza o aquecimento das superfícies sob a copa.

Na estação chuvosa, o impacto da vegetação na temperatura é maior, consolidando o papel de abrigo para climas quentes e úmidos. O sombreamento da copa minimiza os efeitos da radiação solar, diminuindo as temperaturas superficiais das áreas sombreadas e as temperaturas sob a projeção da copa (Tabela 19).

**Tabela 19** - Variação relativa da temperatura e umidade com o IAF e AFT, durante as horas de brilho solar, estação seca e chuvosa

|         | ESTAÇÃO/<br>ESPÉCIE | VR <sub>T</sub><br>(%) | VR <sub>U</sub><br>(%) | IAF<br>(m <sup>2</sup> m <sup>2</sup> ) | Diâmetro<br>da copa<br>(m) | Projeção<br>da copa<br>(m <sup>2</sup> ) | Volume<br>da copa<br>(m <sup>3</sup> ) | AFT<br>(m <sup>2</sup> ) |
|---------|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| SECA    | FICUS               | 0,16                   | 2,9                    | 7,23                                    | 4                          | 12,56                                    | 16,75                                  | 90,85                    |
|         | MANGUEIRA           | 0,51                   | 4,2                    | 8,3                                     | 10                         | 78,54                                    | 261,79                                 | 651,86                   |
| CHUVOSA | FICUS               | 6,75                   | 10,06                  | 5,48                                    | 4                          | 12,56                                    | 16,75                                  | 68,9                     |
|         | MANGUEIRA           | 10,55                  | 15,17                  | 10,1                                    | 10,89                      | 93,14                                    | 338,09                                 | 940,7                    |
|         | OUTI                | 8,31                   | 14,53                  | 7,4                                     | 12,04                      | 113,85                                   | 456,92                                 | 842,5                    |

1 Projeção circular da copa

2 Metade do volume de um elipsóide

Esses resultados corroboram com Spangenberg et al. (2208) e Mascaró et al. (2011) dentre outros. Verificou-se, na estação chuvosa, correlação positiva entre a atenuação da temperatura e IAF ( $R^2=0,93$ ) e AFT ( $R^2=0,75$ ). Para a atenuação da umidade, a correlação também é positiva com o IAF ( $R^2=0,76$ ) e AFT ( $R^2=1,0$ ).

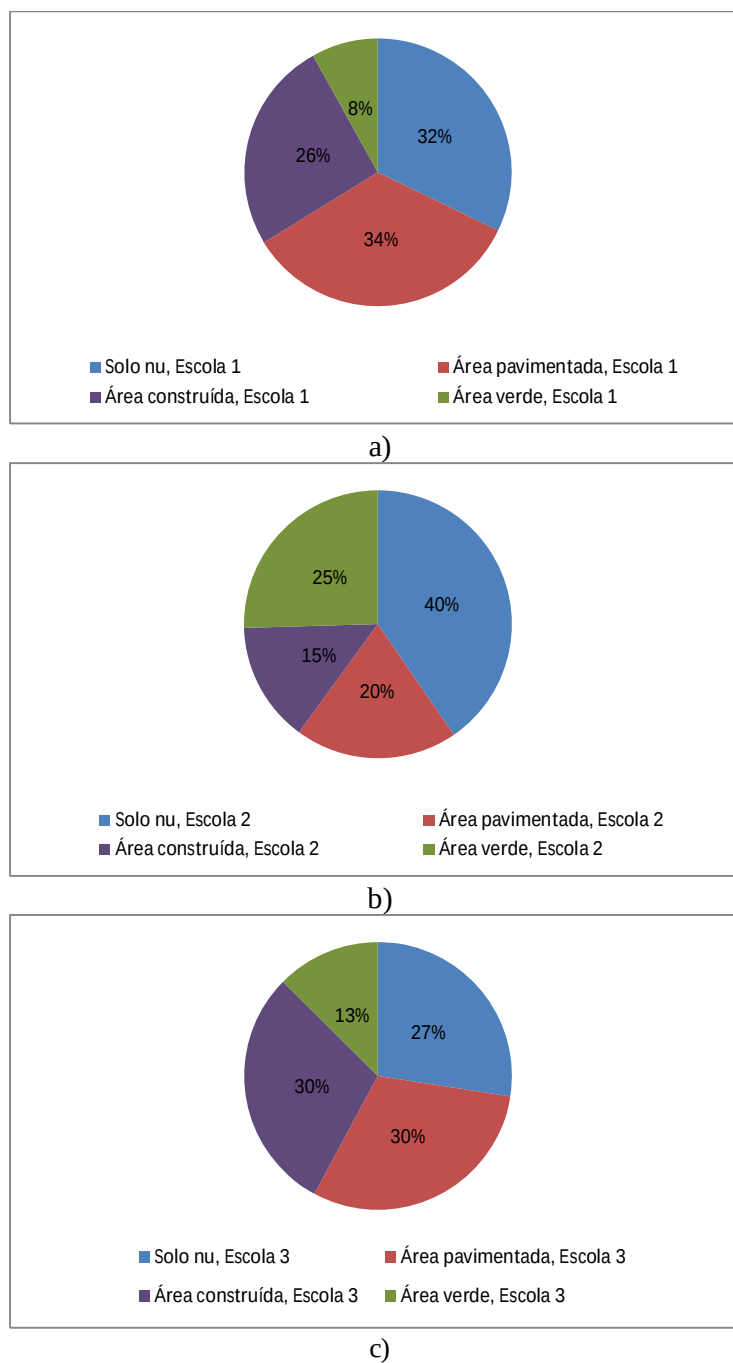
#### **4.1.4. O uso e ocupação do solo nas três escolas**

As Escolas 2 e 3 apresentaram temperatura menor e umidade maior que a Escola 1, configurando ambiente termo-higrométrico mais ameno, o que pode ser justificado pelo uso e ocupação do solo diferenciado que se tem nas duas Escolas.

Por meio do levantamento das unidades arbóreas (UA) das três escolas, classificaram-se as mesmas em termos de existência de área verde em ordem decrescente: Escola 2 (80UA e 3547,88m<sup>2</sup> de projeção das copas – 25%), Escola 3 (29UA e 1433,24m<sup>2</sup> de projeção das copas - 13%) e Escola 1 (31 UA e 914,77m<sup>2</sup> de projeção das copas – 8%).

Quanto ao posicionamento das unidades arbóreas no terreno das escolas, as áreas verdes são mais densas e compactas na Escola 2. A Escola 1, além de possuir menor quantidade de área verde, apresenta uma distribuição periférica da mesma no terreno. Em termos de porte, a Escola 2 abriga as espécies de maior porte e a Escola 1, as de menor porte.

A Escola 2 apresenta maior fração de área verde, menor fração de área pavimentada e construída e maior fração de solo nu, se comparada à Escola 1 (Figura 56). A Escola 3 possui fração de área verde e pavimentada intermediária, com menor fração de solo nu.



**Figura 56** - Uso e ocupação do solo nas Escolas 1 (a), 2 (b) e 3 (c)

Na Escola 2, tem-se 20% de área pavimentada, na Escola 3, tem-se 30% e na Escola 1, 34%, o que justifica as menores temperaturas médias encontradas nas duas primeiras em relação à terceira. Já as máximas podem estar relacionadas à

fração de área de solo nu, maior na Escola 2, que justifica o maior valor encontrado frente às Escolas 1 e 3, pois áreas de solo nu apresentam maior temperatura superficial, sendo esta maior, inclusive, que as áreas pavimentadas. Esses resultados corroboram com Callejas e Durante et al. (2011).

## 4.2. SOMBREAMENTO ARBÓREO E DESEMPENHO TERMO-LUMÍNICO DAS SALAS

### 4.2.1. Insolação nas salas

Os ângulos de sombra verticais frontais ( $\alpha$ ) da fachada principal e secundária das escolas são de 20 e 35°, respectivamente. Os ângulos verticais laterais ( $\gamma$ ) e horizontais ( $\beta$ ) que ocorrem nas fachadas principal e secundária das salas com e sem sombreamento arbóreo constam da Tabela 20. Esses ângulos foram medidos em plantas, cortes e fachadas das salas para cada uma das janelas baixas (J13 e J33) localizadas na parede da fachada secundária e, altas (J11 e J13), localizadas na parede da fachada principal.

**Tabela 20** - Ângulos de sombra devido a elementos da própria edificação

| SALA                                       | ÂNGULOS DE SOMBRA (graus) |           |           |            |            |                    |           |           |            |            |
|--------------------------------------------|---------------------------|-----------|-----------|------------|------------|--------------------|-----------|-----------|------------|------------|
|                                            | FACHADA PRINCIPAL         |           |           |            |            | FACHADA SECUNDÁRIA |           |           |            |            |
|                                            | $\alpha$                  | $\beta d$ | $\beta e$ | $\gamma d$ | $\gamma e$ | $\alpha$           | $\beta d$ | $\beta e$ | $\gamma d$ | $\gamma e$ |
| 1sl(J13) e 1slJ(33)                        | 20                        | -         | 6         | 8          | 8          | 35                 | 6         | -         | 8          | 8          |
| 1sb(J11) e 1sb(J31)                        | 20                        |           | -         | 7          | 12         | 35                 | -         |           | 12         | 7          |
| 2sl(J13) e 3sl(J13)<br>2sb(J13) e 3sb(J13) | 20                        | -         | 6         | 8          | 8          | 35                 | 6         | -         | 8          | 8          |
| 2sb(J11) e 2sb(J31)<br>3sb(J11) e 3sb(J31) | 20                        |           | -         | 8          | 8          | 35                 | -         |           | 8          | 8          |

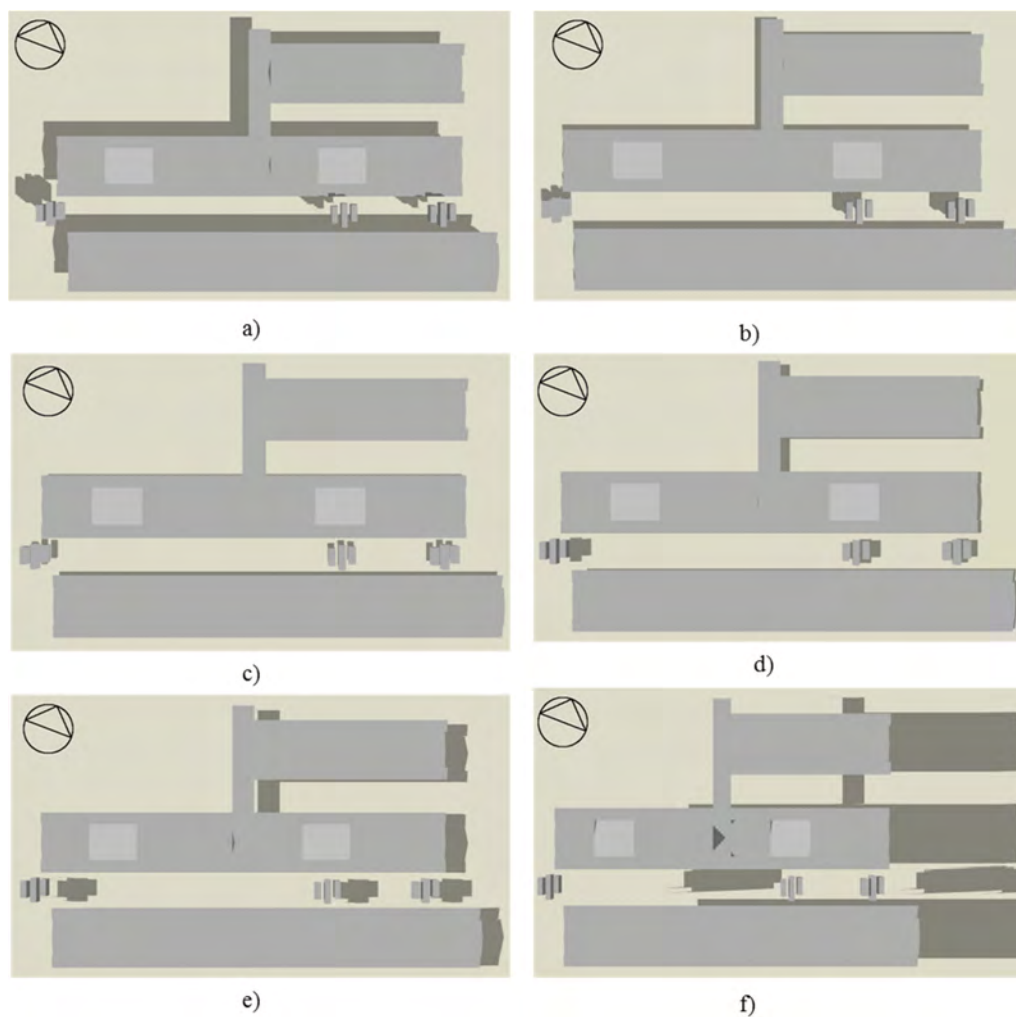
J13 e J33 = janela baixa e J11 e J13 = janela alta

Nos ângulos de sombra devidos a obstruções externas, foram consideradas as obstruções causadas pelos blocos adjacentes e pelas unidades arbóreas, conforme consta na Tabela 21.

**Tabela 21** - Ângulos de sombra devido a obstruções externas à edificação

| SALA     | ÂNGULOS DE SOMBRA (graus)                       |                                                   |                                                   |            |            | OBSERVAÇÕES          |
|----------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------|------------|----------------------|
|          | $\alpha$                                        | $\beta d$                                         | $\beta e$                                         | $\gamma d$ | $\gamma e$ |                      |
| 1sl(J11) | 19                                              | 79                                                |                                                   |            | 15         |                      |
| 1sl(J31) | 19                                              | 69                                                |                                                   |            | 19         |                      |
| 1sl(J13) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | sem obstruções       |
| 1sl(J33) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | sem obstruções       |
| 1sb(J11) | $\alpha_1=19$<br>$\alpha_2=35$<br>$\alpha_3=19$ |                                                   | $\beta e_1=0$<br>$\beta e_2=43$<br>$\beta e_3=78$ | 16         |            |                      |
| 1sb(J31) | $\alpha_1=19$<br>$\alpha_2=53$<br>$\alpha_2=19$ | $\beta e_1=0$<br>$\beta e_2=43$<br>$\beta e_3=78$ | 78                                                | 16         |            |                      |
| 1sb(J13) | 12                                              | 71                                                |                                                   |            | 15         |                      |
| 1sb(J33) | 12                                              | 68                                                |                                                   |            | 17         |                      |
| 2sl(J11) | 28                                              |                                                   |                                                   | 67         | 28         |                      |
| 2sl(J31) | 28                                              |                                                   |                                                   | 71         | 28         |                      |
| 2sl(J13) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | sem obstruções       |
| 2sl(J33) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | sem obstruções       |
| 2sb(J11) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | totalmente obstruída |
| 2sb(J31) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | totalmente obstruída |
| 2sb(J13) | 5                                               | 43                                                |                                                   | 2          |            |                      |
| 2sb(J33) | 5                                               | 34                                                |                                                   | 2          |            |                      |
| 3sl(J11) | 19                                              | 64                                                |                                                   | 71         | 9          |                      |
| 3sl(J31) | 19                                              | 64                                                |                                                   | 71         | 11         |                      |
| 3sl(J13) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | sem obstruções       |
| 3sl(J33) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | sem obstruções       |
| 3sb(J11) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | totalmente obstruída |
| 3sb(J31) |                                                 |                                                   |                                                   |            |            | totalmente obstruída |
| 3sb(J13) | 19                                              | 23                                                |                                                   |            | 11         |                      |
| 3sb(J33) | 19                                              | 19                                                |                                                   |            | 13         |                      |

Na Escola 1, o Ficus proporciona sombreamento na fachada 159° até as 10h (Figura 57).



**Figura 57** – Sombreamento na Escola 1 às 8h (a), 10h (b), 12h (c), 14h (d), 16h (e) e 18h (f) devido às obstruções da própria edificação e das unidades arbóreas, no solstício de verão

As Tabelas 22 e 23 apresentam o sombreamento das aberturas das salas sem sombreamento (1sl) e com sombreamento (1sb), unificando a descrição para as janelas de mesma fachada pela situação mais desfavorável, já que as diferenças entre elas são muito pequenas.

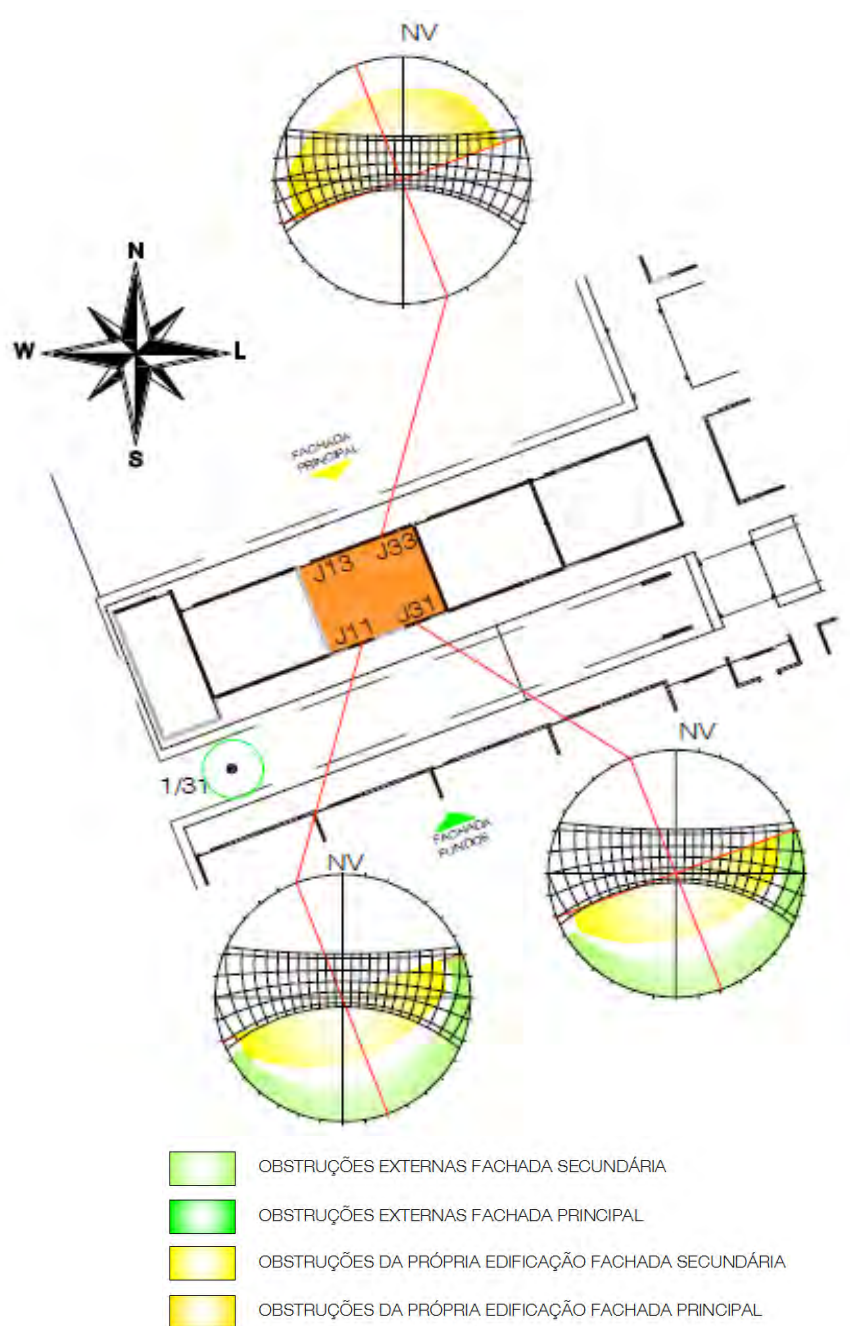
**Tabela 22** – Insolação na sala sem sombreamento, Escola 1 (1sl)

| JANELA                    | DATA                 | INSOLAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1sl(J11)<br>e<br>1sl(J31) | 21/01<br>e<br>22/11  | Sem insolação – do alvorecer até as 13h15min<br>Proteção do beiral – das 13h15min às 17h45min<br>Insolação – das 17h45min até o crepúsculo                                                                                                                                                       |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11  | Sem insolação – do alvorecer até as 11h10min<br>Proteção do beiral – das 11h10min às 17h40min<br>Insolação – das 17h40min até o crepúsculo                                                                                                                                                       |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09  | Sem insolação – do alvorecer até as 9h45min<br>Proteção do beiral – das 9h45min às 17h30min<br>Insolação – das 17h30min até o crepúsculo                                                                                                                                                         |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08  | Sem insolação – do alvorecer até as 8h30min<br>Proteção do beiral – das 8h30min às 17h10min<br>Insolação – das 17h10min até o crepúsculo                                                                                                                                                         |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07  | Sem insolação – do alvorecer até as 7h20min<br>Proteção do beiral – das 7h20min às 16h40min<br>Insolação – das 16h40min até o crepúsculo                                                                                                                                                         |
|                           | 22/06                | Sem insolação – do alvorecer até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h30min às 16h40min<br>Insolação – das 16h40min até o crepúsculo                                                                                                                                                         |
|                           | 22/12                | Sem insolação – do alvorecer até as 14h30min<br>Proteção do beiral – das 14h30min às 17h45min<br>Insolação – das 17h45min até o crepúsculo                                                                                                                                                       |
| 1sl(J13)<br>e<br>1sl(J33) | 21/01<br>e<br>22/11  | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até as 6h10min<br>Insolação – das 6h10min até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h30min às 14h30min<br>Sem insolação – das 14h30min às 17h<br>Proteção do beiral – das 17h às 17h45min<br>Insolação – das 17h45min até o crepúsculo            |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11  | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até as 6h10min<br>Insolação – das 6h10min até as 7h15min<br>Proteção do beiral – das 7h15min às 13h<br>Sem insolação – das 13h até o crepúsculo                                                                                                     |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09  | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até as 6h30min<br>Insolação – das 6h30min até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 9h45min<br>Sem insolação – das 9h45min até o crepúsculo                                                                                                       |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08  | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até as 6h30min<br>Insolação – das 6h30min até as 7h10min<br>Proteção do beiral – das 7h10min às 8h20min<br>Sem insolação – das 8h20min até o crepúsculo                                                                                             |
|                           | 21/05, 22/06 e 24/07 | Sem insolação                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                           | 22/12                | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até as 6h10min<br>Insolação – das 6h10min até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h30min às 14h30min<br>Sem insolação – das 14h30min até as 17h<br>Proteção do beiral – das 17h até às 17h45min<br>Sem proteção – das 17h45min até o crepúsculo |

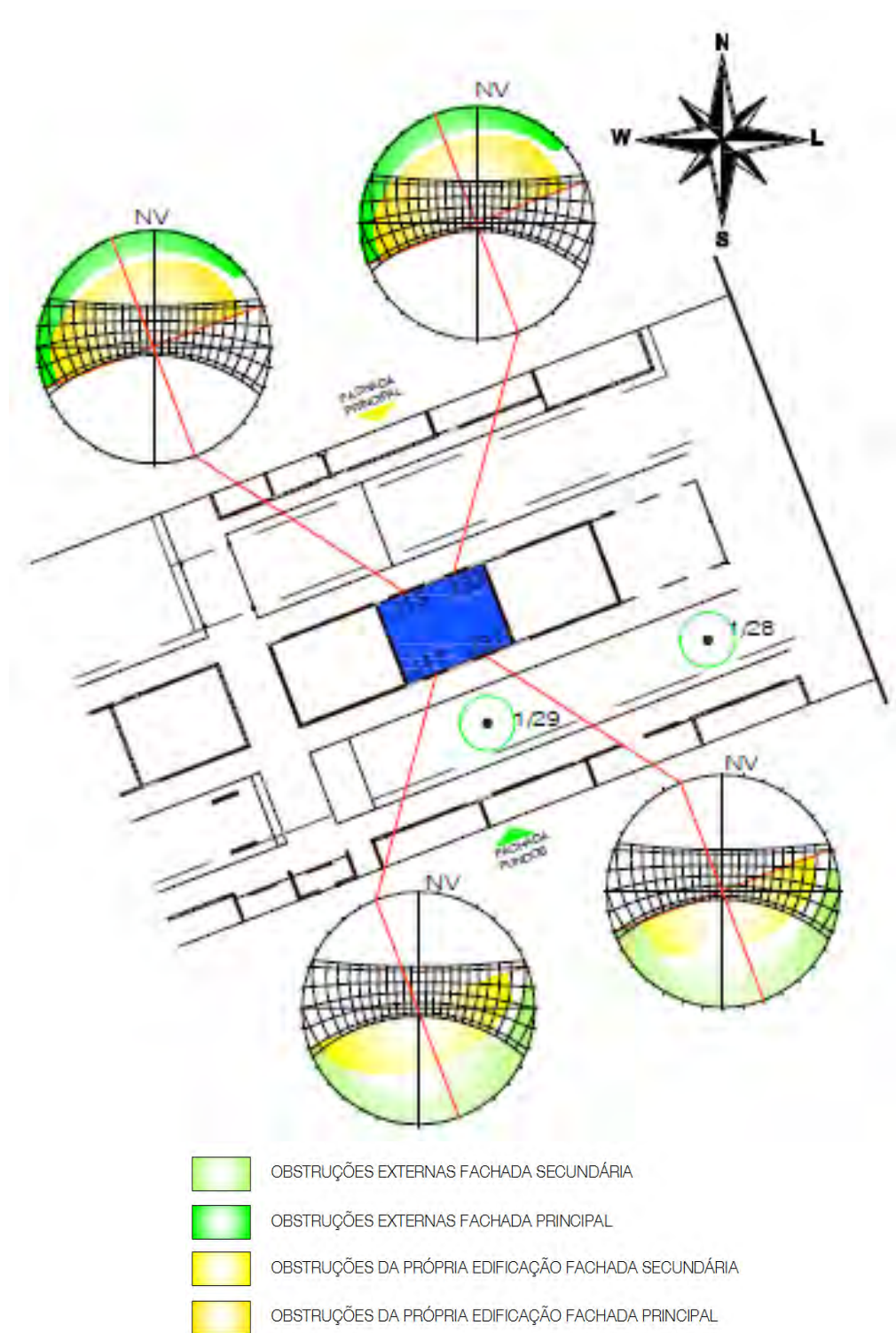
**Tabela 23** – Insolação na sala com sombreamento, Escola 1 (1sb)

| JANELA                    | DATA                | INSOLAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1sb(J11)<br>e<br>1sb(J31) | 21/01<br>e<br>22/11 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer às 6h40min<br>Insolação – das 6h40min às 7h20min<br>Proteção do beiral – das 7h20min até as 15h<br>Sem insolação: das 15h até as 17h<br>Proteção de obstrução externa: das 17h até o crepúsculo                                                            |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer às 6h40min<br>Insolação – das 6h40min às 7h15min<br>Proteção do beiral – das 7h15min até as 11h20min<br>Sem insolação: das 11h20min até o crepúsculo                                                                                                       |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer às 6h30min<br>Insolação – das 6h30min às 6h50min<br>Proteção do beiral – das 6h50min até as 10h<br>Sem insolação: das 10h até o crepúsculo                                                                                                                 |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer às 6h30min<br>Insolação – das 6h30min às 7h05min<br>Proteção do beiral – das 7h05min até as 8h30min<br>Sem insolação: das 8h30min até o crepúsculo                                                                                                         |
|                           | 21/05, 22/06, 24/07 | Sem insolação                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                           | 22/12               | Proteção de obstrução externa – do alvorecer às 6h10min<br>Insolação – das 6h10min às 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h30min até as 14h30min<br>Sem insolação: das 14h30min até 17h<br>Proteção do beiral: das 17h até as 17h15min<br>Proteção de obstrução externa: das 17h15min até o crepúsculo |
| 1sb(J13)<br>e<br>1sb(J33) | 21/01<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 14h15min<br>Proteção do beiral – das 14h15min às 17h50min<br>Proteção de obstrução externa – das 17h50min até ao crepúsculo                                                                                                                                         |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 11h15min<br>Proteção do beiral – das 11h15min às 17h40min<br>Proteção de obstrução externa – das 17h40min ao crepúsculo                                                                                                                                             |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Sem insolação – do alvorecer até as 9h50min<br>Proteção do beiral – das 9h50min às 17h30min<br>Proteção de obstrução externa – das 17h30min ao crepúsculo                                                                                                                                               |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Sem insolação – do alvorecer até as 8h30min<br>Proteção do beiral – das 8h30min às 17h10min<br>Proteção de obstrução externa – das 17h10min ao crepúsculo                                                                                                                                               |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Insolação – do alvorecer até as 7h20min<br>Proteção do beiral – das 7h20min às 16h30min<br>Insolação – das 16h30min até 16h50min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h50min ao crepúsculo                                                                                                          |
|                           | 22/06               | Insolação – do alvorecer até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h30min às 16h20min<br>Insolação – das 16h20min até 16h45min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h45min ao crepúsculo                                                                                                          |
|                           | 22/12               | Sem insolação – do alvorecer até as 14h30min<br>Proteção do beiral: das 14h30min até as 17h50min<br>Proteção de obstrução externa: das 17h50min até o crepúsculo                                                                                                                                        |

As Figuras 58 e 59 apresentam as máscaras de sombra das obstruções devidas aos elementos externos (bloco vizinho ou unidades arbóreas de sombreamento) em cada janela, nas salas da Escola 1, uma vez que as mesmas se distinguem em cada uma delas.



**Figura 58** – Máscara de sombra, devida às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, na sala sem sombreamento, Escola 1 (1sl)



**Figura 59** – Máscara de sombra, devida às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, na sala com sombreamento, Escola 1 (1sb)

Os beirais promovem sombreamento da fachada principal ( $339^{\circ}$ - nordeste) e da secundária ( $159^{\circ}$ - sudeste) da Escola 1, desde o começo da manhã até o final da tarde. Pela fachada principal, a sala sl não tem obstruções externas (Figura 60-a) e a sala sb tem, como obstrução externa na fachada principal, o bloco da frente (Figura 60-b).



a)



b)

**Figura 60** – Condição de sombreamento da sala sem sombreamento (1sl) (a) e com sombreamento (1sb) (b) pela fachada principal –  $339^{\circ}$

Pela fachada secundária, na sala sl, a unidade arbórea 31 não promove sombreamento (Figura 61-a) e na sala sb, a máscara revela a ocorrência da unidade arbórea 29, mas que, devido à sua posição, não proporciona sombreamento na fachada SE (Figura 61-b).



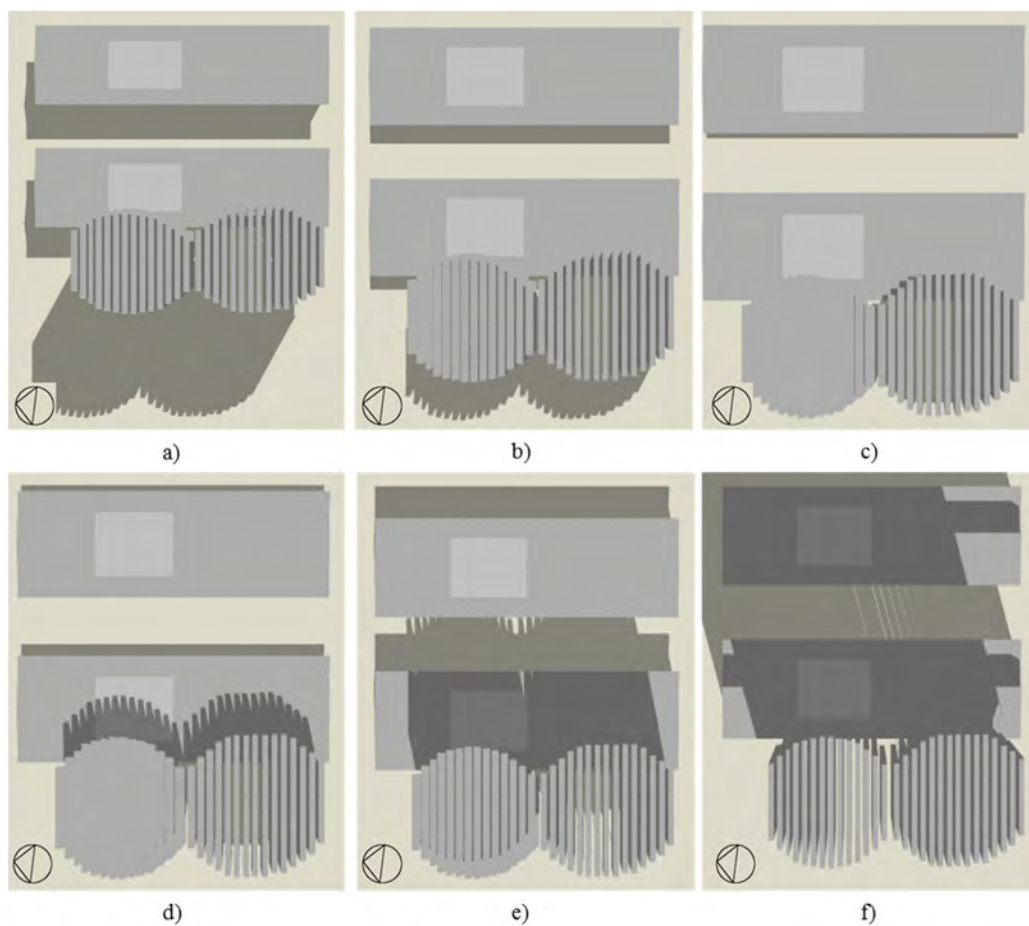
a)



b)

**Figura 61** – Condição de exposição ao sol da sala sem sombreamento (1sl) pela fachada secundária –  $159^{\circ}$  (a) e da sala com sombreamento (1sb) pela unidade arbórea 29, da espécie *Ficus* pela fachada secundária –  $159^{\circ}$  (b), Escola 1

Na Escola 2, a Mangueira proporciona sombreamento da fachada noroeste ( $263^{\circ}$ ) a partir das 14h até o final do dia, bem como da cobertura da sala (Figura 62).



**Figura 62** – Sombreamento na Escola 2 às 8h (a), 10h (b), 12h (c), 14h (d), 16h (e) e 18h (f) devido às obstruções da própria edificação e das unidades arbóreas, no solstício de verão

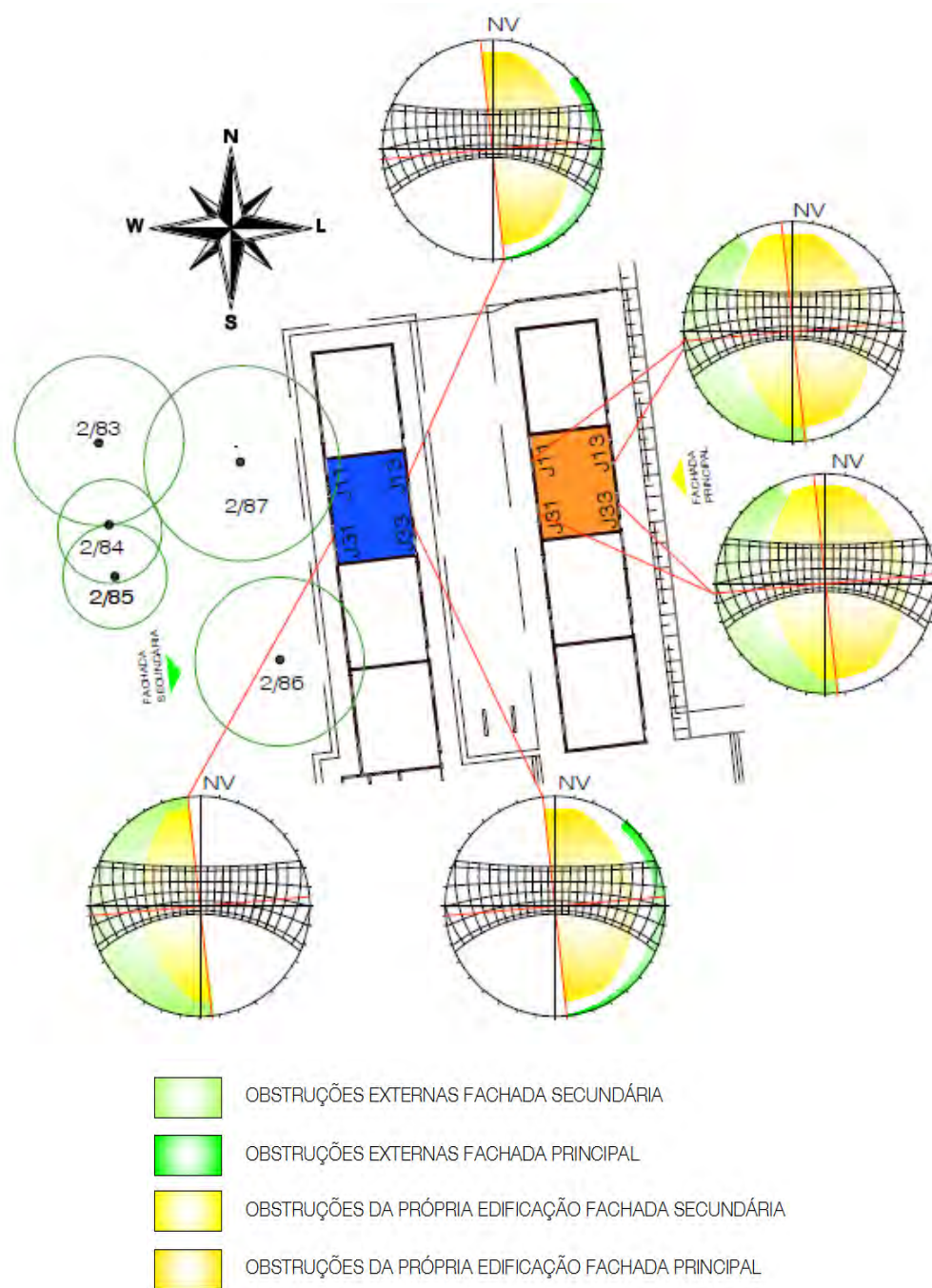
As Tabelas 24 e 25 apresentam o sombreamento das aberturas das salas 2sl e 2sb, unificando a descrição para as janelas de mesma fachada pela situação mais desfavorável, já que as diferenças entre elas são mínimas. As janelas encontram-se identificadas conforme a planta da Figura 63.

**Tabela 24 - Insolação na sala sem sombreamento da Escola 2 (2sl)**

| JANELA                    | DATA                | INSOLAÇÃO                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2sl(J11)<br>e<br>2sl(J31) | 21/01<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h<br>Proteção do beiral – das 12h às 15h45min<br>Insolação – das 15h45min até as 16h50min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h50min até o crepúsculo           |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h<br>Proteção do beiral – das 12h às 15h40min<br>Insolação – das 15h40min até as 16h45min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h45min até o crepúsculo           |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h10min<br>Proteção do beiral – das 12h10min às 15h40min<br>Insolação – das 15h40min até as 16h10min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h10min até o crepúsculo |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h10min<br>Proteção do beiral – das 12h10min às 15h30min<br>Insolação – das 15h30min até as 16hmin<br>Proteção de obstrução externa – das 16hmin até o crepúsculo     |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h15min<br>Proteção do beiral – das 12h15 às 15h20min<br>Insolação – das 15h20min até as 15h50min<br>Proteção de obstrução externa – das 15h50min até o crepúsculo    |
|                           | 22/06               | Sem insolação – do alvorecer até as 12h15min<br>Proteção do beiral – das 12h15 às 15h20min<br>Insolação – das 15h20min até as 15h50min<br>Proteção de obstrução externa – das 15h50min até o crepúsculo    |
|                           | 22/12               | Sem insolação – do alvorecer até as 12h<br>Proteção do beiral – das 12h às 15h45min<br>Insolação – das 15h45min até as 16h30min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h30min até o crepúsculo           |
| 2sl(J13)<br>e<br>2sl(J33) | 21/01<br>e<br>22/11 | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h<br>Sem insolação – das 12h até o crepúsculo                                                                                       |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Insolação – do alvorecer até as 7h15min<br>Proteção do beiral – das 7h15min às 12h<br>Sem insolação – das 12h até o crepúsculo                                                                             |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Insolação – do alvorecer até as 6h50min<br>Proteção do beiral – das 6h50min às 12h10min<br>Sem insolação – das 12h10min até o crepúsculo                                                                   |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Insolação – do alvorecer até as 7h40min<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h15min<br>Sem insolação – das 12h15 até o crepúsculo                                                                           |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Insolação – do alvorecer até às 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h15min<br>Sem insolação – das 12h15 até o crepúsculo                                                                                |
|                           | 22/06               | Insolação – do alvorecer até as 7h50min<br>Proteção do beiral – das 7h50min às 12h15min<br>Sem insolação – das 12h15 até o crepúsculo                                                                      |
|                           | 22/12               | Insolação – do alvorecer até as 6h50min<br>Proteção do beiral – das 6h50min às 12hmin<br>Sem insolação – das 12h até o crepúsculo                                                                          |

**Tabela 25-** Insolação na sala com sombreamento da Escola 2 (2sb)

| JANELA                    | DATA                | INSOLAÇÃO                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2sb(J11)<br>e<br>2sb(J31) | 21/01<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h<br>Proteção do beiral – das 12h às 15h45min<br>Proteção da UA87 – das 15h45min até o crepúsculo                                                                |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h<br>Proteção do beiral – das 12h às 15h40min<br>Proteção da UA87 – das 16h45min até o crepúsculo                                                                |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h10min<br>Proteção do beiral – das 12h10min às 15h40min<br>Proteção da UA87 – das 16h10min até o crepúsculo                                                      |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h10min<br>Proteção do beiral – das 12h10min às 15h30min<br>Proteção da UA87 – das 16hmin até o crepúsculo                                                        |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h15min<br>Proteção do beiral – das 12h15 às 15h20min<br>Proteção da UA87 – das 15h50min até o crepúsculo                                                         |
|                           | 22/06               | Sem insolação – do alvorecer até as 12h15min<br>Proteção do beiral – das 12h15 às 15h20min<br>Proteção da UA87 – das 15h50min até o crepúsculo                                                         |
|                           | 22/12               | Sem insolação – do alvorecer até as 12h<br>Proteção do beiral – das 12h às 15h45min<br>Proteção da UA87 – das 16h30min até o crepúsculo                                                                |
|                           |                     |                                                                                                                                                                                                        |
| 2sb(J13)<br>e<br>2sb(J33) | 21/01<br>e<br>22/11 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até às 5h50min<br>Insolação – das 5h50min até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h<br>Sem insolação – das 12h até o crepúsculo                     |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até às 6h10min<br>Insolação – do alvorecer até as 7h15min<br>Proteção do beiral – das 7h15min às 12h<br>Sem insolação – das 12h até o crepúsculo          |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até às 6h15min<br>Insolação – das 6h15min até as 6h50min<br>Proteção do beiral – das 6h50min às 12h10min<br>Sem insolação – das 12h10min até o crepúsculo |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até às 6h30min<br>Insolação – das 6h30min até as 7h40min<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h15min<br>Sem insolação – das 12h15min até o crepúsculo      |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até às 6h40min<br>Insolação – das 6h40min até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h15min<br>Sem insolação – das 12h15min até o crepúsculo           |
|                           | 22/06               | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até às 6h45min<br>Insolação – das 6h45min até as 7h50min<br>Proteção do beiral – das 7h50min às 12h15min<br>Sem insolação – das 12h15min até o crepúsculo |
|                           | 22/12               | Proteção de obstrução externa – do alvorecer até às 6h50min<br>Insolação – das 6h50min até as 6h50min<br>Proteção do beiral – das 6h50min às 12hmin<br>Sem insolação – das 12h até o crepúsculo        |
|                           |                     |                                                                                                                                                                                                        |



**Figura 63** – Máscara de sombra, devido às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, nas salas sem sombreamento (2sl) e com sombreamento (2sb), Escola 2

Pela fachada principal, a sala sl não apresenta obstruções externas (Figura 64-a) e os beirais proporcionam proteção desde as 8h. Pela fachada secundária, os

beirais proporcionam sombra até as 15h30min, no solstício de inverno, e até as 15h45min, no solstício de verão (Figuras 64-b).

A obstrução proporcionada pelo bloco da frente na sala 2sb proporciona sombreamento do nascer do sol até as 6h, haja vista que o bloco da frente está locado em platô com 1m de desnível em relação à sala sb. Pela fachada secundária orientada á sudoeste (263°), a sala sb é totalmente obstruída (Figura 64-c).



a)



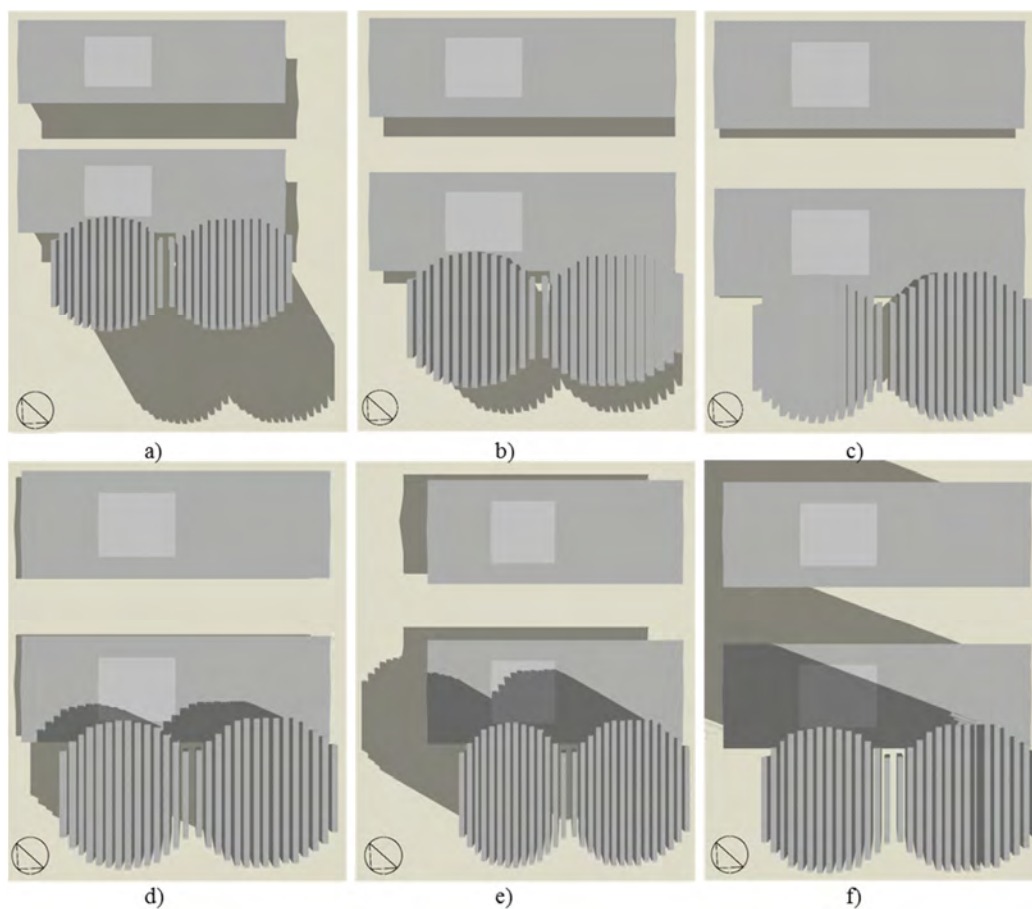
b)



c)

**Figura 64** – Condição de exposição da sala sem sombreamento (2sl) pela fachada principal - 83° (a), da sala sem sombreamento (2sl) pela fachada secundaria - 263° e da sala com sombreamento (2sb) pela fachada principal - 83° (b) e da sala com sombreamento (2sb) pela fachada secundária - 263° - com proteção total pelas unidades arbóreas 2/86 e 2/87 da espécie Mangueira (c)

Na Escola 3, o Oiti proporciona sombreamento da fachada noroeste ( $318^\circ$ ) a partir das 14h até o final do dia, bem como da cobertura da sala (Figura 65).



**Figura 65** – Sombreamento na Escola 3 às 8h (a), 10h (b), 12h (c), 14h (d), 16h (e) e 18h (f) devido às obstruções da própria edificação e das unidades arbóreas, no solstício de verão

As Tabelas 26 e 27 apresentam o sombreamento das aberturas das salas 2sl e 2sb, unificando a descrição para as janelas de mesma fachada pela situação mais desfavorável, já que as diferenças entre elas são muito pequenas.

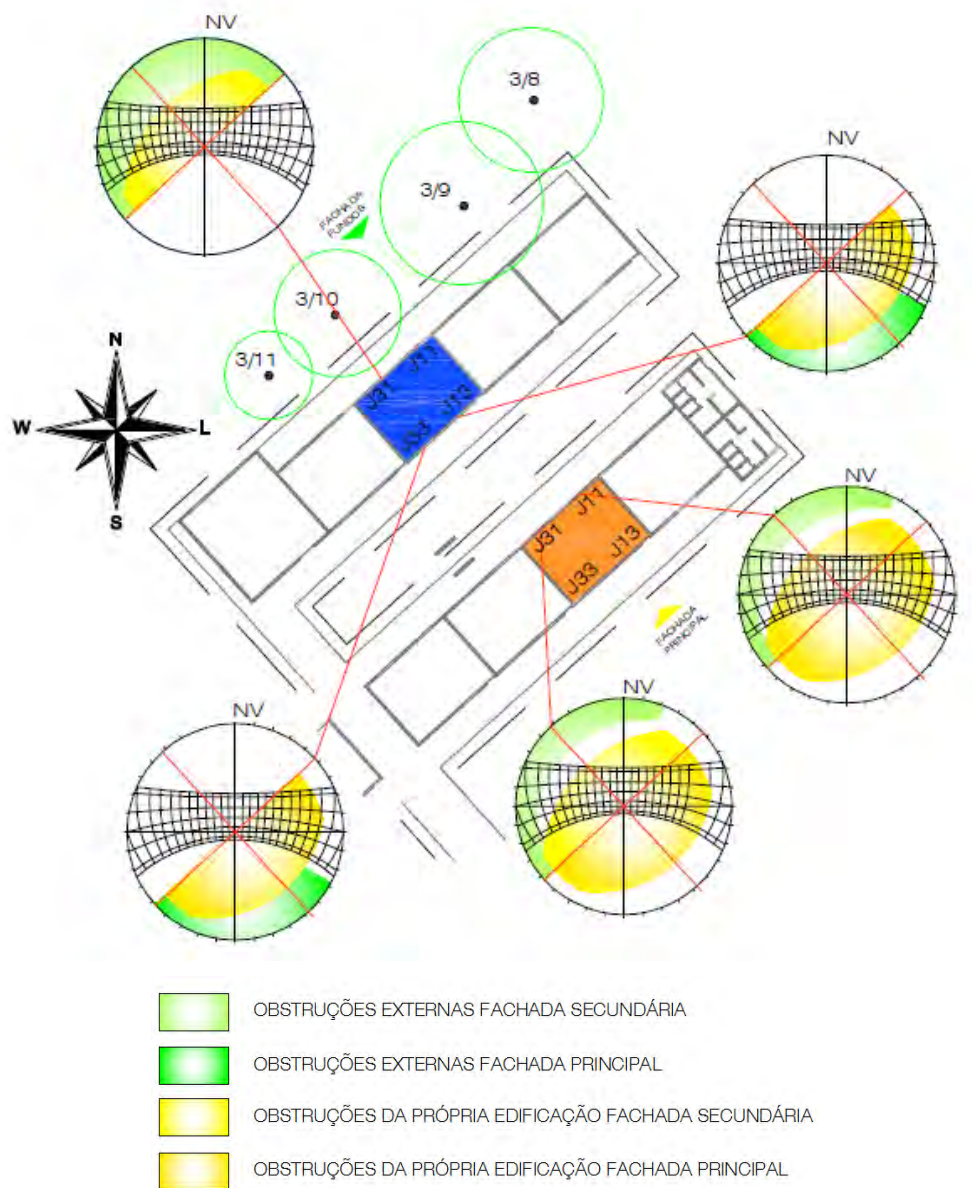
**Tabela 26** – Insolação na sala sem sombreamento, Escola 3 (3sl)

| JANELA                    | DATA                | INSOLAÇÃO                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3sl(J11)<br>e<br>3sl(J31) | 21/01<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h20min<br>Proteção do beiral – das 12h20min até as 17h10min<br>Insolação – das 17h10min até as 17h50min<br>Proteção de obstrução externa – das 17h50min até o crepúsculo |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Sem insolação – do alvorecer até as 12h30min<br>Proteção do beiral – das 12h30min até as 16h30min<br>Insolação – das 16h30min até as 17h20min<br>Proteção de obstrução externa – das 17h20min até o crepúsculo |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Sem insolação – do alvorecer até as 11h<br>Proteção do beiral – das 11h até as 15h<br>Insolação – das 15h até as 17h<br>Proteção de obstrução externa – das 17h até o crepúsculo                               |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Sem insolação – do alvorecer até as 10h15min<br>Proteção do beiral – das 10h15min até as 15h25min<br>Insolação – das 15h25min até as 16h40min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h40min até o crepúsculo |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Sem insolação – do alvorecer até as 9h30min<br>Proteção do beiral – das 9h30min até as 14h45min<br>Insolação – das 14h45min até as 16h15min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h15min até o crepúsculo   |
|                           | 22/06               | Sem insolação – do alvorecer até as 10h15min<br>Proteção do beiral – das 10h15min até as 15h25min<br>Insolação – das 15h25min até as 16h40min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h40min até o crepúsculo |
|                           | 22/12               | Sem insolação – do alvorecer até as 9h15min<br>Proteção do beiral – das 9h15min até às 14h35min<br>Insolação – das 14h35min até as 16h10min<br>Proteção de obstrução externa – das 16h10min até o crepúsculo   |
| 3sl(J13)<br>e<br>3sl(J33) | 21/01<br>e<br>22/11 | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h as 12h40min<br>Sem insolação – das 12h40min até o crepúsculo                                                                                 |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 11h30min<br>Sem insolação – das 11h40min até o crepúsculo                                                                                 |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 10h15min<br>Sem insolação – das 10h15min até o crepúsculo                                                                                 |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Insolação – do alvorecer até as 7h10min<br>Proteção do beiral – das 7h10min às 10h15min<br>Sem insolação – das 10h15min até o crepúsculo                                                                       |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Insolação – do alvorecer até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h 30min às 9h30min<br>Sem insolação – das 9h30min até o crepúsculo                                                                        |
|                           | 22/06               | Insolação – do alvorecer até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h 30min às 9h15min<br>Sem insolação – das 9h15min até o crepúsculo                                                                        |
|                           | 22/12               | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h45min<br>Sem insolação – das 12h45min até o crepúsculo                                                                                 |

**Tabela 27 - Insolação na sala com sombreamento, Escola 3 (3sb)**

| JANELA                    | DATA                | INSOLAÇÃO                                                                                                                                          |
|---------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3sb(J11)<br>e<br>3sb(J31) | 21/01<br>e<br>22/11 | Sem insolação - do alvorecer até 12h30min<br>Proteção do beiral – das 12h30min até as 17h10min<br>Proteção da UA10 – das 17h10min até o crepúsculo |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Sem insolação - do alvorecer até 11h40min<br>Proteção do beiral – das 11h40min até as 16h30min<br>Proteção da UA10 – das 16h30min até o crepúsculo |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Sem insolação - do alvorecer até 11h<br>Proteção do beiral – das 11h até as 16h<br>Proteção da UA10 – das 16h até o crepúsculo                     |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Sem insolação - do alvorecer até 10h15min<br>Proteção do beiral – das 10h15min até as 15h30min<br>Proteção da UA10 – das 15h30min até o crepúsculo |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Sem insolação - do alvorecer até 9h15min<br>Proteção do beiral – das 9h15min até as 14h45min<br>Proteção da UA10 – das 14h45min até o crepúsculo   |
|                           | 22/06               | Sem insolação - do alvorecer até 12h30min<br>Proteção do beiral – das 12h30min até as 17h10min<br>Proteção da UA10 – das 17h10min até o crepúsculo |
|                           | 22/12               | Sem insolação - do alvorecer até 9h45min<br>Proteção do beiral – das 9h45min até as 14h40min<br>Proteção da UA10 – das 14h40min até o crepúsculo   |
|                           |                     |                                                                                                                                                    |
| 3sb(J13)<br>e<br>3sb(J33) | 21/01<br>e<br>22/11 | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h40min<br>Sem insolação – das 12h40min até o crepúsculo                     |
|                           | 23/02<br>e<br>22/11 | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 11h30min<br>Sem insolação – das 11h40min até o crepúsculo                     |
|                           | 21/03<br>e<br>23/09 | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 10h15min<br>Sem insolação – das 10h15min até o crepúsculo                     |
|                           | 16/04<br>e<br>28/08 | Insolação – do alvorecer até as 7h10min<br>Proteção do beiral – das 7h10min às 10h15min<br>Sem insolação – das 10h15min até o crepúsculo           |
|                           | 21/05<br>e<br>24/07 | Insolação – do alvorecer até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h 30min às 9h30min<br>Sem insolação – das 9h30min até o crepúsculo            |
|                           | 22/06               | Insolação – do alvorecer até as 7h30min<br>Proteção do beiral – das 7h 30min às 9h15min<br>Sem insolação – das 9h15min até o crepúsculo            |
|                           | 22/12               | Insolação – do alvorecer até as 7h<br>Proteção do beiral – das 7h às 12h45min<br>Sem insolação – das 12h45min até o crepúsculo                     |
|                           |                     |                                                                                                                                                    |

Na Escola 3, ocorre situação semelhante à Escola 2, na qual a sala 3sb é totalmente obstruída pela vegetação na fachada secundária, orientada a noroeste (318°) (Figuras 66 e 67-a).



**Figura 66** – Máscara de sombra, devida às obstruções externas e aos elementos da própria edificação, nas salas sem sombreamento (3sl) e com sombreamento (3sb), Escola 3

Na sala sl não há obstruções externas à edificação na fachada principal - (138°) – orientada a sudeste e, os beirais proporcionam sombreamento nessa fachada desde as 8h.

Pela fachada secundária, os beirais proporcionam sombreamento até as 14h30min no solstício de inverno e as 17h30min no solstício de verão (Figuras 66 e 67-b). As obstruções proporcionadas pelo bloco da frente da sala sb complementam a máscara após as 16h15min no solstício de inverno e após as 18h15min no solstício de verão. Desta forma, observa-se que ocorre incidência solar direta na sala sl no meio da tarde.



a)



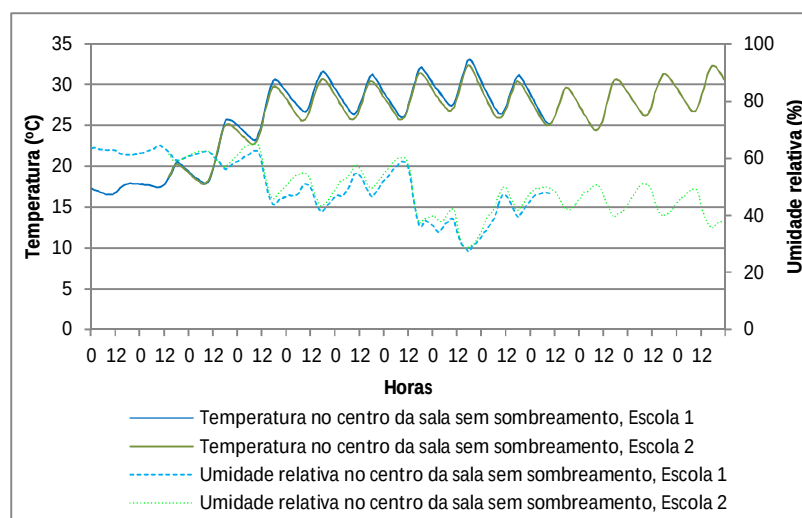
b)

**Figura 67** – Condição de exposição ao sol da sala com sombreamento (3sb) com proteção total pelas unidades arbóreas 3/10 e 3/11 da espécie Oiti (a) e das salas sem sombreamento (3sl) pela fachada secundária – 318° - e com sombreamento (3sb) pela fachada principal – 138° (b)

#### 4.2.2. Desempenho termo-lumínico das salas na estação seca

Os dias 22, 23, 24 e 25/07 caracterizaram quatro dias típicos da estação seca, com temperaturas máximas, médias e mínimas de cerca de 36, 28 e 21°C, respectivamente, e umidade de cerca 49%. Estes valores estão de acordo com os de Campelo Junior, Priante e Caseiro (1992) para o mês de julho, que indicam os valores de 31,9; 22,8 e 16,6, respectivamente, e umidade de 65%.

A Figura 68 apresenta a marcha horária das medições de temperatura e umidade no centro das salas expostas das Escolas 1 e 2, na qual se visualiza que a condição da Escola 2 é melhor, apresentando menor temperatura e maior umidade, o que refletirá melhores condições de conforto térmico em seu interior.

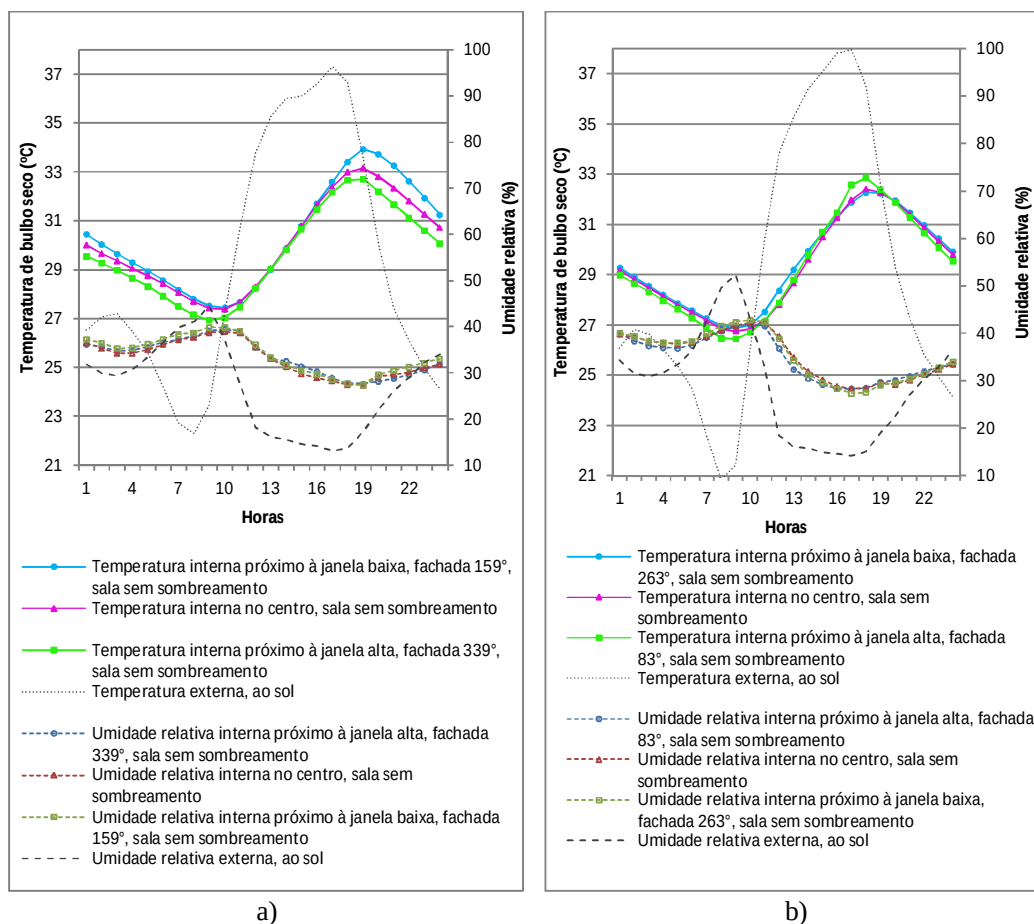


**Figura 68** - Marcha horária da temperatura de bulbo seco (a) e umidade relativa (b) no centro das salas expostas e sombreadas, estação seca, período de 19 a 26/07/2010

De acordo com a ABNT 15575 (2008), toma-se o dia 24/07 para análise do desempenho termoenergético das salas, sendo uma na Escola 1 e, outra, na Escola 2, ambas na condição sem sombreamento.

Na análise do desempenho térmico da edificação realizou-se comparativo da temperatura e umidade relativa dos três pontos de medição internamente e das

condições termo-higrométricas externas (Figuras 69-a e 69-b). Internamente, os valores apresentados referem-se aos pontos de medição no centro (32), lateral das janelas baixa (31) e alta (33) da sala.



**Figura 69** – Marcha horária da temperatura e umidade relativa externa e interna nas salas sem sombreamento na Escola 1 (a) e na Escola 2 (b), dia 24/07/2010

Neste dia, a céu aberto, a temperatura externa máxima na Escola 1 foi de 37,9°C, às 16h, e a umidade relativa de 44,5%, às 8h. Na Escola 2, a temperatura externa máxima foi de 38°C, às 16h e a umidade relativa de 52,4%, às 8h. As temperaturas externas foram maiores na Escola 1 que na 2, no começo da manhã e menores, do meio até o final da tarde. A amplitude térmica externa da Escola 1 foi de 15°C e a interna foi de 5,8°C.

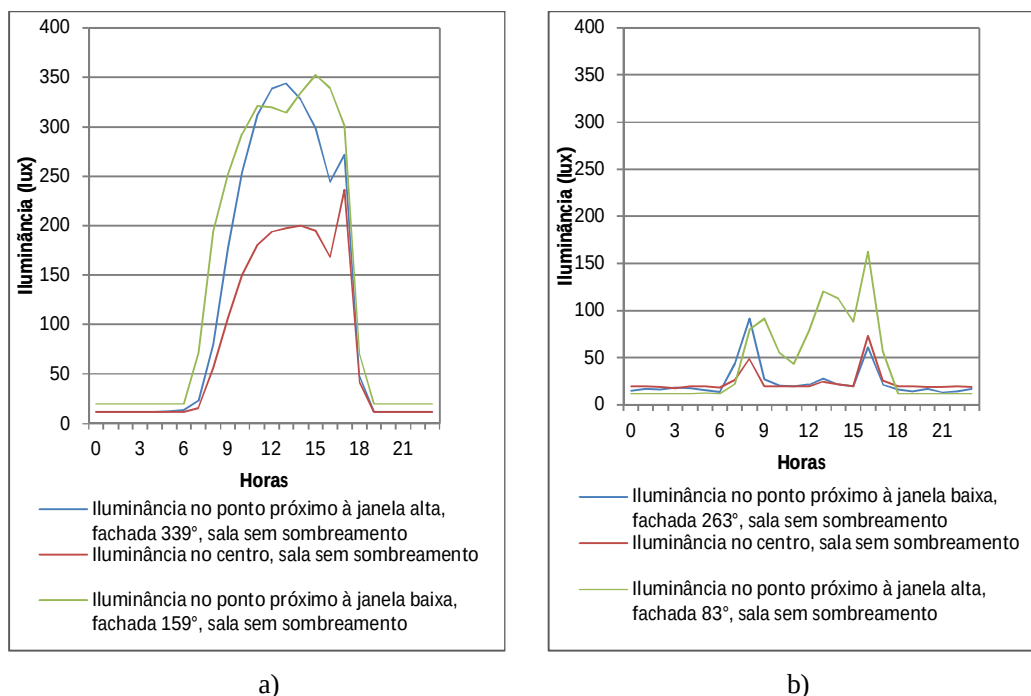
Internamente, no centro da sala da Escola 1, as temperaturas máximas médias e mínimas foram de 33,2; 30 e 27,38°C, respectivamente, e a umidade relativa máxima, média e mínima de 38,9; 33,2 e 27,4%, respectivamente. A temperatura máxima ocorreu às 18h e a mínima às 7h. Ao longo da largura da sala, verificou-se uma variação de 0,3°C, sendo a média no ponto 31 (na janela baixa) de 29,3°C e de 29,6°C no centro da sala e na janela alta. A janela alta volta-se para o noroeste e janela baixa para o sudeste.

Internamente, no centro da sala da Escola 2, a temperatura e a umidade relativa máxima, média e mínima foram de 32,4; 29,3 e 26,7°C e 42,3; 35,2 e 28,3%, respectivamente. A temperatura máxima ocorreu às 17h e a mínima às 8h. A diferença entre os pontos de medição internos são menores a 0,01°C, caracterizando ambiente térmico idêntico ao longo da largura da sala. A janela alta volta-se praticamente para leste e a baixa para oeste. Isso faz com que o ponto 33 tenha maior temperatura no período matutino e o ponto 31 maior temperatura no período vespertino.

A temperatura interna na sala 2 manteve-se menor que na sala 1 durante todo o período diurno e noturno. A amplitude térmica externa da Escola 2 foi de 17,1°C e a interna foi de 5,7°C.

Analisando-se os resultados das medições de iluminâncias internas das salas, na Escola 1, atinge-se os 300lux requeridos para atividade nos pontos 31 (distante 0,60m da janela baixa) e 32 (centro da sala). No ponto de medição 23 (distante 5,40m da janela baixa) não é atingido o nível de referência, ficando o mesmo abaixo de 200lux (Figura 70-a).

Na Escola 2, tem-se que os níveis são muito abaixo dos 300lux requeridos para a atividade de sala de aula, devido à pintura dos vidros, que não permite a entrada de luz natural. A contribuição da luz natural é mínima, com cerca de 60lux próximo à janela alta (5,40m) e 20lux no centro da sala (2,5m). Próximo à janela baixa (0,60m), os níveis de iluminância são abaixo de 100lux e no período vespertino, pela incidência do sol na fachada oeste, após as 15h30min, os níveis se elevam até cerca de 700lux (Figura 70-b).



**Figura 70** – Iluminância média horária nos pontos de medição das salas da Escola 1 (a) e 2 (b), dia 24/07/2010

Destacando-se os resultados de temperatura e iluminância natural das salas, das 7 às 17h, observa-se que na sala da Escola 2, cujos vidros são pintados e opacos, a contribuição da luz natural é maior próxima à janela baixa (132,7lux), decai no centro (28,4lux) e aumenta na janela alta (32,9lux).

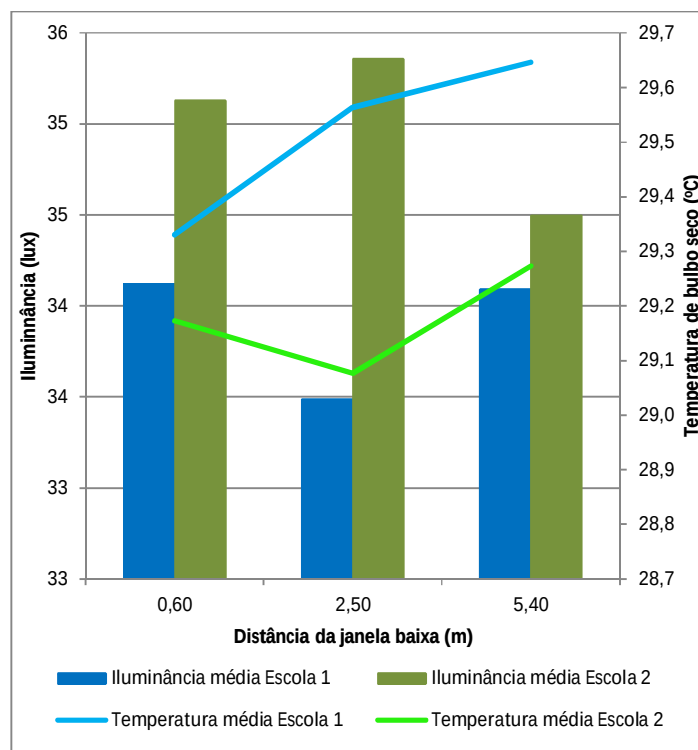
A temperatura apresentou gradiente menor que  $0,1^{\circ}\text{C}$  ao longo da sala, com valores de 28,1; 28 e  $28,2^{\circ}\text{C}$  nos pontos 31, 32 e 33, respectivamente (Tabela 28). Na Escola 1, a iluminância é menor no centro da sala (155lux), aumentando no ponto de medição próximo à parede da janela baixa (283,84lux) e alta (241,5lux). A temperatura apresentou valores de  $28^{\circ}\text{C}$  no ponto 31 e de  $28,3^{\circ}\text{C}$ , nos pontos 32 e 33.

Na sala da Escola 1, com janela alta na fachada principal orientada a noroeste ( $339^{\circ}$ ) e janela baixa na fachada secundária orientada a sudeste ( $159^{\circ}$ ) a iluminação foi menor no centro da sala (2,5m), apresentando valores maiores nas laterais, a 0,60 e 5,40m. Já a temperatura de bulbo seco, cresce ao longo da largura da sala, com

menores valores próximos à janela baixa e maiores próximos à janela alta. A Figura 71 traduz a distribuição da iluminância e temperatura ao longo da largura da sala.

**Tabela 28** - Gradiente da temperatura de bulbo seco e iluminância diurnas nas salas 1sl e 2sl

| DISTÂNCIA DA JANELA BAIXA (m) | T-1 (°C) | E-1 (lux) | T-2 (°C) | E-2 (lux) |
|-------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|
| 0,60                          | 29,3     | 34,1      | 29,2     | 35,1      |
| 2,50                          | 29,6     | 33,5      | 29,1     | 35,4      |
| 5,40                          | 29,6     | 34,1      | 29,3     | 34,5      |



**Figura 71** – Gradiente de temperatura de bulbo seco e iluminância nos três pontos de medição das salas, considerando o período diurno, estação seca, período de 19 a 26/07/2010

Na sala da Escola 2, com janela alta na fachada principal orientada a leste ( $83^\circ$ ) e janela baixa na fachada secundária orientada a oeste ( $263^\circ$ ), a iluminação teve sua distribuição alterada pela pintura dos vidros. Foi maior no centro da sala

(2,5m), apresentando valores menores nas laterais, a 0,60 e 5,40m. A temperatura de bulbo seco apresentou menor valor no centro da sala.

#### **4.2.3. Desempenho termo-lumínico das salas da estação chuvosa**

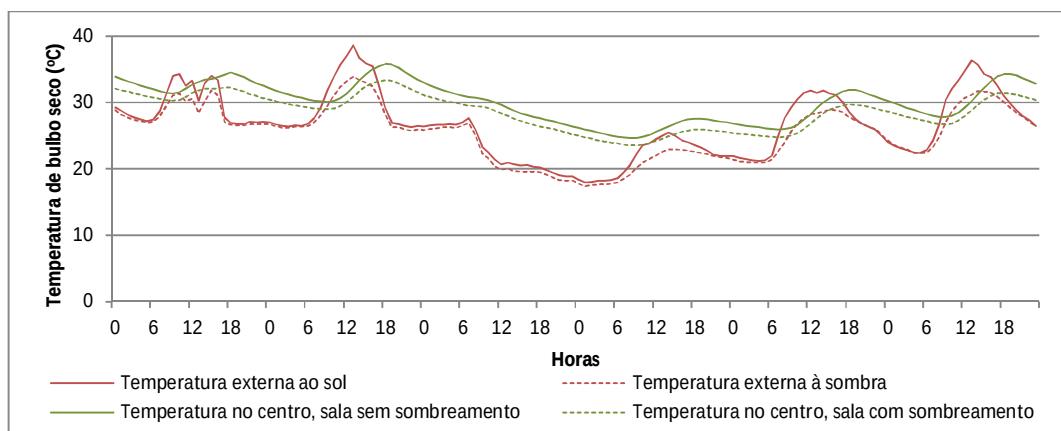
No período de 11 a 16/12/2011, foi realizada a medição na Escola 2, externamente, à sombra e nas salas com e sem sombreamento. As Figuras 72-a, 72-b e 72-c apresentam o comportamento das médias horárias da temperatura, umidade e iluminância interna e externamente às salas.

As temperaturas no interior das salas se mantiveram mais elevadas que a externa, na maioria do tempo, pelo fato de que as mesmas estavam fechadas durante toda a medição. Com isso, as trocas de ar eram dificultadas e o calor armazenado durante o dia se mantinha no interior da sala.

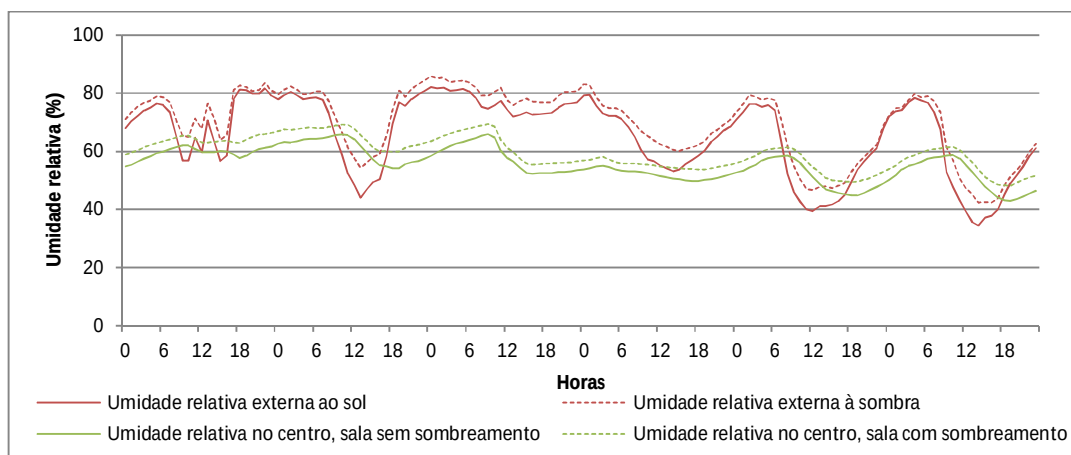
O desempenho térmico da sala com sombreamento arbóreo foi melhor, cerca de 3,6°C a menos que a sala exposta, em média, e a umidade permaneceu, em média, 4,5% maior.

A sala com sombreamento não ultrapassou 20 lux de iluminância natural, mesmo no período vespertino, na fachada voltada para o lado oeste. Neste mesmo período, a sala sem sombreamento teve a iluminância natural próxima de 40 lux, representando uma perda da ordem de 20 lux pelo sombreamento arbóreo.

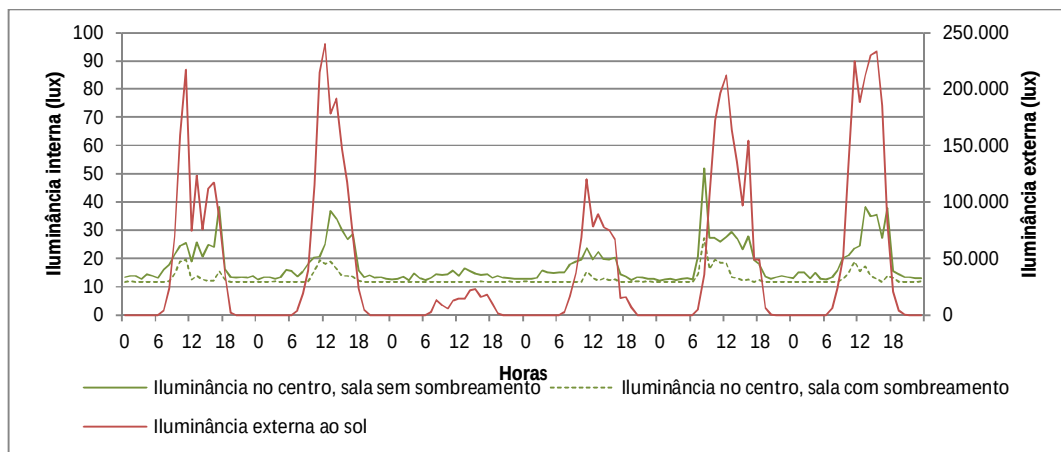
Nesta medição, a instrumentação ainda não estava completa, justificando a ausência dos dados de iluminância externa à sombra.



a)



b)

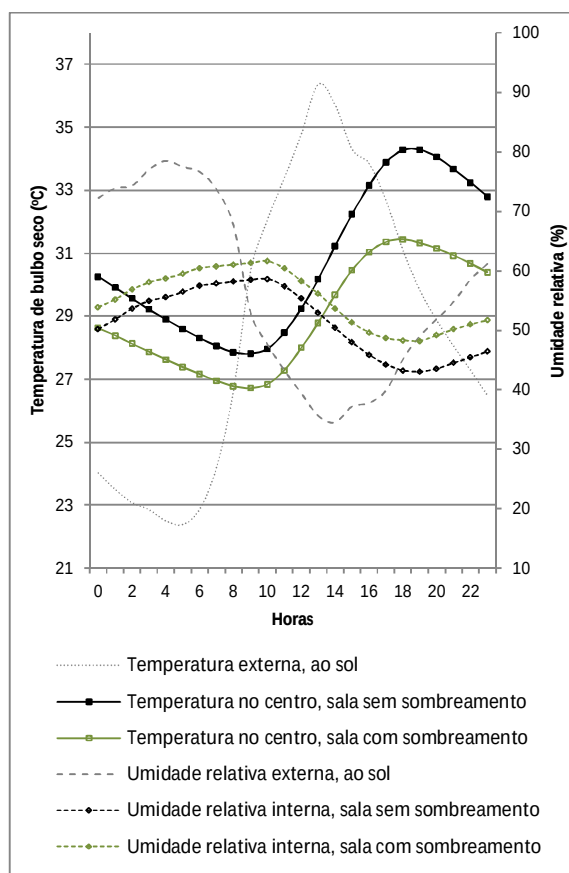


c)

**Figura 72** – Marcha horária da temperatura de bulbo seco (a), umidade relativa (b) e iluminação (c) externa e interna, sala 2sl, estação chuvosa, período de 11 a 17/12/2010

Obteve-se temperatura máxima, média e mínima de 32,79, 26,61 e 22,15°C na sala exposta, e de 29,38, 25,35 e 21,61°C, na sala com sombreamento, respectivamente. A umidade máxima, média e mínima foi de 80,43, 65,59% e 48,48%, na sala sem sombreamento, e de 82,72, 69,85 e 57,21%, na sala com sombreamento, respectivamente (Figuras 70 e 71).

Para análise do desempenho térmico das salas, selecionou-se o dia 16/12/2010 (Figura 73).



**Figura 73** – Desempenho térmico da sala sem sombreamento e com sombreamento, Escola 2, dia 16/12/2010

Neste dia, a temperatura interna da sala com sombreamento arbóreo foi, em média, 1,76°C menor que a sala sem sombreamento, sendo a atenuação de 2,8°C, que ocorreu em torno das 19h. O amortecimento da temperatura foi de 5,18°C do sol para a sombra da unidade arbórea, de 4,92°C do sol para o interior da sala com sombreamento e de 2,08°C do sol para a sala sem sombreamento. A sala com sombreamento manteve uma amplitude térmica diária menor, de 4,73°C contra 6,48°C da sala sem sombreamento arbóreo. A umidade relativa manteve-se, em média, 3,17% maior na sala sombreada que na sem sombreamento (Figura 73).

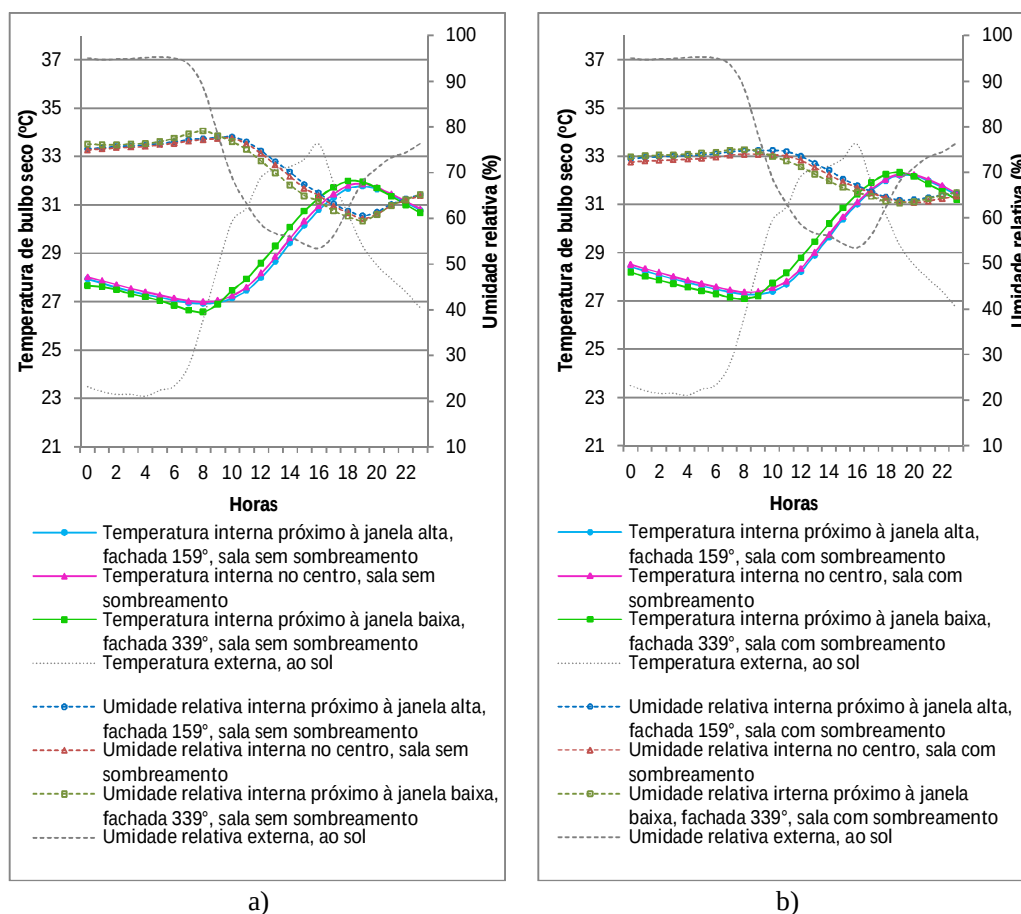
A seguir, apresentam-se os resultados do desempenho térmico das salas das três escolas, no período de 29/12/2010 a 23/01/2011, tendo sido escolhido o dia 02/01/2010 para avaliação do desempenho térmico, por atender aos requisitos da ABNT 15575(2008), por ser um dia em que não ocorreram chuvas e no qual se tinham medições internas simultâneas nas três escolas. As Figuras 74, 75 e 76 referem-se às salas sem e com sombreamento, nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente.

Os valores médios obtidos, na posição central, para a sala sem sombreamento da Escola 1, de temperatura máxima, média e mínima foram de 34,32, 28,08 e 24,96°C e de 32,16, 27,55 e 24,96°C, na sala com sombreamento, respectivamente. A umidade relativa máxima, média e mínima foi de 89, 74,94% e de 52,32% na sala sem sombreamento e de 84,71, 75,90 e 60,36%, na sala com sombreamento, respectivamente.

As salas da Escola 1 não apresentaram comportamento térmico relacionado ao sombreamento, ficando a sala nomeada como sombreada -“sb”- na pesquisa, com valores maiores que a não sombreada -“sl”. Embora a temperatura sob a unidade arbórea tenha sofrido atenuação, a mesma não influenciou no desempenho térmico da sala. Pelas máscaras solares, avaliou-se que o Ficus promovia sombreamento pouco efetivo da fachada sudeste (até as 10h), o que justifica a ausência de relação citada. Além disso, logo após a instalação dos equipamentos um módulo de vidro de uma das janelas da fachada sudeste da sala exposta foi quebrado e pode ter garantido uma renovação de ar, mas que contribuiu para o resfriamento e a manutenção de uma ventilação mínima, de modo que a mesma apresentou menor temperatura horária se

comparada à sombreada, que permaneceu com as janelas e portas fechadas durante toda a medição.

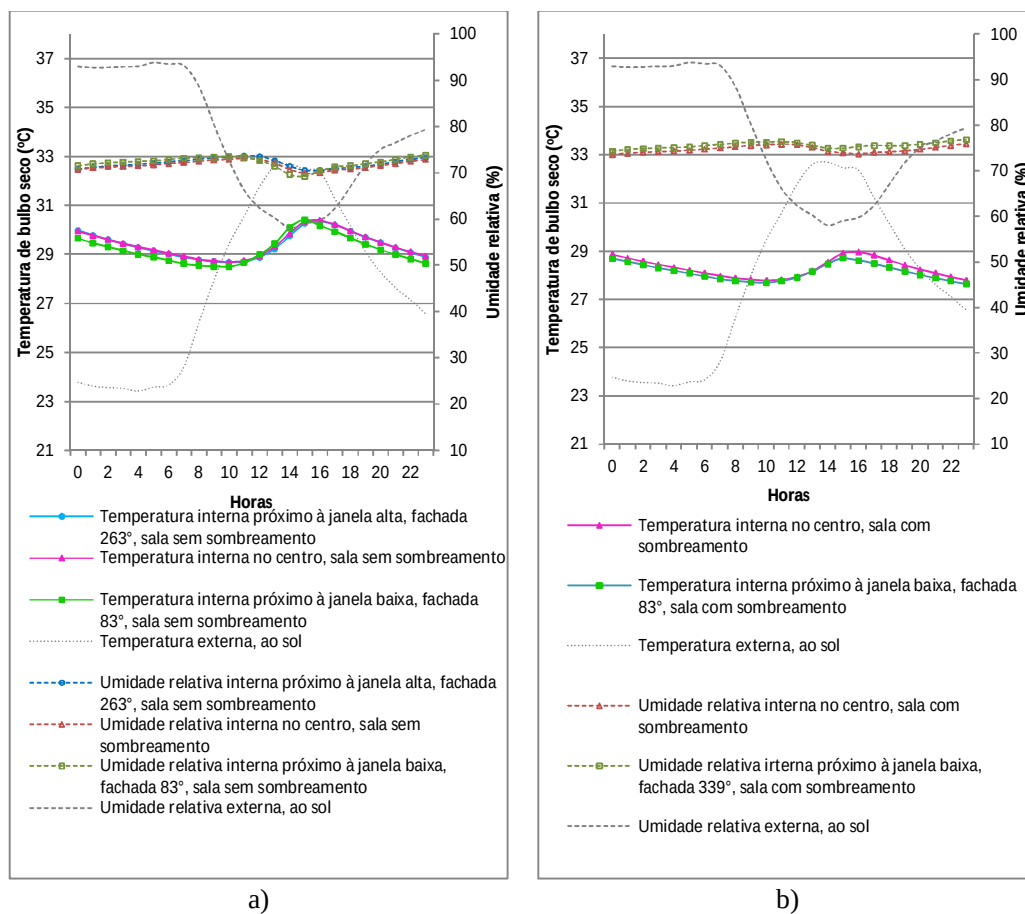
A diferença nos valores das temperaturas máximas das salas som e sem sombreamento foi de  $0,34^{\circ}\text{C}$  no ponto próximo da parede da fachada sudeste ( $159^{\circ}$ -janela baixa), de  $0,39^{\circ}\text{C}$ , no centro da sala e de  $0,45^{\circ}\text{C}$  no ponto próximo da janela alta, próximo à parede voltada para a fachada noroeste ( $339^{\circ}$ ).



**Figura 74** – Desempenho térmico das salas sem sombreamento arbóreo (a) e com sombreamento arbóreo(b), Escola 1, dia 02/01/2010

Na Escola 2 obteve-se as temperaturas máximas, médias e mínimas de  $33,73$ ,  $27,70$  e  $24,28^{\circ}\text{C}$  na sala sem sombreamento, e de  $29,28$ ,  $26,17$  e  $24,23^{\circ}\text{C}$  na sala sombreada, respectivamente. A umidade relativa máxima, média e mínima foi

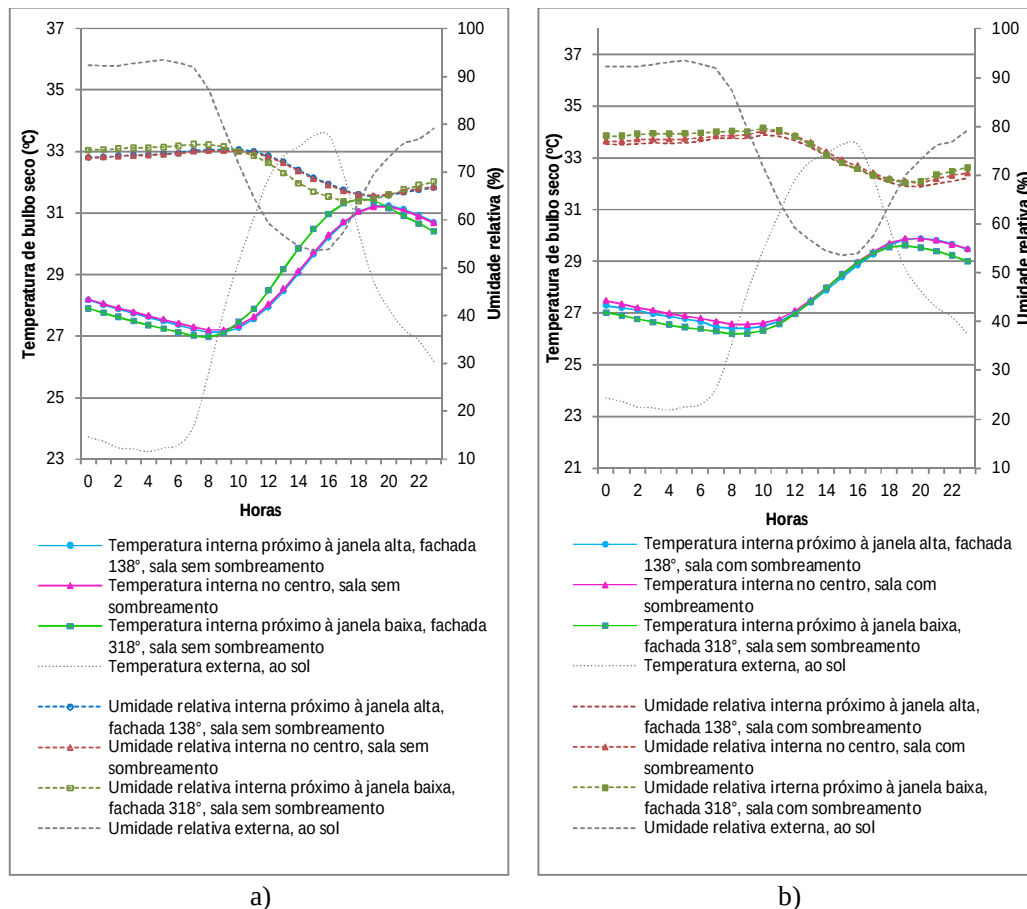
de 90,23, 78,26 e 57,22% na sala sem sombreamento, e de 91,21, 84,22 e 72,15% na sala com sombreamento, respectivamente. A diferença da temperatura interna máxima entre as salas sombreadas e não sombreadas na Escola 2 foi de 1,72°C para o ponto próximo à janela baixa (orientação 263°) e 1,42°C, no centro da sala.



**Figura 75** – Desempenho térmico das salas sem sombreamento arbóreo (a) e com sombreamento arbóreo (b), Escola 2, dia 02/01/2010

Na Escola 3, a temperatura máxima, média e mínima foi de 33,65, 27,51 e 24,02°C e de 29,67, 26,16 e 23,97°C, na sala sem e com sombreamento, respectivamente. A umidade relativa máxima, média e mínima foi de 89,29, 77,06 e 55,76% na sala sem sombreamento, e de 93,01, 84,63 e 69,91%, na sala com sombreamento, respectivamente. A diferença foi de 1,87°C no ponto de medição

próximo à parede da janela baixa, orientada à noroeste ( $318^\circ$ ), de  $1,32^\circ\text{C}$  no centro da sala e de  $1,37^\circ\text{C}$  no ponto próximo à janela alta, orientada a sudeste ( $138^\circ$ ).



**Figura 76** – Desempenho térmico das salas sem sombreamento arbóreo (a) e com sombreamento arbóreo (b), Escola 3, dia 02/01/2010

Explica-se a diminuição da temperatura interna nas salas com sombreamento devido ao efeito atenuador da radiação solar pela copa. As superfícies externas sob efeito da sombra da árvore se aquecem menos e, conseqüentemente, transmitem menos calor para o interior da sala. A árvore mantém a temperatura de suas folhas sempre menor que a temperatura ambiente, abrindo mão do recurso de evapotranspiração, com o qual libera vapor de água para o meio reduzindo a temperatura.

Obteve-se, assim temperaturas máximas, médias e mínimas nas salas das Escolas 2 e 3, que possuem o sombreamento arbóreo significativo, conforme a Tabela 29, na qual se observa que, as salas implantadas no sentido N-S, com sombreamento à oeste apresentaram menor amplitude térmica e a sala implantada no sentido NE-SO, com sombreamento à noroeste obteve as menores temperaturas médias e mínimas.

**Tabela 29** – Temperatura média, máxima e mínima nas salas com sombreamento arbóreo

| ORIENTAÇÃO DA<br>FACHADA / SALA   | Fachada principal: 83°<br>Fachada secundária: 263° |       | Fachada principal: 138°<br>Fachada secundária: 318° |       |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------|-------|
|                                   | 2sl                                                | 2sb   | 3sl                                                 | 3sb   |
| <b>Temperatura interna média</b>  | 29,33                                              | 28,21 | 28,91                                               | 27,82 |
| <b>Temperatura interna máxima</b> | 30,34                                              | 28,81 | 31,28                                               | 29,77 |
| <b>Temperatura interna mínima</b> | 28,62                                              | 27,72 | 27,10                                               | 26,39 |
| <b>Amplitude térmica</b>          | 1,72                                               | 1,10  | 4,18                                                | 3,38  |

A sala com melhor desempenho térmico dentre as salas sem sombreamento foi a da Escola 2, orientada a 83°, pois se aqueceu e se resfriou menos que as demais, mantendo uma amplitude térmica menor.

As salas da Escola 1 e 3, com orientação da fachada principal e secundária a 339° e 138°, respectivamente, apresentaram amplitude térmica semelhante e maior que a da Escola 2. A sala sem sombreamento da Escola 1 apresentou valores ligeiramente maiores que a da Escola 3. Estas duas salas recebem igual carga térmica de radiação pelos fechamentos opacos verticais, pois suas fachadas são simétricas em relação à trajetória aparente do sol e a radiação direta nos fechamentos transparentes é mínima). A sala da Escola 1 recebe radiação solar direta em seus fechamentos verticais por um curto período de tempo no começo da manhã e, não recebe à tarde. As das Escolas 2 e 3, no começo da manhã e meio da tarde.

O partido arquitetônico promove boa proteção nesse sentido. Sendo as salas desocupadas, com portas e janelas fechadas, sem iluminação artificial e condicionamento, as diferenças encontradas nas temperaturas podem ter origem na

temperatura externa do local onde se localizam as escolas, nos efeitos do vento ou devido à existência de obstrução externa ou característica do prédio que ocorra exclusivamente na Escola 2. Esses fatores são discutidos a seguir.

Quanto à temperatura externa, as medições mostraram que a mesma decresce da Escola 1 para a 2 e, desta, para a 3, ou seja, a temperatura decresce conforme a distância da escola em relação ao centro urbano da cidade, afetada pelo fenômeno da ilha de calor. Embora essas diferenças sejam pequenas, de  $0,38^{\circ}\text{C}$  (da Escola 1 para 2) e  $0,18^{\circ}\text{C}$  (da Escola 2 para 3), sob este aspecto, esperavam-se menores temperaturas internas na Escola 3, o que não foi verificado.

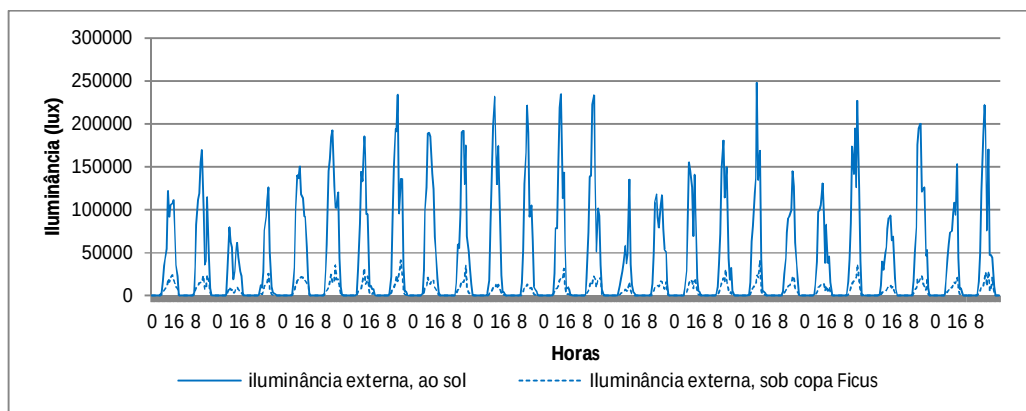
Sobre os efeitos do vento, pela própria localização da cidade de Cuiabá, os mesmos são reduzidos e, em uma edificação inserida na malha urbana, a ventilação é muito pequena. Nos dados secundários, trabalhados nesta pesquisa, na maior parte do tempo, a velocidade do vento foi de 0 ou  $0,1\text{m/s}$ .

A possibilidade da existência de alguma obstrução externa que afetasse uma das três salas foi excluída na definição da amostra da pesquisa, não sendo este, um fator relevante para a explicação da ocorrência de temperaturas menores na sala sem sombreamento da Escola 2. Ressalta-se, aqui, que a mesma é influenciada pelo sombreamento das árvores do estudo, no solstício de inverno, mas já no final da tarde, após as 17h, por um curto período de tempo.

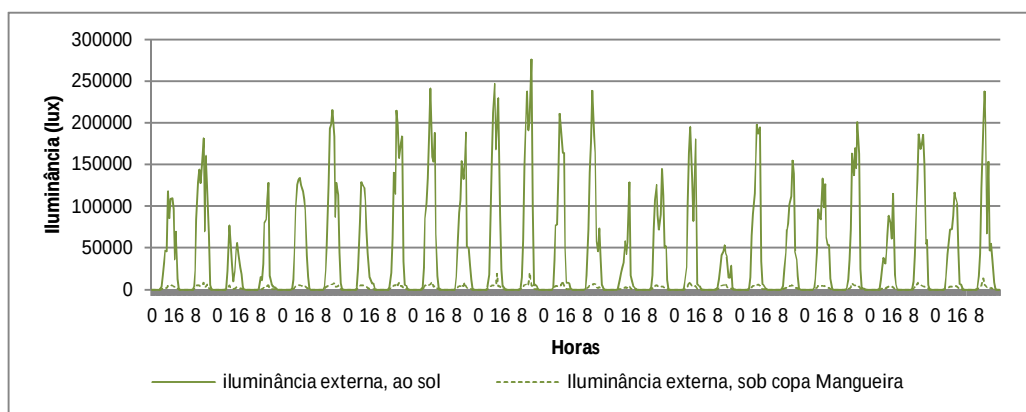
Justifica-se, então, o comportamento térmico da sala pela pintura dos vidros com a tinta branca que eliminou totalmente a transparência dos mesmos, diferenciando-a das demais. A sala com sombreamento acompanha o comportamento térmico da sala sem sombreamento reforçando a justificativa para o mesmo.

Juntamente com as perdas térmicas ocorrem perdas na iluminação natural das salas. Ao bloquear a radiação solar direta, a vegetação bloqueia, também, a luz visível, resultando somente na presença de radiação difusa, na fachada sombreada, que tem diminuída a disponibilidade de luz natural nas suas aberturas. Com isso, configuram-se ambientes com menos luz. Se pelo lado positivo, o sombreamento proporciona diminuição dos ganhos térmicos no interior do ambiente sombreado, pelo lado negativo de seu uso, proporciona perdas de luz natural, ambos

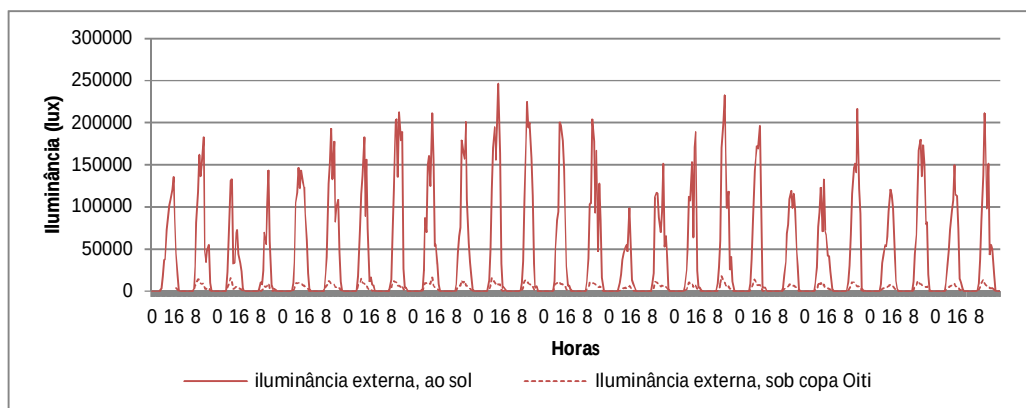
proporcionalmente à qualidade da sombra. Os dados de iluminância externa da estação chuvosa constam da Figura 77.



a)



b)

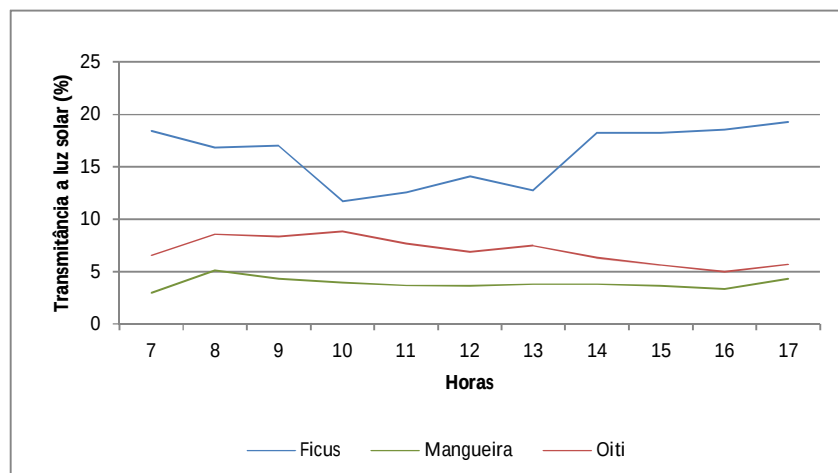


c)

**Figura 77** - Médias horárias da iluminância externa ao sol e sob a copa do Ficus (a), da Mangueira (b) e do Oiti (c), estação chuvosa, período de 28/12/2010 a 23/01/2011

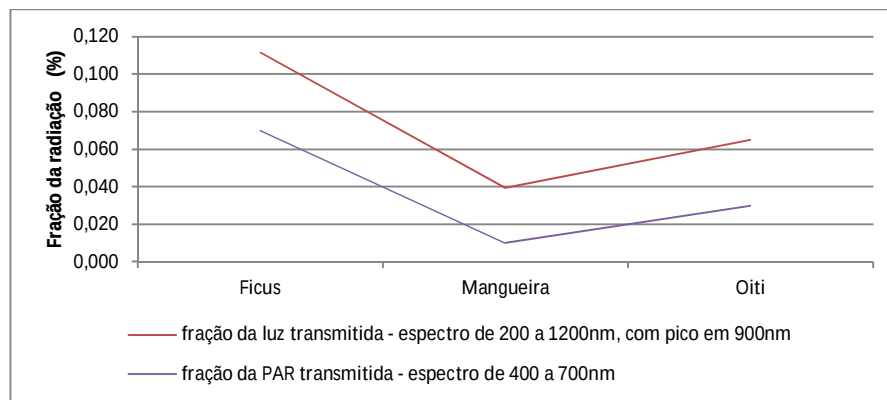
A céu aberto, a iluminância média externa é de 40.473, 40.832 e 41.521lux, nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente. À sombra, a iluminância média é de 5230, 1587 e 2801lux, respectivamente às copas do Ficus, Mangueira e Oiti.

A transmitância da luz visível sob as copas do Ficus, Mangueira e Oiti foram de 10,06%, 3,6% e 6,8% respectivamente (Figura 78), calculada apenas para a estação chuvosa, uma vez que na seca, esta variável ainda não fazia parte da instrumentação.



**Figura 78** – Fração da radiação visível sob a copa para o Ficus, Mangueira e Oiti

As folhas realização de fotossíntese e demais processos vitais se utilizam da radiação PAR que intercepta a copa. A partir da medição da iluminância da radiação PAR sob a copa e fora dela, ao meio-dia, tem-se que a fração de luz visível e PAR disponível sob a copa são proporcionais conforme a Figura 79.



**Figura 79** – Fração da radiação PAR e visível sob a copa para o Ficus, Mangueira e Oiti

Desta forma, a iluminância sob a copa é maior tanto menor é o IAF - Escola 1 (Ficus-IAF=5,48), Escola 2 (Mangueira-IAF=10,1) e Escola 3 (Oiti-IAF=7,40). O Ficus proporcionou a passagem de mais luz através de sua copa, seguido pelo Oiti e Mangueira, com positiva correlação com o IAF ( $R^2=0,93$ ) e com o DAF ( $R^2=0,97$ ).

Analisando-se a disponibilidade de luz natural no interior das salas no período diurno (das 7 às 17h), média de todo o período de medição, nas Figuras 80 e 81, tem-se os níveis de iluminação e Fator de Luz Diurna (FLD), para os pontos próximos à janela baixa, no centro da sala e próximos à janela alta, nas salas com e sem sombreamento.

A iluminância disponível externamente era de 85,27, 86,12 e 86,55klux nos sítios das Escolas 1, 2 e 3, respectivamente. Sob as copas do Ficus, Mangueira e Oiti foram medidos 10,57, 3,33 e 8,65klux, respectivamente.

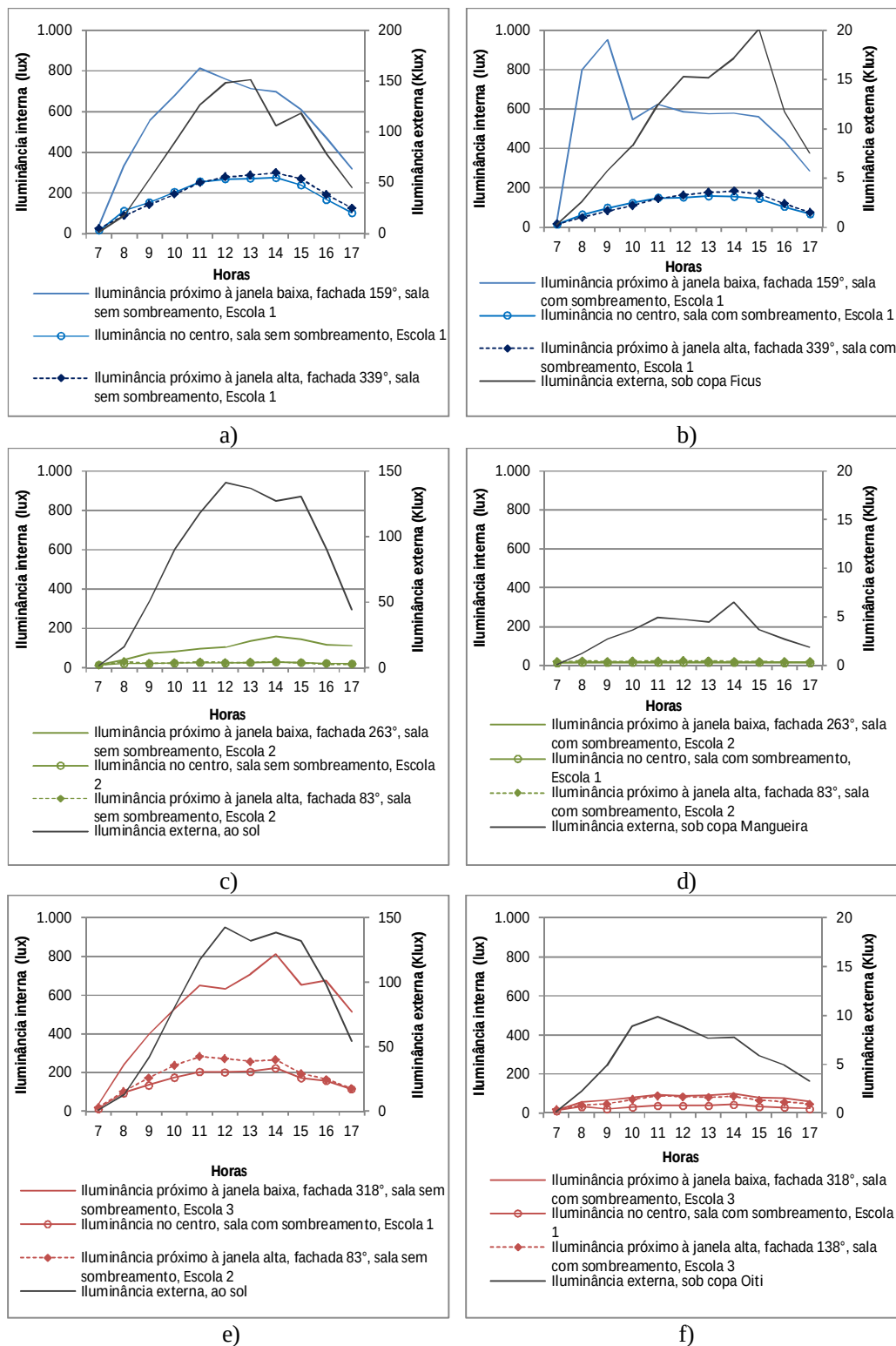
Na Escola 1, na sala sem sombreamento, com janela baixa voltada para o sudeste ( $159^\circ$ ), a iluminância no ponto próximo à janela baixa foi de 544,49lux, no centro da sala foi de 187,03lux e próximo à janela alta foi de 195,29lux. O FLD foi de 0,62% próximo à janela, 0,20 e 0,21%, no centro e no lado oposto à janela baixa, com iluminação natural suficiente somente no primeiro. Na sala sombreada, o FLD foi de 0,96, 0,35 e 0,43% ao longo da largura da sala, com luz natural sempre abaixo de 300lux.

Na Escola 2, sala sem sombreamento, no ponto próximo à janela baixa (sudoeste – 263°), mediu-se 98,44lux, no centro da sala, 23,23lux e próximo à janela alta (nordeste – 83°), 98,45lux. Na sala sombreada, os valores na janela baixa, centro e janela alta foram de 21,53, 13,75 e 18,21lux, respectivamente. Os valores do FLD ao longo da largura da sala exposta foram de 0,20, 0,11 e 0,11% e na sala sombreada de 0,12, 0,09 e 0,14%. Na sala sombreada pela Mangueira, o FLD foi de 0,11, 0,12 e 0,09%. O FLD que era de 1,04% na janela baixa da janela sem sombreamento caiu para 0,24, na sala sombreada pelo Oiti. No centro da sala, os valores foram de 0,35 e 0,24% e próximo à janela alta de 0,46 e 0,17%.

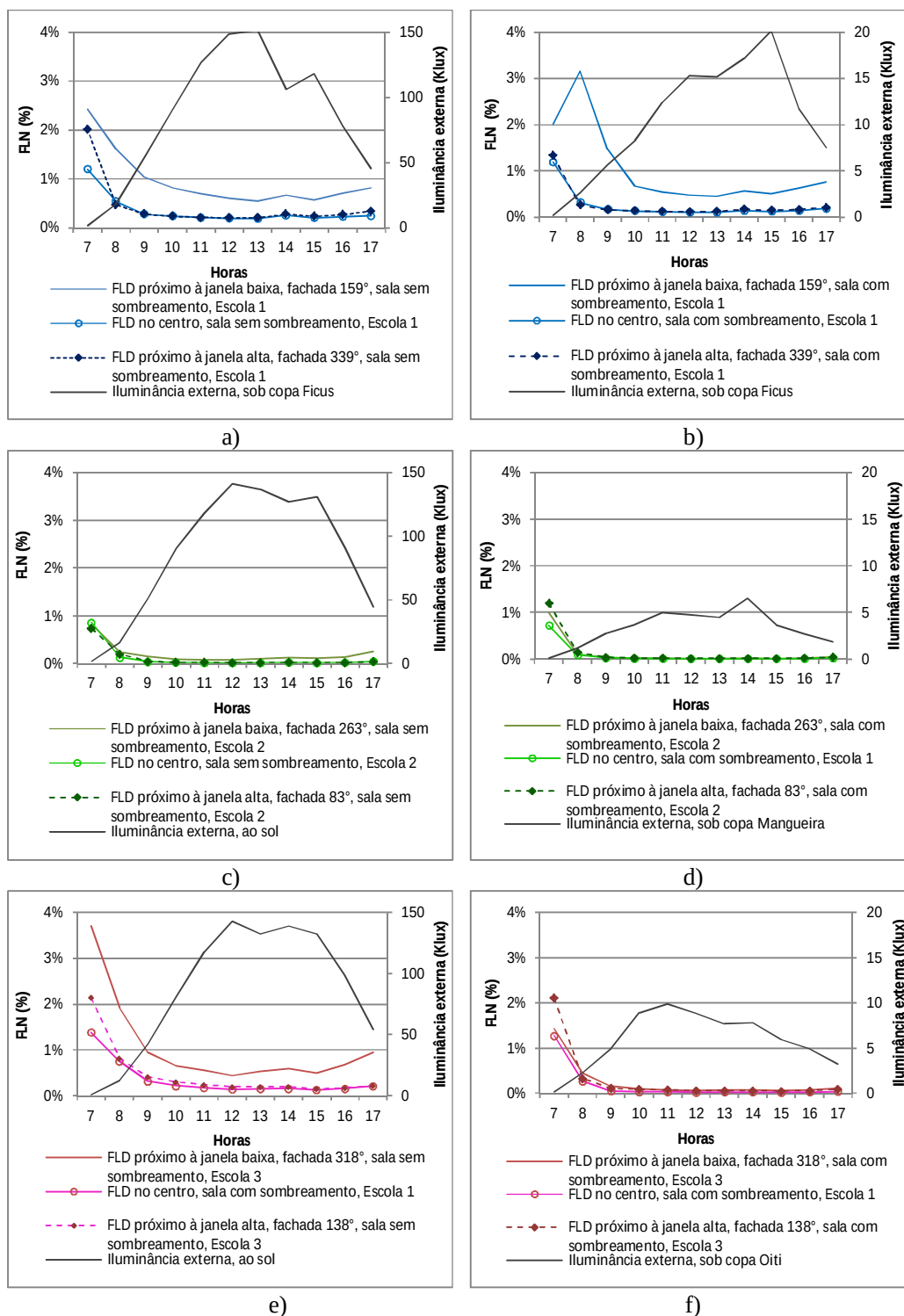
Na Escola 3, na sala sem sombreamento, obteve-se 189,76, 154,34 e 530,75lux, respectivamente ao ponto de medição da janela baixa (fachada sudeste – 138°), centro e janela alta (fachada noroeste – 318°). Na sala sombreada, os valores foram de 72,79, 31,69 e 62,54lux para a janela alta, centro e janela alta, respectivamente.

Os menores valores referem-se à Escola 2, sendo que o mesmo praticamente não se altera a partir das 9h nas salas sem sombreamento e com sombreamento. Além disso, devido à opacidade das esquadrias, a iluminância ao longo da largura da sala é homogênea, sendo verificada pouca variação entre os três pontos de medição ao longo da largura da sala sem sombreamento - “sl”, com valores que oscilaram entre 0,08 e 0,02%. Embora a disponibilidade de luz sob a copa da Mangueira seja menor que a céu aberto, isso refletiu sutilmente na iluminação natural das salas.

Na Escola 1, a influência do sombreamento arbóreo na iluminação natural da sala é mínima, de forma semelhante ao verificado no comportamento térmico. Observa-se, mais uma vez, que a árvore não proporcionou sombra no início da manhã e a disponibilidade de luz natural é maior no ponto próximo à janela baixa. No centro e próximo à janela baixa, a disponibilidade se iguala.



**Figura 80** – Marcha horária da iluminância externa e interna, nas salas sem sombreamento nas Escolas 1 (a), 2 (c), 3 (e) e com sombreamento nas Escolas 1 (b), 2 (d) e 3 (f)



**Figura 81** – Marcha horária da iluminância externa e Fator de Luz Diurna (FLD) nas salas sem sombreamento nas Escolas 1 (a), 2 (c), 3 (e) e com sombreamento nas Escolas 1 (b), 2 (d) e 3 (f)

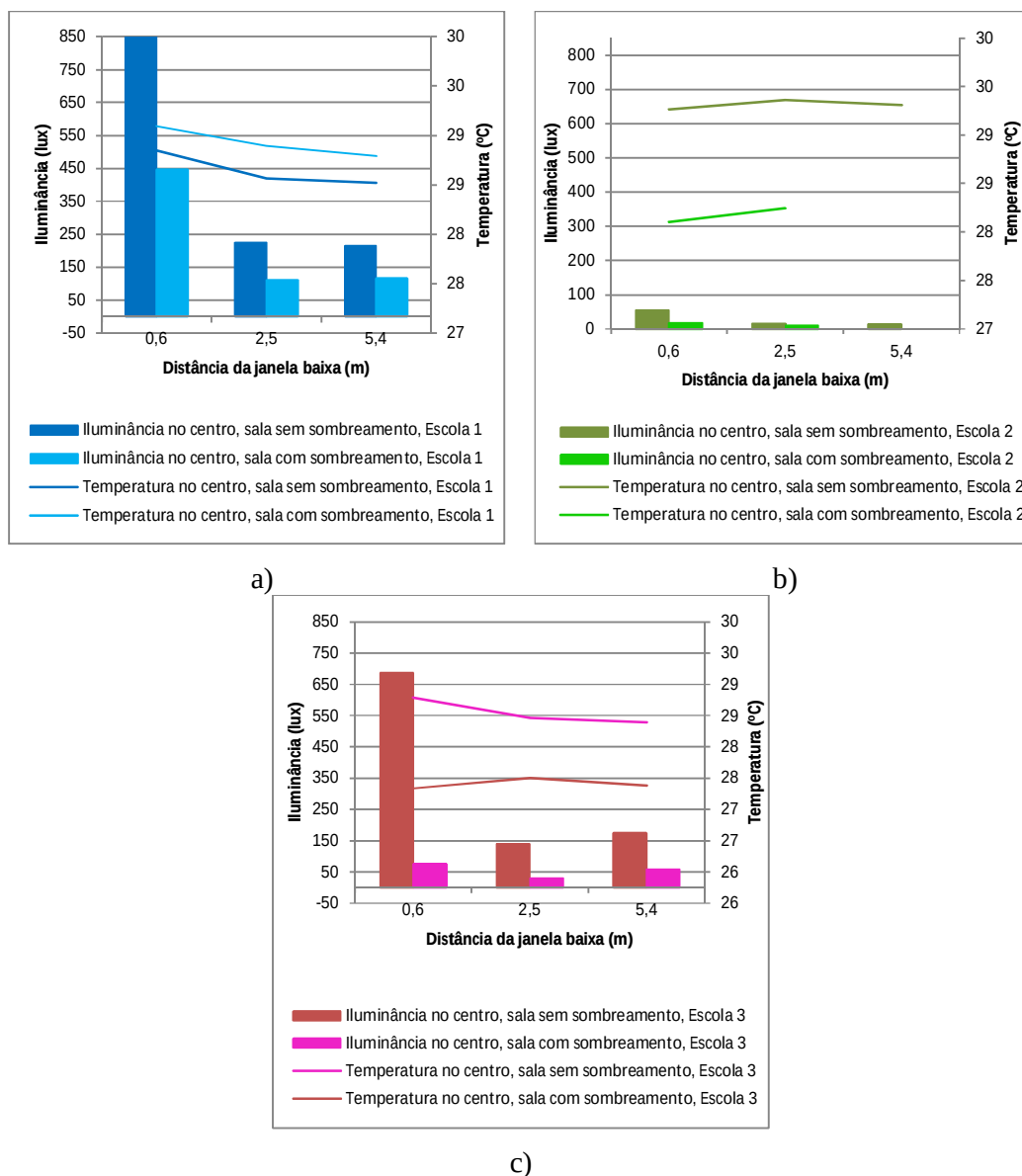
Na Escola 3, tem-se o padrão esperado de comportamento lumínico: maiores FLD na sala sem sombreamento que na com sombreamento; maior FLD no ponto próximo à janela baixa, decrescendo em relação à janela baixa na sala sem sombreamento - “sl” - e uniformidade do FLD ao longo da largura da sala na sala com sombreamento - “sb”. Analisando os níveis de iluminamento no interior das salas tem-se que as salas 1sl, 1sb e 3sl atingem a recomendação normativa de 300lux somente no ponto próximo à janela baixa (“11”). Nos demais pontos o nível de iluminância foi menor que 300lux.

Destacando-se os resultados da distribuição da temperatura e iluminância natural ao longo da largura das salas, das 7 às 17h, no dia 02/02/2011, tem-se a Figura 82 referindo-se às salas sombreadas e não sombreadas.

A temperatura média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 1, foi de 28,84, 28,56 e 28,53°C, respectivamente. O gradiente de temperatura ao longo da largura da sala foi, então, de 0,28°C do ponto à 0,6m da janela baixa para o centro e de 0,04°C deste para o ponto a 0,6m da janela alta.

Na sala com sombreamento, a temperatura média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 1, foi de 29,09, 28,90 e 28,79°C. O gradiente de temperatura ao longo da largura da sala foi, então, de 0,20°C do ponto à 0,6m da janela baixa para o centro e de 0,11°C deste para o ponto a 0,6m da janela alta.

A temperatura média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 2, foi de 29,26, 29,36 e 29,31°C, respectivamente. O centro da sala foi o local de maior temperatura, com gradiente para a janela baixa de 0,1°C e para a janela alta de 0,05°C. Na sala com sombreamento, a temperatura média à 0,6m da parede da janela baixa da sala e no centro da sala sem sombreamento foi de 28,1 e 28,24°C. O centro da sala manteve-se mais quente, mas o gradiente deste para a janela baixa aumentou para 0,14°C.



**Figura 82** – Iluminância e temperatura no interior das salas com e sem sombreamento da Escola 1 (a), Escola 2 (b) e Escola 3(c)

A temperatura média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 3, foi de 28,79, 28,46 e 28,39°C, respectivamente. O gradiente de temperatura da janela baixa para o centro foi de 0,33°C e deste para a janela alta foi de 0,07°C. Na sala com sombreamento, a temperatura média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro da sala sem

sombreamento e à 0,6m da janela alta foi de 27,33, 27,50 e 27,38°C, respectivamente. O centro da sala manteve-se mais quente, e o gradiente para a janela baixa e alta foi de 0,17 e 0,12°C, respectivamente. Sob o aspecto da temperatura, na Escola 1, a sala sem sombreamento obteve valores menores, não sendo observada relação com o sombreamento, pelas interferências da ventilação, anteriormente citadas. Nas Escolas 2 e 3, a diferença de temperatura entre as salas sombreadas e não sombreadas foi de 1,11 e 0,96°C.

A iluminância média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 1, foi de 859,09, 225,28 e 216,98lux. O gradiente de iluminância ao longo da largura da sala foi, então, de 633,81lux do ponto à 0,6m da janela baixa para o centro e de 8,3lux deste para o ponto a 0,6m da janela alta. Na sala com sombreamento, a iluminância média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 1, foi de 446,92, 111,32 e 117lux. O gradiente de temperatura ao longo da largura da sala foi, então, de 335,6lux do ponto à 0,6m da janela baixa para o centro. A iluminância aumentou do centro para a janela alta em 5,68lux.

A iluminância média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 2, foi de 54,58, 17,13 e 15,39lux. O gradiente de iluminância ao longo da largura da sala foi, então, de 37,45lux do ponto à 0,6m da janela baixa para o centro e de 1,74lux deste para o ponto a 0,6m da janela alta. Na sala com sombreamento, a iluminância média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 1, foi de 18,14 e 12,04lux. O gradiente de temperatura ao longo da largura da sala foi, então, de 6,1lux do ponto à 0,6m da janela baixa para o centro.

A iluminância média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 3, foi de 686,18, 138,5 e 174,2lux. O centro da sala apresentou menor iluminância, com gradiente de 547,6lux do ponto à 0,6m da janela baixa para este e de 35,65lux do ponto a 0,6m da janela

alta para o centro. Na sala com sombreamento, a iluminância média à 0,6m da parede da janela baixa da sala, no centro e à 0,6m da janela alta da sala sem sombreamento, na Escola 1, foi de 75,48, 29,39 e 58,4lux. O centro manteve-se com menor iluminância, sendo o gradiente do ponto à 0,6m da janela baixa para este de 46,09lux e do ponto a 0,6m da janela alta para o centro, de 29,02lux.

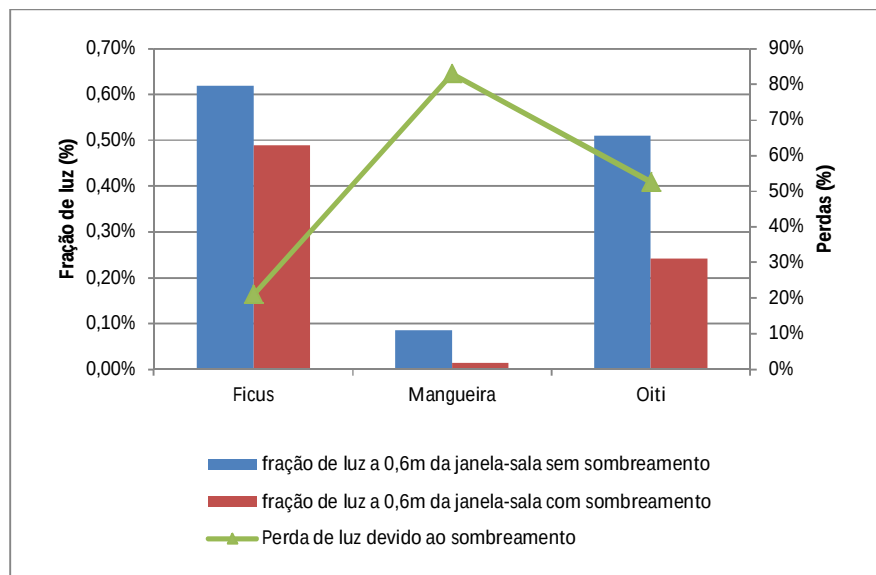
Observou-se que, nas Escolas 1 e 2, implantadas com as fachadas secundárias (que contém a janela baixa) orientadas a 159° e 263°, respectivamente, a iluminância natural no centro da sala e próxima à janela alta tiveram pouca variação, mas diminuem do primeiro para o segundo. Na Escola 3, cuja fachada secundária é implantada a 318°, a variação foi maior e a iluminância aumenta do centro para as janelas alta e baixa.

A perda na disponibilidade de luz natural devido ao sombreamento do Ficus foi de 21%, da Mangueira, de 83% e do Oiti, de 53%, conforme mostra a Tabela 30 e a Figura 83.

**Tabela 30** - Disponibilidade de luz natural sob as copas e no interior das salas a 0,60m da janela

| Espécie          | Fração de luz sob a copa | Fração de luz a 0,6m da janela baixa - sala sem sombreamento | Fração de luz a 0,6m da janela baixa - sala com sombreamento | Perda de luz natural devido ao sombreamento |
|------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Ficus</b>     | 10,06%                   | 0,62%                                                        | 0,49%                                                        | 21%                                         |
| <b>Mangueira</b> | 3,61%                    | 0,09%                                                        | 0,01%                                                        | 83%                                         |
| <b>Oiti</b>      | 6,80%                    | 0,51%                                                        | 0,24%                                                        | 53%                                         |

Tem-se, então, quantificado, então que, para o Ficus, a interceptação da luz proporcionada pela copa de 10% correspondeu a uma perda da disponibilidade de luz natural internamente a 60cm da janela de 21%. Sob a copa da Mangueira, tem-se a menor quantidade de luz, 3,61%, que corresponde a uma perda interna de 83% devido ao sombreamento. No Oiti, cuja sombra intercepta 6,81% da iluminância a céu aberto, corresponde a uma perda na iluminação interna de 86% (Figura 83).



**Figura 83** – Disponibilidade de luz natural sob as copas e no interior das salas a 0,60m da janela baixa

A quantificação da redução da temperatura interna da sala exposta e com sombreamento foi:

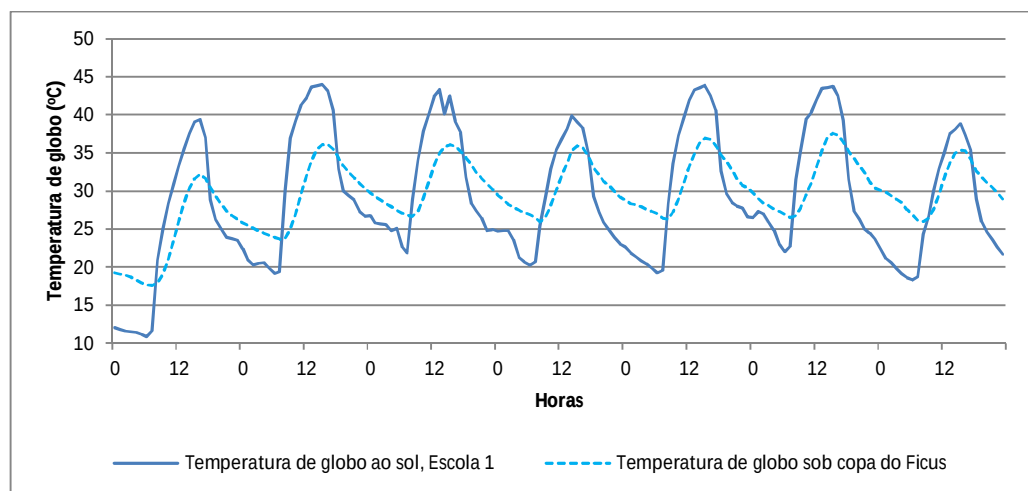
a) para parede orientada a  $263^{\circ}$  com sombreamento por mangueira de grande porte, a redução foi de  $1,72^{\circ}\text{C}$  no ponto próximo à parede orientada a  $263^{\circ}$  e  $1,42^{\circ}\text{C}$  no centro da sala.

b) para parede orientada a  $318^{\circ}$  com sombreamento por Oiti de grande porte, a redução foi de  $1,87^{\circ}\text{C}$  próximo à parede orientada a  $318^{\circ}$ ,  $1,32^{\circ}\text{C}$  no centro da sala e de  $1,37^{\circ}\text{C}$  para o ponto próximo à parede sudoeste ( $138^{\circ}$ ).

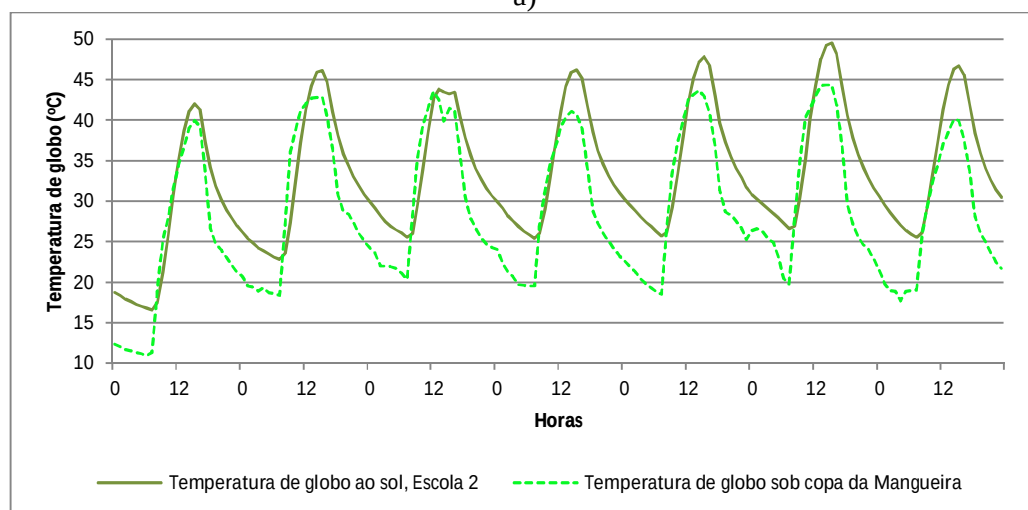
#### 4.2.4. Sombreamento arbóreo e temperaturas superficiais dos fechamentos

A temperatura de globo é a variável que representa os ganhos térmicos da edificação advindos da radiação solar e foi a variável de maior sensibilidade para a exposição ao sol e à sombra.

Nas Figuras 84-a e 84-b tem-se os valores da temperatura de globo a céu aberto, sob a copa das unidades arbóreas das Escolas 1 e 2, referentes ao período da estação seca.



a)



b)

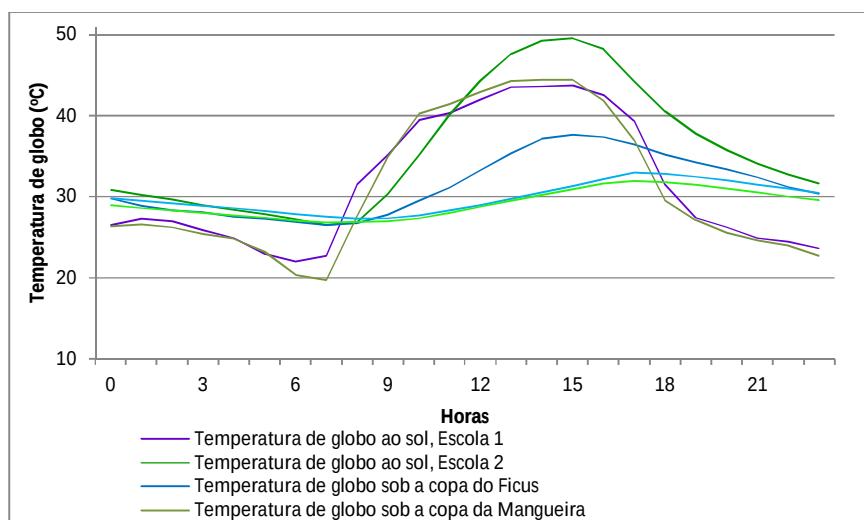
**Figura 84** - Médias horárias da temperatura de globo ao sol e à sombra nas Escolas 1 (a) e 2 (b), estação seca, período de 20 a 26/07/2010

Observa-se que, à sombra, as temperaturas de globo são sempre menores. Os valores externos no centro do pátio foram maiores na Escola 2, muito embora os valores da radiação solar global tenham sido ligeiramente menores. Os desníveis

entre o primeiro e o segundo bloco podem ter contribuído para isso, pois os taludes inclinados de cerca de  $45^\circ$  podem ter contribuído como superfícies de calor radiante.

À sombra, a temperatura de globo foi ligeiramente maior sob a copa da Mangueira da Escola 2 (com 10m de projeção de copa, altura total de 13,78m, sendo 10,99m de copa e 2,79m de fuste), mais frondosa, de maior porte, se comparada ao Ficus da Escola 1 (com 4,00m de copa). Justifica-se este comportamento pelo próprio conceito da temperatura de globo, que está relacionado à temperatura radiante média, cujo valor representa a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme (LAMBERTS et al., 2011). Não se esperavam resultados muito diferentes, uma vez que os IAF eram muito próximos – 7,3 para o Ficus e 8,23 para a Mangueira).

Internamente, a sala da Escola 2 apresentou menor temperatura de globo no período matutino e noturno, com fachadas principal e secundária orientadas à leste e oeste, respectivamente, e de cor rosa claro. A sala da Escola 1 tem suas fachadas principal e secundária à noroeste e sudeste, respectivamente, de cor amarelo claro, com barrado em cor cerâmica (Figura 85).



**Figura 85** - Médias horárias da temperatura de globo ao sol internas e externas nas salas da Escola 1 (a) e da Escola 2 (b), estação seca

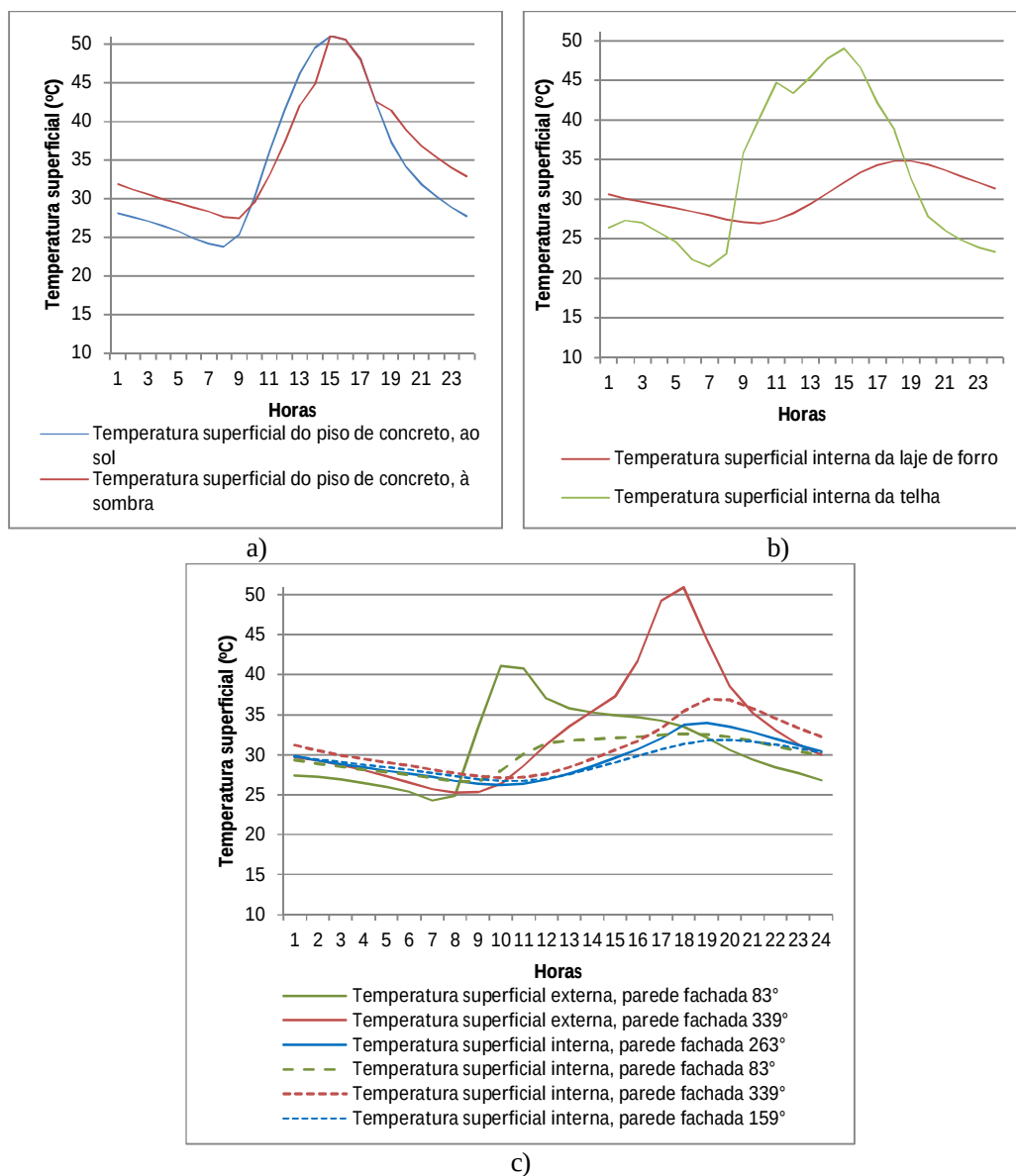
Quanto às temperaturas superficiais, as mesmas recebem diferentes cargas solares em função de suas orientações e a transmitem para o interior da edificação, contribuindo para a definição das condições de conforto térmico internas. No mês de julho, as temperaturas superficiais (Figura 86) referem-se ao piso externo dos pátios em concreto à sombra (a), ao forro de laje e telha de fibrocimento pela face interna (b) e às paredes das salas interna e externamente (c).

O piso de concreto chegou a  $51^{\circ}\text{C}$  às 14h e se resfriou até  $23,8^{\circ}\text{C}$  às 7h. Como era uma superfície horizontal, embora sombreada, seu comportamento térmico acompanhou o da radiação solar, aquecendo-se rapidamente com o início da radiação solar e perdendo calor mais lentamente após o pôr do sol. Ao se aquecer atinge altas temperaturas, permanecendo durante todo o período vespertino acima de  $40^{\circ}\text{C}$ . Durante este processo, emite radiação de onda longa para o meio, contribuindo com o aumento da temperatura das demais superfícies e do ar.

A telha de fibrocimento é um material de elevada condutividade térmica recebendo radiação solar direta em superfície horizontal. Aqueceu-se e resfriou-se rapidamente, atingindo picos de  $49^{\circ}\text{C}$  às 14h, e  $21^{\circ}\text{C}$ , às 6h. O forro de laje por possuir elevada inércia térmica, garantiu uma maior uniformidade da temperatura interna, com atraso de 3 horas e amortecimento de  $14,2^{\circ}\text{C}$ , atingindo temperatura superficial máxima de  $34,8^{\circ}\text{C}$  às 18h, e mínima de  $26,9^{\circ}\text{C}$ , às 9h.

O fechamento vertical correspondente à parede da fachada noroeste ( $339^{\circ}$ ) foi o que apresentou maior temperatura superficial externa ao longo do dia. Aqueceu-se continuamente desde o início da manhã atingindo pico de  $50,9^{\circ}\text{C}$  às 17h., após o que se resfriou até a temperatura superficial mínima de  $27^{\circ}\text{C}$ , às 9h. Sua temperatura média foi de  $30,9^{\circ}\text{C}$ . Pela face interna, apresentou amortecimento de  $14^{\circ}\text{C}$  e atraso de 1h, com máxima de  $35,4^{\circ}\text{C}$ , às 18h e mínima de  $27,1$ , às 9h.

A parede da fachada leste ( $83^{\circ}$ ) apresentou temperatura superficial máxima de  $41,1^{\circ}\text{C}$  às 9h e mínima de  $24,3^{\circ}\text{C}$  às 6h, com média de  $31^{\circ}\text{C}$ . Pela face interna, apresentou um amortecimento de  $8,6^{\circ}\text{C}$  e atraso de  $32,6^{\circ}\text{C}$  às 17h, e a mínima de  $26,6^{\circ}\text{C}$ , às 8h, com temperatura superficial média de  $30^{\circ}\text{C}$ .

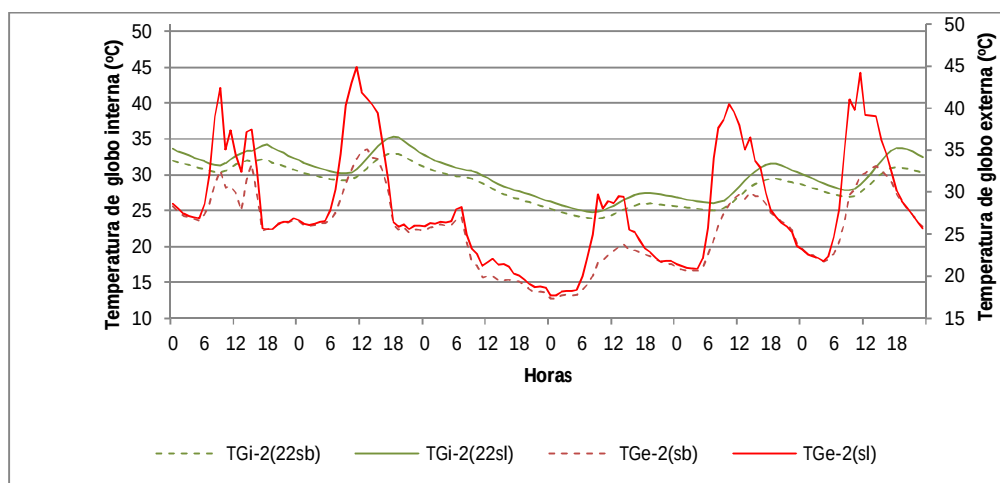


**Figura 86** - Temperaturas superficiais do piso (a), cobertura (b) e paredes (c), na estação seca

A parede orientada a sudoeste ( $263^{\circ}$ ) apresentou temperatura superficial interna máxima de  $34^{\circ}\text{C}$  às 18 h e mínima de  $26,7^{\circ}\text{C}$ , às 9h, com média de  $29,5^{\circ}\text{C}$ . A parede orientada a sudeste ( $159^{\circ}$ ) apresentou temperatura superficial interna máxima de  $31,9^{\circ}\text{C}$ , às 19h e mínima de  $26,7$ , às 9h, com média de  $29,2^{\circ}\text{C}$ .

Na estação chuvosa, a temperatura de globo foi a variável de maior sensibilidade para a exposição ao sol e à sombra, assim como no período seco.

Nos resultados das medições das salas 2sl e 2sb, no período de 11 a 16/12/2010, pode ser avaliada a influência do sombreamento nas condições internas das salas (Figura 87). As superfícies são menos aquecidas pela radiação solar e no centro da sala sombreada, a temperatura de globo foi cerca de 2,6°C menor.

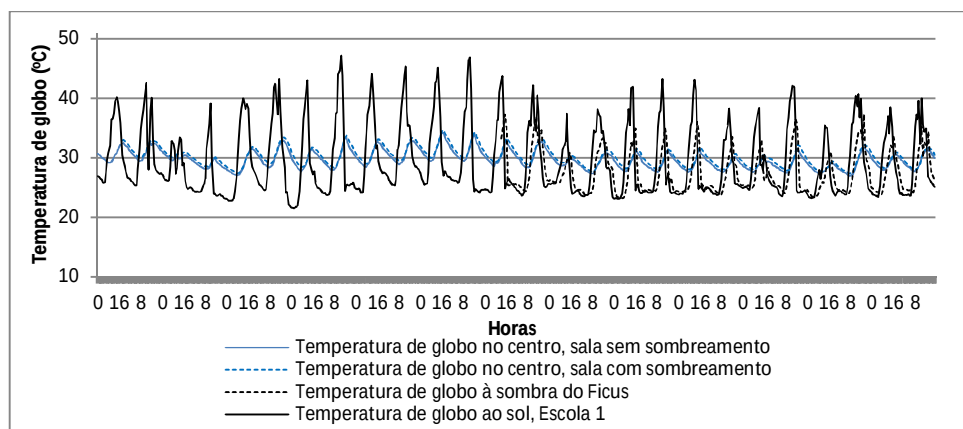


**Figura 87** - Marcha horária da temperatura de globo no centro da sala 2sl e 2sb, estação chuvosa, período de 11 a 16/12/2010

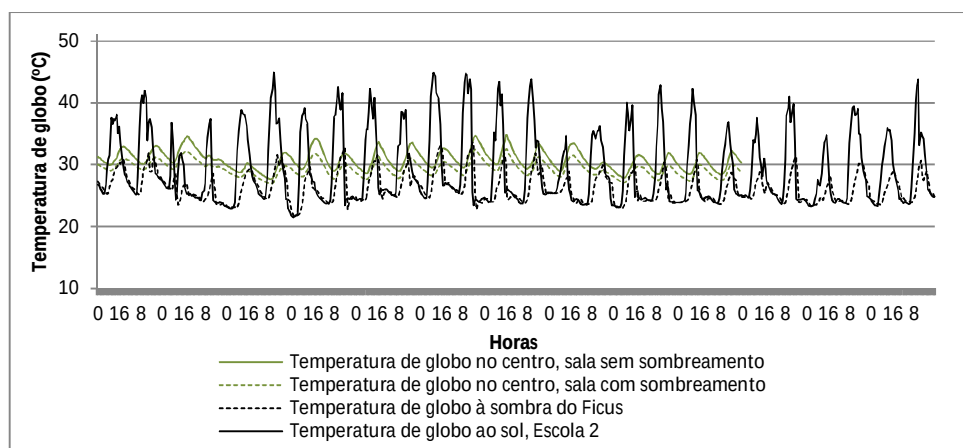
Nesta sala, o ambiente proporcionará uma condição de conforto térmico melhor e, em caso de condicionamento, o sistema será menos requerido. Especificamente, no caso desta tipologia de edifícios, cuja inércia é de média a pesada, maior será o tempo e energia gastos para resfriar o ambiente, pois os fechamentos apresentam uma taxa de resfriamento mais lenta.

Comparando as escolas, a sala sem sombreamento da Escola 2 (2sl) apresentou temperatura interna e temperatura de globo 0,7°C menor que a da Escola 1 (1sl) e umidade relativa maior 2%, tendo, portanto, melhor desempenho.

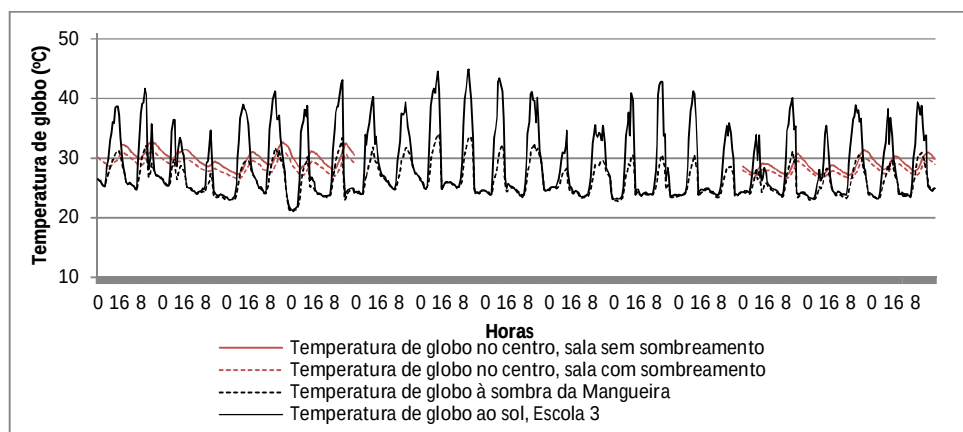
A Figura 88 mostra a variação da temperatura de globo ao sol, à sombra e internamente para a medição simultânea das três escolas.



a)



b)

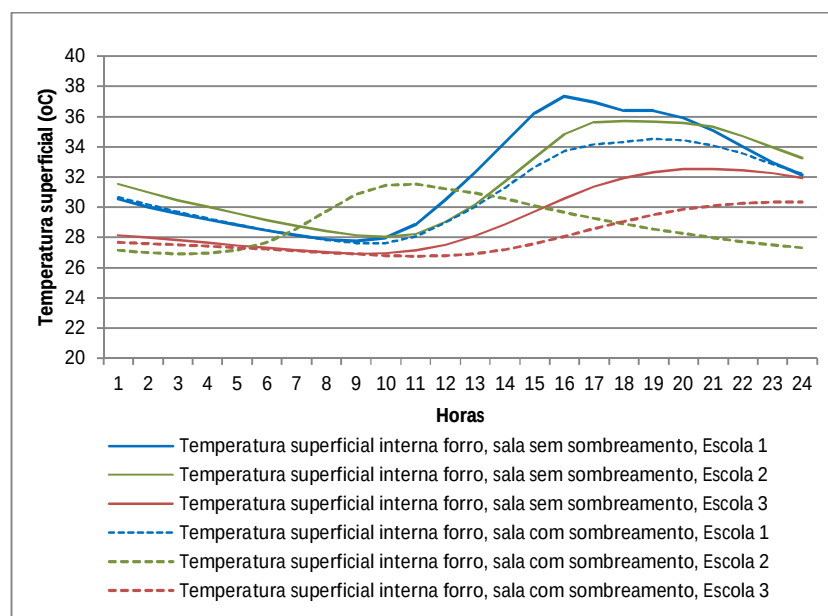


c)

**Figura 88** - Médias horárias da temperatura de globo ao sol, à sombra e no centro das salas com e sem sombreamento nas Escolas 1 (a), 2 (b) e 3 (c), estação chuvosa, período de 29/12/2010 a 23/01/2011

O Ficus (Escola 1) apresentou sutil distanciamento da Mangueira (Escola 2) e do Oiti (Escola 3) por ter o menor IAF e, portanto, permitir a passagem de maior radiação por entre sua copa, registrando maiores valores de TG internos. A atenuação do sol e sombra é de cerca 10°C.

O sombreamento arbóreo proporcionou redução nas temperaturas superficiais do forro, nas três escolas (Figura 89).



**Figura 89** – Temperaturas superficiais internas dos forros, estação chuvosa, dia 02/01/2011

Na Escola 1, a temperatura superficial máxima na sala sem sombreamento foi de 37,33°C, às 15h e a mínima de 27,75°C, às 8h. Para a sala sombreada obteve-se um amortecimento de 2,83°C e um atraso de 3h, obtendo-se máxima de 34,5°C, às 18h e a mínima de 27,63°C, às 8h.

Na Escola 2, na sala sem sombreamento obteve-se a temperatura superficial máxima de 35,70°C às 18h e a mínima de 28,03°C, às 9h. Na sala sombreada, a máxima chegou a 31,54°C às 10h e a mínima de 26,91°C à 1h. Aqui, observou-se maior influência do sombreamento da cobertura, que proporcionou um amortecimento de 4,16°C.

Na Escola 3, no forro da sala sem sombreamento mediu-se temperatura superficial da face interna do forro máxima de 32,53°C, às 20h e mínima de 26,91°C, às 8h. Na sala sombreada, mediu-se 30,32°C, às 22h e mínima de 26,75°C, às 10h. O amortecimento foi de 2,21°C e o atraso de 2h.

Na Escola 1, como a unidade arbórea era de pequeno porte, não proporcionava sombreamento na cobertura e a diferença nos valores encontrados tem origem em outras variáveis, não abordadas neste trabalho.

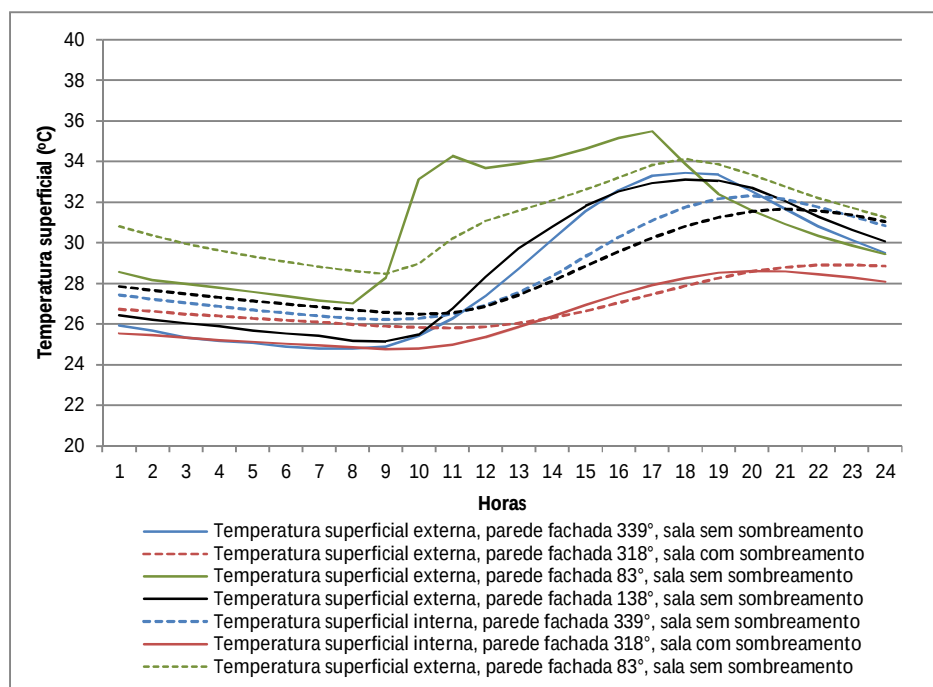
Na Escola 2, a Mangueira de grande porte proporcionava efetivo sombreamento da cobertura da sala durante todo o período vespertino e na direção oeste-leste, o que justifica o amortecimento de 4,16°C e a defasagem de 6h entre a ocorrência dos picos. A temperatura superficial máxima na sala exposta foi de 35,7°C, às 16h e a mínima de 27,01°C, às 7h. Na sala sombreada a máxima foi de 31,54°C, às 10h e a mínima de 26,91°C, às 2h.

Na Escola 3, embora o Ficus tivesse porte semelhante, proporcionava sombreamento menos efetivo da cobertura na direção noroeste-sudeste, podendo ser distinguido amortecimento térmico de 2,21°C e atraso de 1h. O pico na sala exposta foi de 32,53°C, às 20h e na sala sombreada de 30,32°C, às 22h.

Nos fechamentos verticais, apresentados na Figura 90, têm-se as maiores temperaturas superficiais na parede voltada para oeste (83°). Obteve-se máxima de 35,49°C, às 16h, e mínima de 27,01°C, às 7h, pela face externa. Nesta parede, pela face interna, o amortecimento foi de 1,35°C, com atraso de 1h, obtendo 34,14°C às 17h e mínima 28,47°C às 8h.

As paredes das fachadas noroeste (339°) e sudeste (138°), ambas de salas sem sombreamento arbóreo, pela face externa, tiveram comportamento muito semelhante: máximas de 33,12°C e de 33,46°C, às 17h. As mínimas foram de 25,14°C, às 8h e de 24,80°C às 7h, respectivamente. Pela face interna, manteve-se a semelhança, com máxima de 32,32°C, às 19h, e mínima de 26,22°C, às 8h, na parede noroeste e, na parede sudeste, máxima de 31,67°C, às 20h e mínima de 26,48°C, às 9h.

A menor temperatura superficial foi obtida na parede sombreada da fachada dos fundos da Escola 2, com orientação 318°, na qual ocorreu pouca diferença entre a temperatura externa e interna. A máxima externa foi de 28,92°C, às 22h e a mínima de 25,90°C, às 8h. Internamente, a máxima foi 28,62°C às 19h e a mínima de 24,77°C, às 8h. A máxima ocorreu após o horário de encerramento das atividades das salas de aula e a mínima praticamente no horário de início das mesmas.



**Figura 90** – Temperaturas superficiais externas e internas das paredes, estação chuvosa, dia 02/01/2011

Neste período, o efeito de maior relevância para o conforto é o bloqueio da radiação solar direta proporcionado pela copa que minimiza os efeitos da radiação solar, diminuindo as temperaturas superficiais das áreas sombreadas sob a projeção da copa. A transpiração das folhas contribui para a diminuição da temperatura do ar e consequente acréscimo de umidade. O solo úmido sob a copa contribui com o aumento da umidade, pelos efeitos da evaporação.

A diminuição da temperatura interna se dá pelo efeito atenuador da radiação solar pela copa.

As árvores bloqueiam a radiação solar direta e mantêm a temperatura do ar sob a copa menor que a céu aberto, pois a temperatura de suas folhas é mantida com temperatura sempre menor que a do ambiente, abrindo mão do recurso de evapotranspiração, com o qual libera vapor de água para o meio reduzindo a temperatura.

A umidade sob a copa, desta forma, é maior que fora dela, pois soma-se aos efeitos da transpiração das solos, a evaporação da água do solo, que se mantém mais úmido sob a copa que a céu aberto.

As superfícies externas sob efeito da sombra da árvore se aquecem menos e, conseqüentemente, transmitem menos calor para o interior da sala. Como a radiação solar incidente na parede exposta é maior que na sombreada, maior é a energia absorvida e transferida para o interior do ambiente e, conseqüentemente, piores serão as condições de conforto térmico internas.

Em havendo sistemas de resfriamento, maior energia será gasta pelo sistema, pois o ar do interior da sala ganhará calor das paredes por condução e, como no caso, suas inércias são médias, permanecerão por um determinado tempo com temperatura superficial elevada emitindo radiação para o ambiente interno. Esses resultados corroboram com Papadakis et al. (2001).

O comportamento da vegetação acima descrito torna seu uso para fins de controle solar passivo muito mais eficiente que outros elementos, como, por exemplo, persianas, toldos, dentre outros. O sombreamento arbóreo, portanto, constitui-se de uma estratégia passiva viável para controle da radiação solar.

### 4.3. COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS MEDIDAS E SIMULADAS

#### 4.3.1. Comparação das temperaturas externas medidas e simuladas

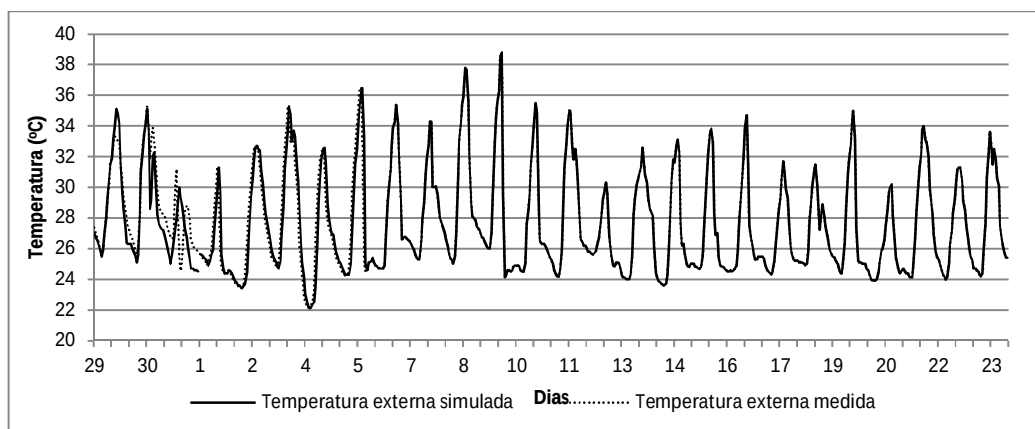
Para o período de 29/12/2010 a 23/01/2011 realizou-se a alteração dos dados do arquivo climático, substituindo os valores das médias horárias de temperatura de bulbo seco, umidade, umidade (calculada a partir da temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido), radiação solar global, direção e velocidade dos ventos - os três últimos obtidos de Callejas (2011) pelos medidos no pátio da Escola 2.

Os dados de temperatura externa resultantes de uma simulação são baseados no arquivo climático, mas distinguem-se dele, pois na simulação da temperatura do sítio, computam-se características do local (urbano, rural, suburbano, áreas próximas de oceano e indústrias).

A comparação dos resultados medidos e simulados de temperatura externa dos pátios escolares apresentou marcada similaridade (Tabela 31 e Figura 91). Como era de se esperar, os valores simulados apresentaram menor amplitude, com menor variação entre as máximas e mínimas justificada pelo conceito do arquivo climático, que elimina os extremos.

**Tabela 31** - Estatística descritiva da temperatura externa simulada com dados locais e medida, período de 29/12/2010 a 23/01/2011, Escola 2

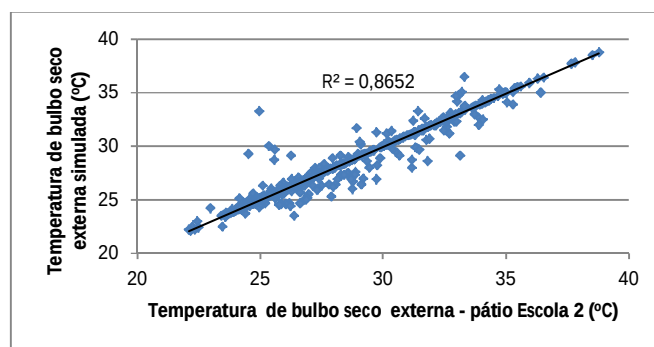
| ESTATÍSTICA DESCRITIVA | Temperatura externa simulada com o arquivo epw (°C) | Temperatura externa medida na sala sem sombreamento, Escola 2 (°C) |
|------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Média                  | 27,64                                               | 28,08                                                              |
| Máxima                 | 38,80                                               | 39,12                                                              |
| Mínima                 | 22,10                                               | 21,95                                                              |
| Desvio Padrão          | 3,35                                                | 3,69                                                               |



**Figura 91** – Marcha horária da temperatura externa medida e simulada com dados locais, período de 29/01/2010 a 23/01/2011, Escola 2

As diferenças entre os valores da temperatura medidos e simulados tem origem na distinta localização da estação meteorológica (que coleta os dados do epw) e dos sítios estudados, diferentes em termos de altitude, uso e ocupação do solo. Ainda assim, se comparadas as temperaturas médias, as mesmas apresentaram-se muito semelhantes, sendo o valor simulado de 27,39°C e os medidos de 28,08; 27,70 e 27,51°C, nas Escolas 1, 2 e 3, respectivamente.

Com base nesses resultados realizou-se análise de regressão, obtendo-se correlação positiva ( $R^2=0,86$ ) entre as temperaturas externas medidas e simuladas (Figura 92). Desta forma, pode-se inferir que o modelo explica a variabilidade da temperatura na área analisada.



**Figura 92** – Correlação linear para a temperatura externa medida e simulada com dados locais, período de 29/01/2010 a 23/01/2011, Escola 2

Tendo em vista que este estudo se propõe a atingir seus objetivos utilizando-se de simulação computacional e o software utilizado impõe a utilização do arquivo epw na ausência de dados de 8760 horas de medição, discute-se sua representatividade frente às outras bases de dados locais, anteriormente apresentadas na revisão bibliográfica, o que revela que o mesmo apresenta correlação positiva com todas elas, como mostra a Tabela 32.

**Tabela 32** – Correlação linear das médias mensais da temperatura de bulbo seco (°C) do arquivo epw com as bases de dados climáticas locais

| SÉRIE DE DADOS                             | R <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------|----------------|
| CAMPELO JR, PRIANTE FILHO e CASEIRO (1992) | 0,90671        |
| REDEMET 1981-1990 (2011)                   | 0,88286        |
| REDEMET 2001-2007 (2011)                   | 0,85010        |
| CPTEC 2003-2009 (2011)                     | 0,80716        |
| INMET 1987-1999 (2011)                     | 0,92287        |
| INMET 2000-2010 (2011)                     | 0,88017        |
| LEÃO, TRY 1994 (2007)                      | 0,91553        |
| INMET 1987-2010                            | 0,90242        |

Ressalta-se que médias horárias de temperatura do arquivo epw são mais amenas, refletindo uma situação sem extremos, com fins de avaliação do balanço de energia dos edifícios e predição do consumo energético parcial ou total dos edifícios simulados, derivado do sistema de condicionamento artificial, iluminação, motores e ocupação. A inserção de dados climáticos locais pode, portanto, não apresentar boa correlação com os resultados obtidos pela inserção de dados locais.

No item a seguir, procede-se à comparação dos dados medidos e simulados para o interior da edificação da Escola 2, com vistas à calibração do modelo.

#### 4.3.2. Comparação das temperaturas internas medidas e simuladas

A calibração do modelo foi feita através da comparação dos resultados obtidos por simulação da sala exposta ao sol da escola 2 (sala 2sl) com os dados medidos.

A taxa de infiltração, calculada pelo Método da Área de Frestas (Grings, 2003) considerando-se espessuras médias de frestas das esquadrias de 0,5cm, tendo sido encontrado o valor de 0,034m<sup>3</sup>/s ou 0,85 renovações de ar por hora. Larsen et al. (2010) utilizaram para a simulação nas condições desocupadas e esquadrias fechadas, o valor de 1 renovação de ar por hora, para janelas de mesma tipologia, em Salta, noroeste da Argentina, estando o valor obtido coerente.

Os valores da temperatura do solo calculados com o programa Slab constam da Tabela 33. Como referência tem-se os valores obtidos por Pinto-Junior et al. (2009) em área de pastagem, que obteve 32, 30, 28, 30, 34, 34, 35, 38, 35, 35, 36 e 32°C, para os meses de maio de 2005 a abril de 2006, a 5cm de profundidade. Outra referência são os dados da Fazenda Miranda, cujos valores medidos a 20cm de profundidade são de 29, 29, 28, 30, 30, 29, 27, 30, 33, 32, 30 e 31°C, para os meses de junho de 2010 a abril de 2011.

**Tabela 33** – Temperatura do solo sob a edificação

| Meses do ano | Temperatura do solo (°C) |
|--------------|--------------------------|
| Jan          | 29,0                     |
| Fev          | 29,2                     |
| Mar          | 28,7                     |
| Abr          | 28,1                     |
| Mai          | 26,5                     |
| Jun          | 25,2                     |
| Jul          | 24,4                     |
| Ago          | 24,2                     |
| Set          | 24,7                     |
| Out          | 25,7                     |
| Nov          | 27,0                     |
| Dez          | 28,2                     |

Para Florianópolis, Sorgato (2009) calculou as temperaturas do solo no Slab e encontrou os valores de 23,8, 23,9, 23,8, 22,5, 21, 19,4, 18,1, 19, 20, 19,9, 21 e

22°C, para uma edificação de 63m<sup>2</sup> e 32ml de perímetro. Na ausência de dados, EnergyPlus (2011), recomenda que seja adotado para a temperatura do solo 2°C a menos que a temperatura média medida internamente à edificação no período, cujo valor foi de 30,84°C, ficando, portanto, os valores da temperatura do solo excluídos de análise de sensibilidade para ajuste do modelo.

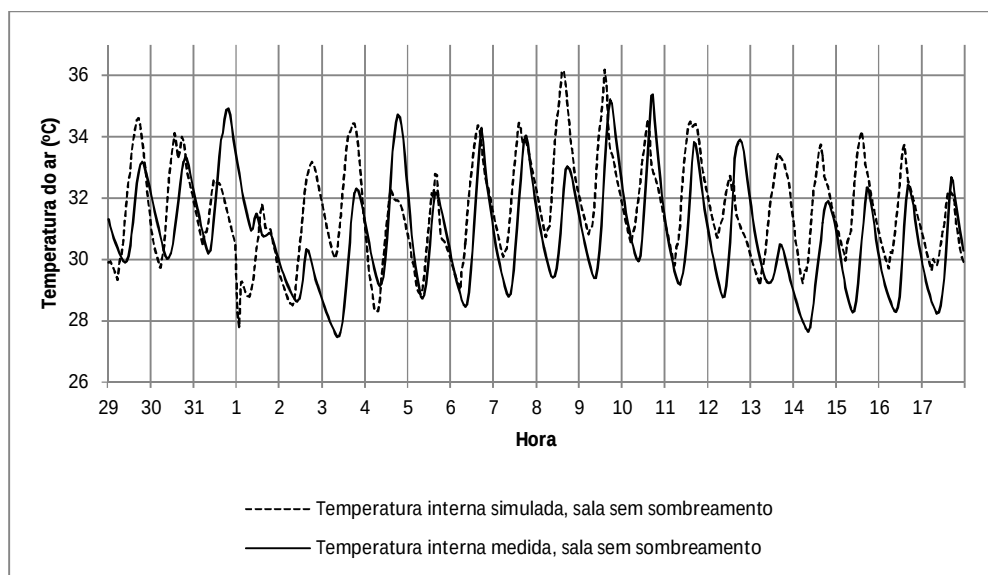
Com esses parâmetros, têm-se as seguintes temperaturas internas simuladas e medidas para a sala sem sombreamento constantes da Tabela 34 e Figuras 93-a e 93-b, sendo este modelo assumido como o modelo-base para o prosseguimento do estudo e denominado de Modelo-base.

A temperatura média para a sala sem sombreamento obtida foi de 31,66°C, máxima de 36,20°C e mínima de 27,82°C. Para a sala com sombreamento, a temperatura média foi de 30,68°C, a máxima de 35,11°C e a mínima de 26,92°C.

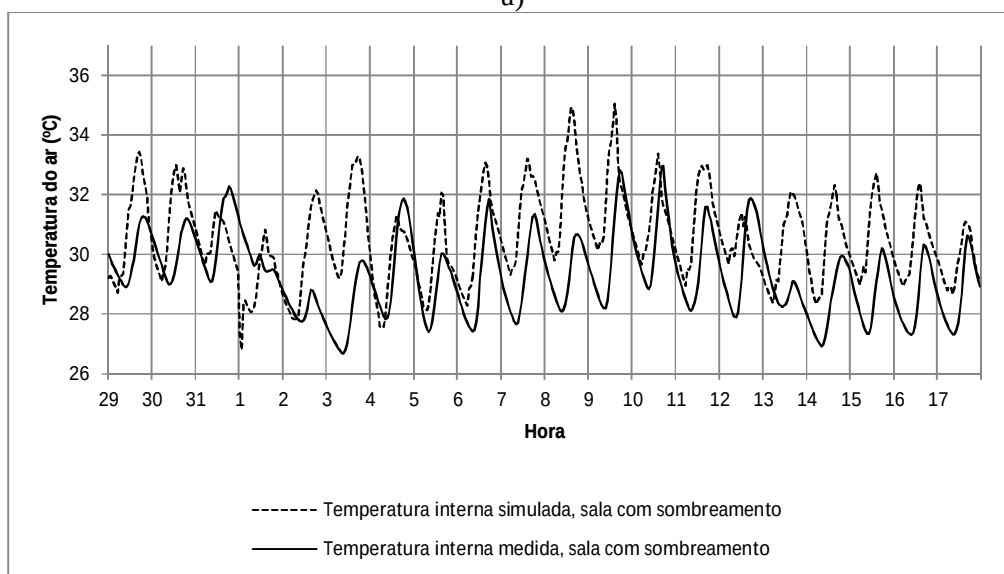
**Tabela 34** – Calibração da temperatura interna do modelo

| <b>ESTATÍSTICA DESCRITIVA</b> | <b>Temperatura interna modelo-base, sala sem sombreamento (°C)</b> | <b>Temperatura interna medida, sala sem sombreamento (°C)</b> | <b>Diferença entre a temperatura do modelo-base e a medida, sala sem sombreamento (°C)</b> |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Media</b>                  | 31,64                                                              | 30,84                                                         | 0,79                                                                                       |
| <b>Desvio Padrão</b>          | 1,61                                                               | 1,72                                                          | 1,77                                                                                       |
|                               | <b>Temperatura interna modelo-base, sala com sombreamento (°C)</b> | <b>Temperatura interna medida, sala com sombreamento (°C)</b> | <b>Diferença entre a temperatura do modelo-base e a medida, sala com sombreamento (°C)</b> |
| <b>Media</b>                  | 30,58                                                              | 29,32                                                         | 1,25                                                                                       |
| <b>Desvio Padrão</b>          | 1,47                                                               | 1,72                                                          | 1,52                                                                                       |

Em ambos os casos, a simulação superestimou os resultados e apresentou marcada similaridade com os dados medidos. A diferença entre as temperaturas simuladas nas salas com e sem sombreamento foi de 0,79°C e 1,25°C com desvio-padrão de 1,77 e 1,52°C, respectivamente.



a)



b)

**Figura 93** – Temperatura interna simulada e medida da sala sem sombreamento (a) e da sala com sombreamento (b)

A maior dificuldade neste ajuste se refere à ocorrência de chuvas, cujos efeitos não são possíveis de serem considerados na simulação. Com relação à Figura 93, os dias em que não ocorreram chuvas foram os dias 29/12, 30/12, 02/01, 04/01, 10/01, 14/01 e 17/01. As precipitações foram de 6mm no dia 01/01, 9mm em 03/01,

19mm em 05/01, 2mm em 06, 07 e 08/01, 11mm em 09/01, 4mm em 11/01, 19mm em 12/01, 15mm em 13/01, 30mm em 15/01 e 4mm em 16/01.

As diferenças foram consideradas aceitáveis para fins desse estudo, uma vez que o erro implícito no modelo do Energy Plus é de 8% e este resultado foi o mais próximo conseguido pela simulação. Outras possibilidades foram testadas, como a inserção do agrupamento de indivíduos arbóreos, mas os resultados não sofreram alterações ou resultaram em menor coerência. A hipótese da modelagem das árvores como pergolado e varanda também foram testadas resultando em valores menos coerentes que os apresentados, por serem elementos que não sombreiam a cobertura, que é um fechamento importante no cômputo do ganho de calor.

A diferença entre as temperaturas simuladas nas salas com e sem sombreamento de 0,79°C e 1,25°C encontradas na calibração foram consideradas satisfatórias para fins deste trabalho. Estes resultados estão de acordo com Kusuda (1981), que comparou resultados de programas antecessores do Energy Plus, concluindo que as temperaturas simuladas foram maiores que as medidas. Também estão em consonância com Yik et al. (1995) que encontraram diferenças de 0,3, 1,5 e 2,9°C entre as temperaturas simuladas e medidas e classificaram os dois primeiros como excelentes e o último como bom. A temperatura simulada foi maior que a medida, o que também foi encontrado por Guyon et al. (1999). Também admitiram como satisfatória a comparação dos resultados experimentais e simulados com o EnergyPlus, Grings e Beyer (2002).

#### **4.4. DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO**

##### **4.4.1. Desempenho térmico das salas com e sem sombreamento**

Com o modelo acima e a partir do arquivo epw, realizou-se simulações para as 8760 horas anuais de:

- a) salas implantadas no sentido norte-sul: sem sombreamento (exposta\_NS), com sombreamento nas quatro fachadas (somb\_total\_NS) e com sombreamento na fachada oeste (somb\_O);
- b) salas implantadas no sentido leste-oeste: sem sombreamento (exposta\_LO), com sombreamento nas quatro fachadas (somb\_total\_LO) e com sombreamento na fachada norte (somb\_N).

A Tabela 35 apresenta a temperatura interna das salas expostas e sombreadas para a implantação NS e LO.

**Tabela 35** – Temperatura interna dos modelos de salas expostas (exposta\_NS e exposta\_LO), com sombreamento em uma fachada (somb\_O e sombr\_N) e com sombreamento em todas as fachadas (somb\_total\_NS e sombr\_total\_LO)

| <b>ESTATÍSTICA DESCRITIVA</b> | <b>T(exposta_NS)<br/>(°C)</b> | <b>T(somb_O)<br/>(°C)</b> | <b>T(somb_total_NS)<br/>(°C)</b> |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| <b>Media</b>                  | 32,08                         | 31,20                     | 30,09                            |
| <b>Máxima</b>                 | 42,80                         | 39,89                     | 37,67                            |
| <b>Mínima</b>                 | 14,96                         | 14,82                     | 14,76                            |
| <b>ESTATÍSTICA DESCRITIVA</b> | <b>T(exposta_LO)<br/>(°C)</b> | <b>T(somb_N)<br/>(°C)</b> | <b>T(somb_total_LO)<br/>(°C)</b> |
| <b>Media</b>                  | 31,90                         | 30,99                     | 30,33                            |
| <b>Máxima</b>                 | 41,10                         | 40,27                     | 38,62                            |
| <b>Mínima</b>                 | 14,97                         | 14,51                     | 14,55                            |

A maior temperatura média foi encontrada na sala exposta implantada no sentido norte-sul (Texposta\_NS), no valor de 32,08°C, seguida pela sala exposta implantada no sentido leste-oeste (Texposta\_LO), no valor de 31,9°C.

As salas com sombreamento apenas na fachada da janela baixa, denominadas de T(somb\_O e Tsomb\_N), resultaram em temperaturas médias internas de 31,20 e 30,99°C, respectivamente.

As salas com sombreamento total implantadas na direção norte-sul e leste-oeste, denominadas de  $T_{\text{sombr\_total\_LO}}$  e  $T_{\text{(sombr\_total\_NS)}}$ , resultaram em temperaturas médias de 30,33 e 30,09°C, respectivamente.

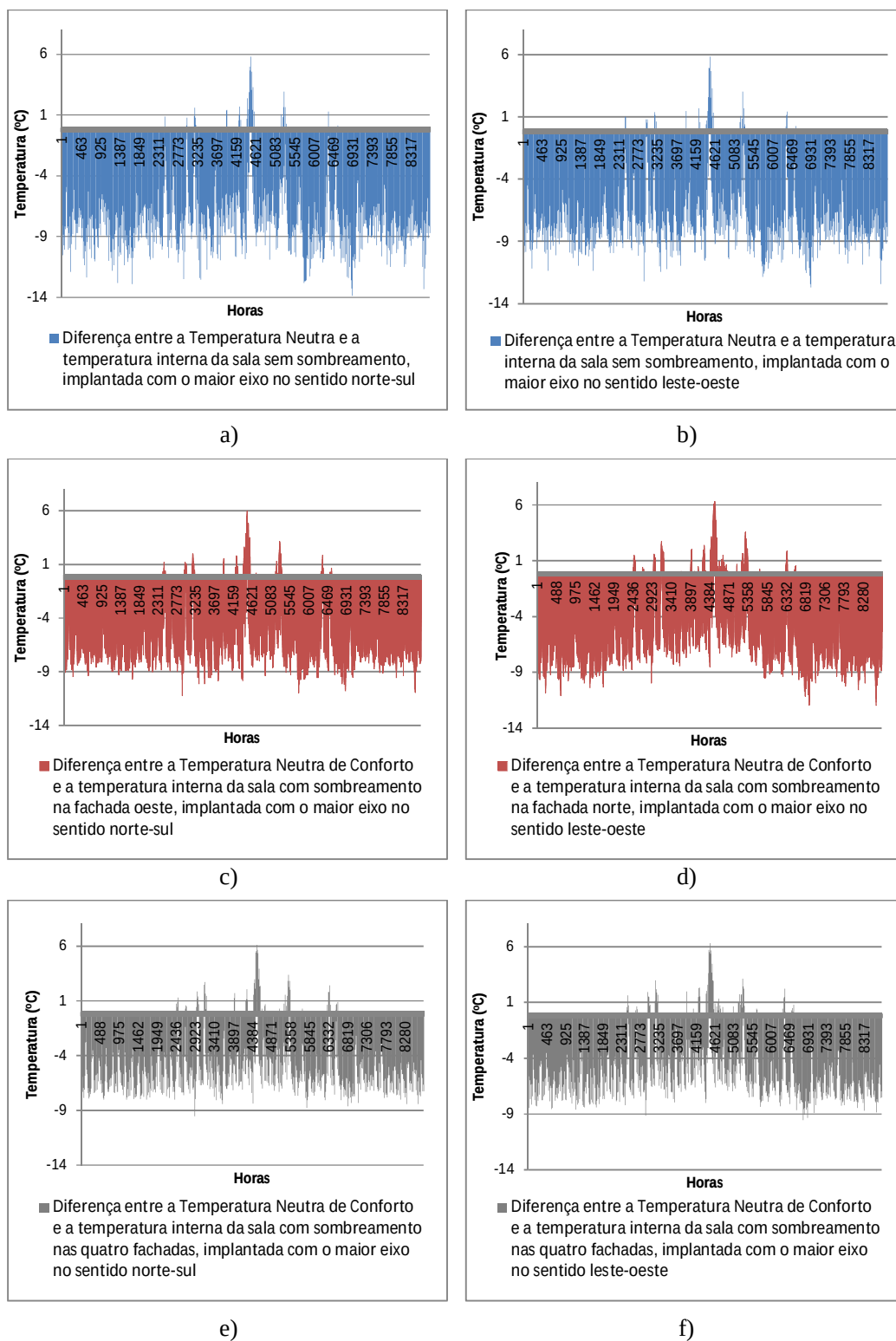
As temperaturas máximas encontradas foram de 42,8 e 41,10°C nas salas expostas implantadas a norte-sul e leste-oeste, respectivamente; de 39,89 e 40,27°C com sombreamento norte e oeste, respectivamente e de 37,67 e 38,62°C nas salas implantadas com sombreamento total implantadas a norte-sul e a leste-oeste, respectivamente.

O impacto do sombreamento na temperatura interna foi de 2°C em média, em relação a uma edificação totalmente exposta e totalmente sombreada, implantada na direção norte-sul. Para uma edificação implantada no sentido leste-oeste, o impacto do sombreamento na temperatura interna foi de 1,57°C. Considerando-se apenas uma fachada sombreada (oeste ou norte) o impacto do sombreamento na temperatura interna foi de 0,9°C.

A Figura 94 apresenta a diferença entre a temperatura neutra de conforto de 26°C (De Dear e Brager, 2002) e a temperatura interna das salas expostas, sombreadas em uma face e em todas as faces, para as orientações de implantação norte-sul e leste-oeste.

Nas salas implantadas a norte-sul, tem-se que a diferença média entre a temperatura neutra de conforto e a temperatura interna na sala exposta ( $\text{exposta\_NS}$ ) foi de -6°C, na sala com sombreamento na face oeste, de -5,11°C e, na sala sombreada nas quatro faces, de 4°C.

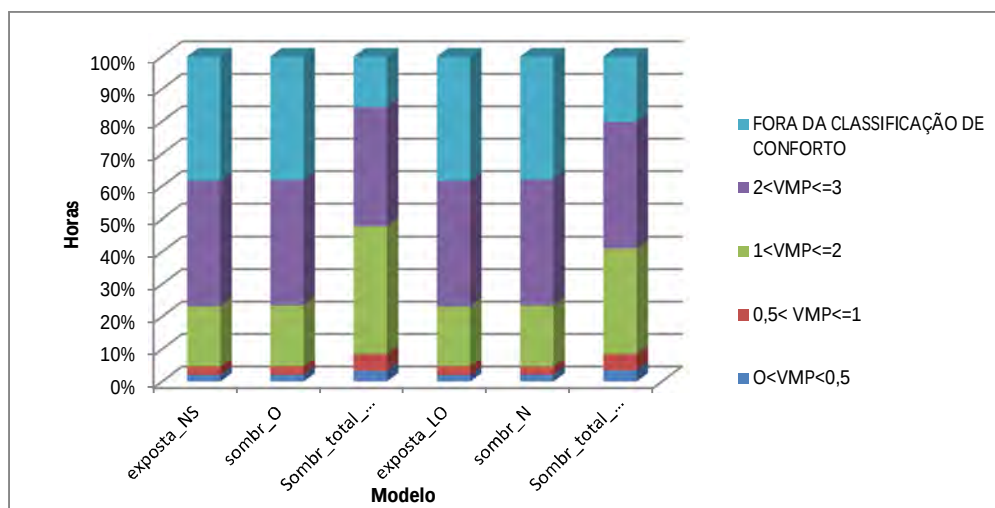
Nas salas implantadas a leste-oeste, tem-se que a diferença média entre a temperatura neutra de conforto e a temperatura interna da sala exposta ( $\text{exposta\_LO}$ ) foi de -5,82°C, na sala com sombreamento na face norte, de -4,90°C e na sala sombreada nas quatro faces, de -4,25°C.



**Figura 94** – Diferença entre a Temperatura Neutra de Conforto e a temperatura interna dos modelos para as 8760 horas anuais

O número de horas anuais abaixo da Temperatura Neutra de Conforto de 26°C sobem de 6 para 9%, no modelo de sombreamento de uma fachada e de 6 para 10%, para o modelo de sombreamento total. De modo geral, observa-se que a temperatura interna de todas as salas é maior que a Temperatura Neutra, com exceção de alguns dias da estação seca.

A condição de conforto térmico dos modelos consta da Figura 95, segundo o Método de Fanger. Os modelos sem sombreamento e com uma fachada sombreada resultaram em 2% das horas na faixa de conforto, com VMP menor que 0,5, 3% das horas com ambiente térmico classificado como levemente quente ( $0,5 < \text{VMP} < 1$ ), 18% das horas com classificação de quente ( $1 < \text{VMP} < 2$ ) e 38% das horas como muito quente ( $\text{VMP} > 3$ ). O impacto do sombreamento na sensação de conforto térmico das salas só foi evidenciado quando se dispõe da estratégia nos modelos com as quatro fachadas sombreadas, nas quais aumentam-se as horas classificadas como quente para 39%.



**Figura 95** – Conforto térmico nos modelos simulados

O que justifica o baixo impacto do sombreamento na sensação de conforto, foi o fato de que a simulação não contemplou o resfriamento evaporativo, que aumenta a umidade do ar externa e internamente às salas, influenciando na percepção do ambiente térmico por parte dos usuários.

A Figura 96 apresenta a diferença entre as temperaturas superficiais externa e interna da parede orientada a oeste no caso da implantação da sala tendo a maior dimensão no sentido norte-sul, para os modelos de sala exposta (exposta\_NS), com sombreamento na face oeste (somb\_O) e com sombreamento em todas as faces (somb\_total), para as implantações norte-sul e o balanço térmico destas paredes.

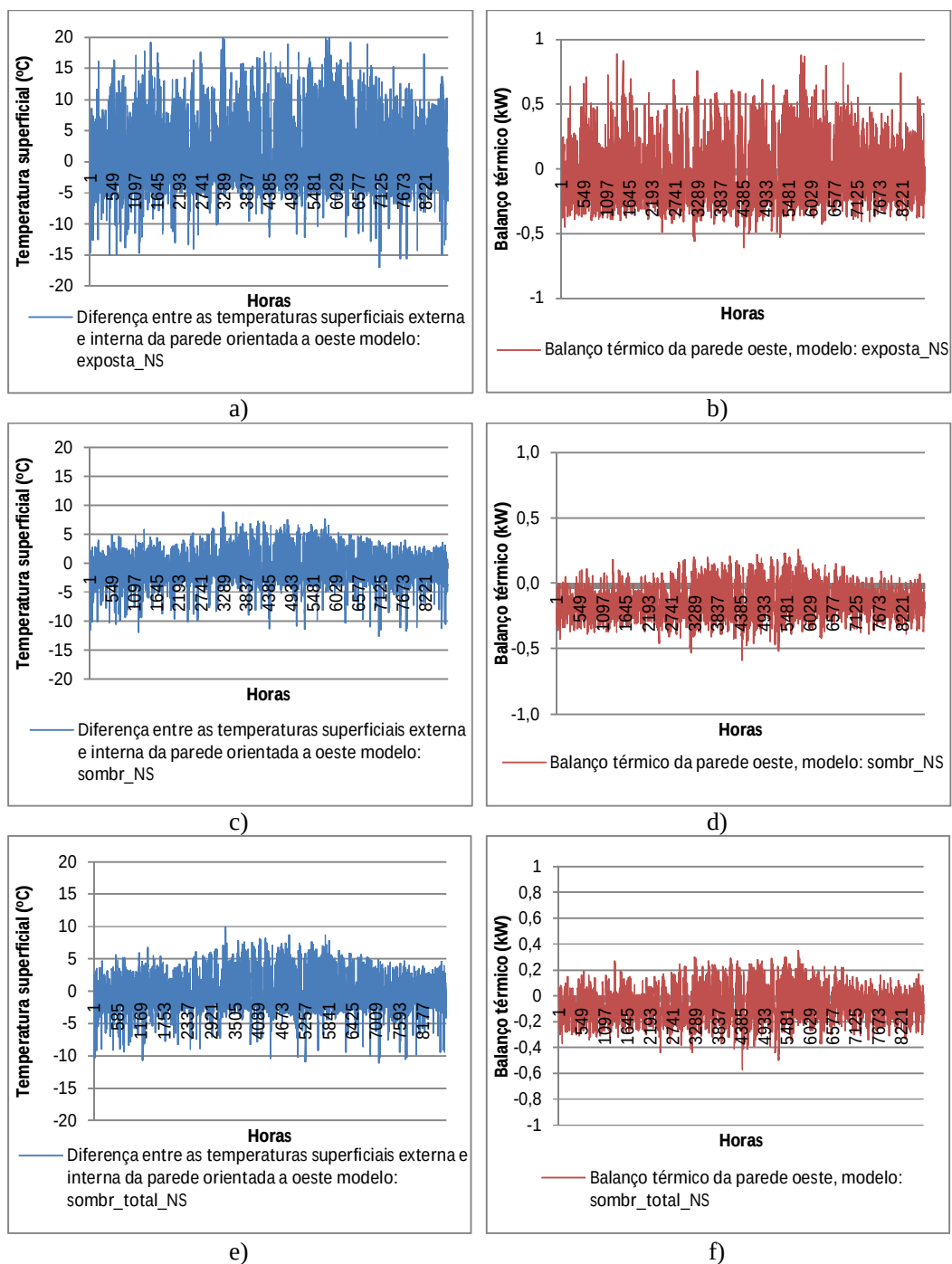
No modelo sem sombreamento (96-a e 96-b), a temperatura superficial externa média da parede orientada a oeste foi de  $31,6^{\circ}\text{C}$ , no modelo com sombreamento a oeste, o valor dessa temperatura foi de  $29,13^{\circ}\text{C}$  e, no modelo com sombreamento em todas as fachadas, foi de  $28,78^{\circ}\text{C}$ . Na face interna, as temperaturas foram de  $32,12$ ,  $30,44$  e  $29,5^{\circ}\text{C}$ . As diferenças médias são, portanto, de  $0,5$ ,  $1,3$  e  $0,7^{\circ}\text{C}$ , respectivamente aos três modelos.

Quanto ao balanço térmico, ocorre que sempre que a temperatura superficial da parede é maior que a temperatura do ar externo, a parede perde calor. No modelo da sala exposta (Figura 97-b), as perdas anuais totalizam  $5736\text{ kW}$  e, os ganhos,  $2906\text{ kW}$ .

No sombreamento simulado, de árvore de grande porte, com elevada área foliar total, ocorre que a temperatura do ar externo diminui sob a copa, em relação a céu aberto, ficando este menor que a temperatura superficial da parede. Devido a este fato, as perdas anuais do modelo com sombreamento oeste aumentaram para  $7312\text{ kW}$  e os ganhos diminuíram para  $1287\text{ kW}$  (Figura 97-d).

No modelo com sombreamento total, as temperaturas em todas as paredes ficam mais estáveis e, com isso, a temperatura do ar no interior da sala diminui em relação aos outros dois modelos, assim como as diferenças entre as temperaturas superficiais externas e internas que totalizam perdas anuais de  $6298\text{ kW}$  e ganhos de  $2227\text{ kW}$  (Figura 97-f).

O modelo sem sombreamento resulta em perdas de calor pela parede oeste de  $2830\text{ kW}$  anuais. Nos modelos com sombreamento da parede oeste ocorrem perdas de  $6025$  e  $4071\text{ kW}$  anuais, respectivamente.



**Figura 96** – Diferença entre as temperaturas superficiais externas e internas da parede orientada a oeste nos modelos exposta\_NS (a), sombr\_O (c) e sombr\_total\_NS (e) e os respectivos balanços térmicos em b), d) e f), para as 8760 horas anuais

A Figura 97 apresenta a diferença entre as temperaturas superficiais externa e interna da parede orientada a norte na condição da sala exposta, com sombreamento na face norte e com sombreamento em todas as faces, para a implantação leste-oeste e o balanço térmico desta parede.

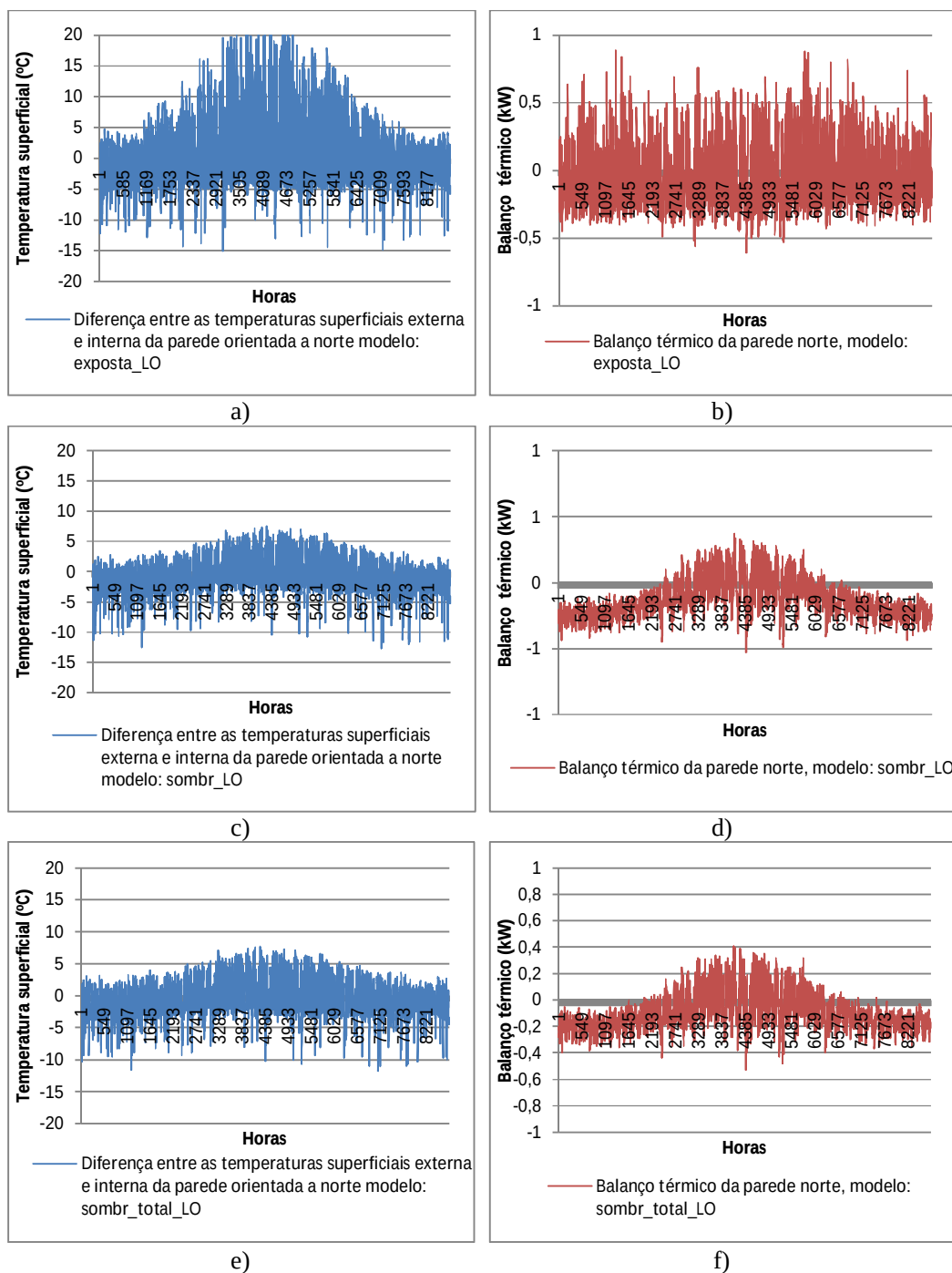
No modelo sem sombreamento, a temperatura superficial externa média da parede orientada a norte é de  $31,91^{\circ}\text{C}$ , no modelo sombreamento a norte, essa temperatura decresceu para  $29,22^{\circ}\text{C}$  e no modelo com sombreamento em todas as fachadas, foi para  $29,04^{\circ}\text{C}$ .

Internamente as temperaturas foram de  $32,21$ ,  $30,36$  e  $29,88^{\circ}\text{C}$ . As diferenças médias são, portanto de  $0,3$ ,  $1,14$  e  $0,84^{\circ}\text{C}$ , respectivamente aos três modelos.

No modelo da sala exposta (Figura 97-b), as perdas anuais totalizam  $6029\text{ kW}$ , e os ganhos,  $2642\text{ kW}$ . As perdas anuais do modelo com sombreamento oeste aumentaram para  $6886\text{ kW}$  e os ganhos diminuíram para  $1751\text{ kW}$ .

No modelo com sombreamento total, as perdas foram de  $6680\text{ kW}$  e os ganhos,  $1921\text{ kW}$ .

O modelo sem sombreamento resulta em perdas de calor pela parede oeste de  $3387\text{ kW}$  anuais. Nos modelos sombreamento da parede oeste e sombreamento total ocorrem perdas de  $5135$  e  $4759\text{ kW}$  anuais, respectivamente.



**Figura 97** – Diferença entre a temperatura superficial externa e interna da parede com orientação norte nos modelos *exposta\_LO* (a), *sombr\_N* (c), *sombr\_total* (e) e os respectivos balanços térmicos em b), d) e f)

A Figura 98 apresenta a o balanço térmico mensal das salas implantadas a norte-sul (Figura 98-a) e a leste-oeste (Figura 98-b), resultante da somatória dos ganhos e perdas que ocorrem na edificação.

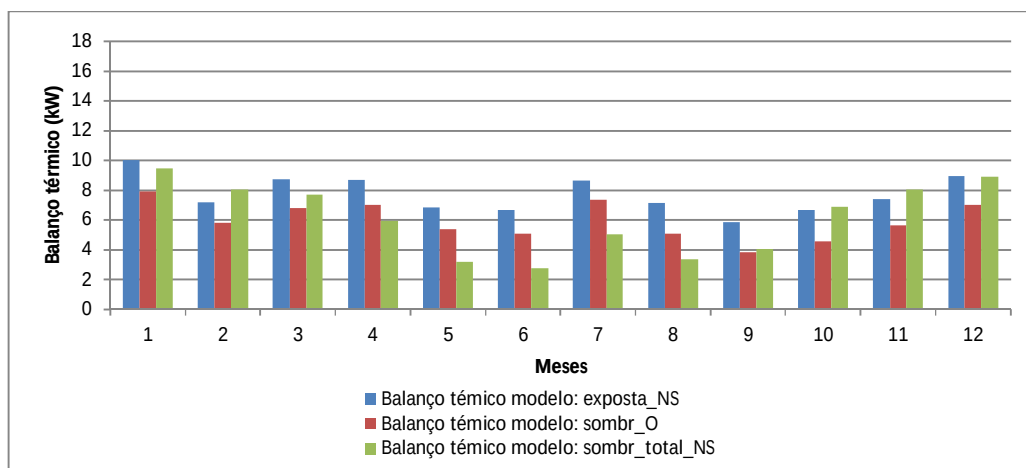
O balanço térmico refere-se aos ganhos e perdas que ocorrem na edificação devidas ao ganho de calor pela envoltória (piso, cobertura, paredes e esquadrias), ocupação, iluminação e ventilação.

O saldo de energia térmica nas paredes e coberturas expostas é maior que nas sombreadas, sendo maior a energia absorvida e transferida para o interior do ambiente e, conseqüentemente, piores serão suas condições de conforto térmico. Em havendo sistemas de resfriamento, maior energia será gasta pelo sistema, pois o ar do interior da sala ganhará calor da envoltória por condução proporcionalmente à inércia da mesma.

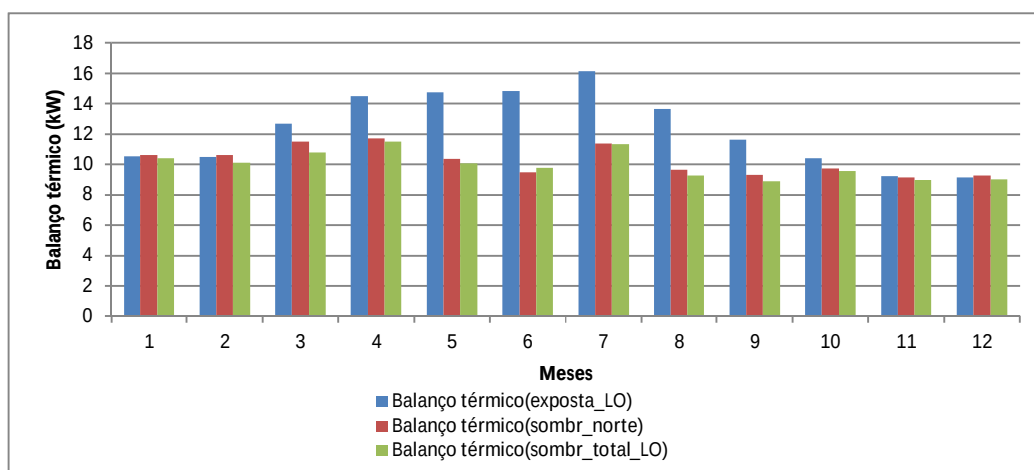
Para a orientação norte-sul, no modelo da sala exposta (exposta\_NS), os valores médios, máximos e mínimos do saldo de energia térmica entre o edifício e o meio foram de 7,72, 10,02 e 5,85 kW, respectivamente, sendo o maior ocorrido no mês de janeiro e o menor no mês de setembro.

No modelo da sala com sombreamento na fachada oeste (somb\_O), os valores médios, máximos e mínimos foram de 5,95, 7,9 e 3,8 kW, com o menor valor ocorrendo no mês de setembro e o maior, no mês de janeiro.

Para o modelo com sombreamento em todas as fachadas (somb\_total\_NS) obteve-se os valores médios, máximos e mínimos de 6,1, 9,45 e 2,76 kW, com o maior valor no mês de janeiro e o menor no mês de junho.



a)



b)

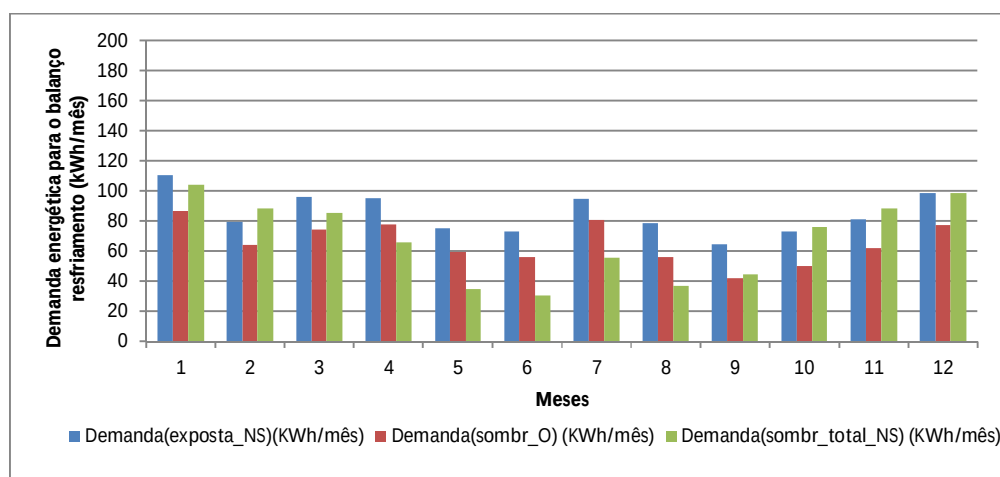
**Figura 98** – Balanço térmico das salas orientadas a norte-sul e leste-oeste.

Para a orientação leste-oeste, no modelo da sala exposta (exposta\_LO), os valores médios, máximos e mínimos do saldo de energia térmica na edificação foram de 12,3, 16,1 e 9,1 kW, respectivamente, sendo o maior ocorrido no mês de julho e o menor no mês de dezembro. No modelo da sala com sombreamento na fachada norte (sombr\_N), os valores médios, máximos e mínimos foram de 10,2, 11,7 e 9,1 kW, com o menor valor ocorrendo no mês de novembro e o maior, no mês de maio. Para o modelo com sombreamento em todas as fachadas (sombr\_total\_LO) obtiveram-se

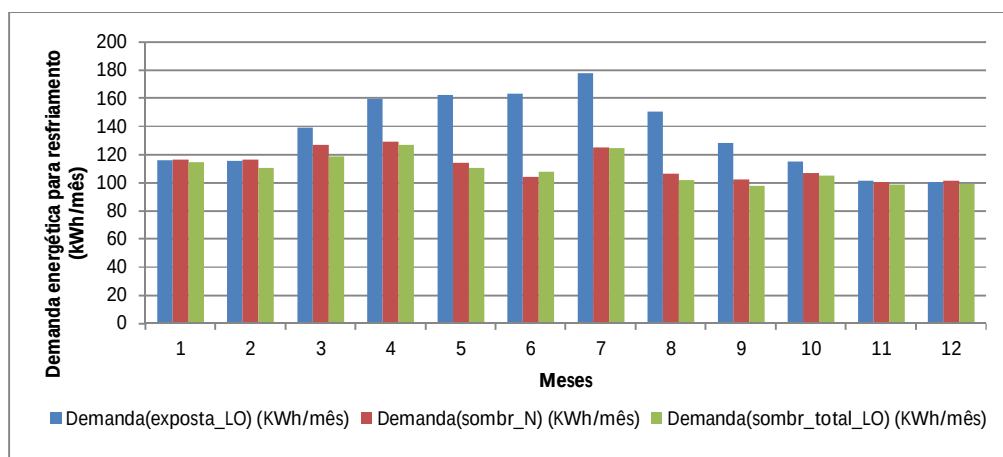
os valores médios, máximos e mínimos de 9,9, 11,5 e 8,8 kW, com o maior valor no mês de abril e o menor no mês de setembro.

O saldo em todos os meses do ano foi positivo, ou seja, a edificação requer sistematicamente estratégia de resfriamento. Nesse sentido, observou-se que o sombreamento reduziu a demanda energética desta estratégia.

A demanda energética para resfriamento da edificação é evidenciada na Figura 99.



a)



b)

**Figura 99** – Demanda para resfriamento das salas orientadas a norte-sul e leste-oeste.

O modelo `exposta_LO` apresentou a maior demanda média, no valor de 178 kWh. Em seguida, os modelos `sombr_N` e `sombr_total_LO`, com valores de 129 e 127 kWh. A menor demanda foi para o modelo `sombr_O`, no valor de 87 kWh, seguido pelos modelos `sombr_total_NS` e `exposta_NS`, com valores de 104 e 110 kWh.

Estes valores, obtidos para uma sala de aula, são coerentes com o consumo médio das escolas estaduais<sup>5</sup> em Cuiabá, nos quais consta o consumo médio de 5.610 kWh/mês.

Para a implantação da sala a norte-sul, a adoção da estratégia de sombreamento representa em média uma redução de 18% na demanda anual de energia para refrigeração. Já para a sala implantada na direção leste-oeste, este impacto é maior: 50% na demanda média anual.

---

<sup>5</sup> Dados fornecidos pela concessionária REDE CEMAT S/A.

## 5. CONCLUSÃO

Na estação seca, os efeitos de atenuação da temperatura sob as copas das unidades arbóreas de sombreamento foram percebidos, com ocorrência de variação relativa da temperatura sob a copa do Ficus foi de 0,16% e na da Mangueira de 0,51%. A variação relativa da umidade, durante as horas de brilho solar, sob as copas foi de 2,93 para o Ficus e de 4,17% para a Mangueira. Neste período de medição, no qual as noites são frias e os dias são quentes, que a árvore desempenha papel de abrigo, ocorrendo a situação em que, no período noturno, a umidade e a temperatura do ar sob a unidade arbórea são maiores que a céu aberto, justificado pelo efeito de barreira proporcionado pela copa, que bloqueia o movimento das camadas de ar e a liberação do calor radiante das superfícies aquecidas após o pôr do sol, resultando em temperaturas mais elevadas sob ela.

Na estação chuvosa, a variação relativa de temperatura no Ficus foi de 6,75%; na Mangueira, de 10,55% e, no Oiti, de 8,31%. A variação relativa da umidade foi de 10,06; 15,17 e 14,53% para o Ficus, Mangueira e Oiti, respectivamente. Neste período de medição o sombreamento da porção do solo sob a copa, bloqueia os efeitos da radiação solar direta, o deixa mais úmido e permite a ocorrência de maior taxa de evaporação que a céu aberto. Esse efeito acentua-se com o aumento do porte da árvore (maior volume de copa), bem como com o aumento do IAF, sendo, por isso, mais acentuado na Mangueira, cujo IAF era de .

As copas proporcionaram maior atenuação tanto maior o índice de área foliar e a área foliar total das árvores estudadas, tendo sido encontrados IAF de 10,1, 7, 4 e 5,48 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> para a Mangueira, Oiti e Ficus, respectivamente..

O sombreamento por Mangueira e Oiti, ambos de grande porte, proporcionaram atenuação da temperatura interna de 1,42°C e de 1,37°C no centro das salas sombreadas. As perdas de luz natural correspondentes foram de 83 e 86%.

Considerando-se a proximidade das salas medidas e o fato de que as diferenças nos valores da temperatura encontrados decorrem apenas da condição de sombreamento, conclui-se que o impacto desta estratégia foi relevante .

A simulação computacional permitiu a extrapolação dos resultados e contemplou modelos implantados em duas orientações: norte-sul e leste-oeste. O impacto do sombreamento na temperatura interna foi de 2°C em média, em relação a uma edificação parcial e totalmente sombreada, implantada na direção norte-sul. Para uma edificação implantada no sentido leste-oeste, este impacto do sombreamento na temperatura interna foi de 1,5°C. Considerando-se apenas uma face sombreada (oeste ou norte) o impacto do sombreamento na temperatura interna foi de 0,9°C.

O balanço térmico resultou em ganhos de calor pelas salas em todos os meses do ano, resultando em demanda para resfriamento. Para a implantação norte-sul, a adoção da estratégia de sombreamento representa em média uma redução de 18% na demanda anual de energia para refrigeração. Já para a sala implantada na direção leste-oeste, este impacto é maior: 50% na demanda média.

A simulação não apresentou sensibilidade para avaliação do conforto térmico, tendo sido encontrada pouca variação no Voto Médio Previsto entre as salas, para o que se recomenda a realização de pesquisas que consideram o efeito da evapotranspiração da vegetação.

Recomenda-se, também, a realização da pesquisa em ambientes ocupados, para o que deve ser operacionalizada a medição, visto que a interferência humana alteraria o controle das diversas variáveis e permitiria aprofundamento na avaliação da sensação de conforto térmico dos ocupantes e na investigar da percepção ambiental da comunidade escolar quanto ao papel das árvores no ambiente da escola.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 2 parâmetros de conforto térmico.** 2008.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413: Iluminância de interiores.** Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** Rio de Janeiro, 2005.

ABREU, L. V, LABAKI, L. C. Conforto térmico propiciado por algumas espécies arbóreas: avaliação do raio de influência através de diferentes índices de conforto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 103-117, out./dez. 2010.

AFUBRA. Associação dos Fumicultores do Brasil. A Floresta e o Ar. **Série Ecologia**. Volume 4. 2000. Disponível em: <http://www.afubra.com.br>

AKBARI, S. Shade trees reduce building energy use and CO<sub>2</sub> emissions from power plants. **Environmental Pollution**, 116, p. 119-126, 2002.

AYRES, M. C. R. TARGA, L. A., PEIXOTO, P. P. P. Influência do sombreamento natural da Sibipiruna (*Caesalpinia peltrophoroides*) na temperatura de edificações. In: **Energ. Agric.**, Botucatu, vol. 20, n. 1, 2005, p. 62-76.

ABREU, A. L. P. **Método estimativo da temperatura interna de edificações residenciais em uso.** 2004. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, INC. – **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE Standard 55.** Atlanta, 2004.

BARBOSA, M. J.; WELLER, G. C. B.; LAMBERTS, R. Disposição dos equipamentos para medição da temperatura do ar em edificações. **Ambiente Construído**, v. 7, p. 89-108, jul-set 2007.

BALTAR, M. G. **Redução da demanda de energia elétrica utilizando parâmetros construtivos visando ao conforto térmico**. 2006. 123f. Mestrado em Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

BATISTA, J. O., LAMBERTS R., GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 79-97, out./dez. 2011.

BOGO, A.; PIETROBON, C. E.; BARBOSA, M. J.; GOULART, S.; PITTA, T.; LAMBERTS, R. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico. Relatório Interno 02/94**. Núcleo de Pesquisa em Construção. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina.

BUENO-BARTHOLOMEI, C. L.; LABAKI, L. C. How Much does the Change of Species of Trees Affect their Solar Radiation Attenuation? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 5, 2003, Lodz. **Proceedings....** Lodz: IAUC, 2003. v. 1. p. 267-270.

BUTTNER, S. B. **Avaliação de desempenho térmico e energético de coberturas em clima tropical continental**. 2008. 311f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.

CALLEJAS, I. J. A. **Balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT**. 2011. Tese (Doutorado em Física Ambiental). Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT.

CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; OLIVEIRA, A. S.; NOGUEIRA, M. C. J. A. Uso do solo e temperatura superficial em área urbana. **Mercator**, Fortaleza, v. 10, n. 23, p. 207-223, set./dez. 2011.

CAMPELO JÚNIOR, J. H.; PRIANTE FILHO, N.; CASEIRO, F. T. Caracterização macroclimática de Cuiabá. In: III Encontro Nacional de Estudos Sobre o Meio Ambiente, 1991, Londrina, PR, Brasil. **Anais do III Encontro Nacional de Estudos sobre o Meio Ambiente**, 1991. p. 545-552.

CHARLES-EDWARDS, D. A.; THORNLEY, J. H. M. **Light Interception by an Isolated Plant: A Simple Model**. Glasshouse Crops Research Institute, Lilllehamptin, Sussex Received: 6 December 1972.

CHEN, Y. **The intervention of plants in the conflicts between buildings and climate – A case study in Singapore**. 2006. 336f. Tesis (Doctor in Philosophy). Department of Building, National University of Singapore, Singapore.

COX, E. P. Interação entre clima e superfície urbanizada: o caso da cidade de Várzea Grande/MT. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Ciências

humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT.

CRAWLEY, D., HUANG, J. **Does it matter which weather data you use in energy simulations?** Building energy simulation user news, Berkeley, v. 18, n. 1, p. 2-12, spring/1997. Disponível em: <<http://gundog.lbl.gov/dirun/1801.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2005.

CRAWLEY, D.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; HUANG, Y. J.; PEDERSEN, C. O.; STRAND, R. K.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; WITTE, M. J.; GLAZER, J. EnergyPlus: create a new generation building energy simulation program. Energy and Buildings, vol. 33, 2001.

CUIABÁ. **Prefeitura Municipal de Cuiabá. Evolução do Perímetro Urbano de Cuiabá – 1938 a 2007.** 74p. IPDU - Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano. Cuiabá: 2007.

DACANAL, C. LABAKI, L. C., DA SILVA, T. M. L. Vamos passear na floresta! O conforto térmico em fragmentos florestais urbanos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 115-132, abr./jun. 2010.

DANTAS, I. C.; SOUZA, C. C. C. S. Arborização urbana na cidade de Campina Grande - PB: Inventário e suas espécies. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. Vol. 4. N. 2. 2o Semestre 2004.

DE DEAR, R.; BRAGER, G. S. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549-561, jul. 2002.

DUARTE, D. H. S. **O Clima como parâmetro de projeto para a região de Cuiabá.** 1995. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP.

DUARTE, D. H. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima Tropical Continental.** 2000. 296f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP.

DECAGON. **Accupar – PAR/LAI Ceptometer.** Operator's Manual. Version 6. 2008.

DURANTE, L. C. **Conforto ambiental de escolas estaduais de Cuiabá / Mato Grosso.** 2000. Dissertação (Mestrado em Educação). Instituto de Educação, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT.

ENERGY PLUS. **Getting started with Energy Plus.** Ernest Orlando Lawrence Berkeley national Laboratory. University of Illinois. 2009

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de Conforto Térmico.** 2. ed. São Paulo:

Nobel, 1995.

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, 1992.

GOOGLE. **Google Earth**. Disponível em: <http://earth.google.com>. Acesso em: janeiro de 2009.

GOULART, S. V. G. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Núcleo em Pesquisa em Construção/UFSC. Florianópolis/SC. 1997.

GRINGS, E. T. O. **Comparação entre os resultados computacionais e experimentais do comportamento térmico de um ambiente**. 2003. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

GUARIM, G. N. **Diagnóstico Florístico e Faunístico da cidade de Cuiabá**, Relatório de Pesquisa, Convênio Universidade Federal de Mato Grosso/Prefeitura Municipal de Cuiabá, 1990.

GUPTA, A.; HALL, M. R.; HOPFE, C. J.; REZGUI, Y. Building integrated vegetation as an energy conservation measure applied to non-domestic building typology in the UK. Proceedings of Building Simulation 2011:**12th Conference of International Building Performance Simulation Association**, Sydney, 14-16 November.

GUYON, G.; MOINARD, S.; RAMDAMI, N. Empirical validation of Building Energy Tools by using test carried out in small cells. **6<sup>a</sup> international IBPSA Conference**.

HENNINGER, R.; WITE, M. J.; CRAWLEY, D. B. **Experience testing Energy Plus with The IEA HVAC BESTEST E100-E200 series**. In: Eighth International IBPSA Conference. Building Simulation 2003. Eindhoven, Netherlands. August 11-14, 2003.

HOYANO, A. Thermal effects of plants on buildings. **Energy and Buildings**. V. 11, p. 181-199. 22 March 1998.

JANUÁRIO, M.; VISWANADUAN, Y.; SENNA, R. C. Radiação solar total dentro e fora da floresta tropical úmida de terra firma (Tucuruí, Pará). In: **Acta Amazônica**, V. 22 (3): 335-340. 1992.

KOENIGSBERGER, O. H. **Manual of tropical housing and building**. New York: Longman. 1974.

KUSUDA, T.; PIERCE, E. T.; BEAN, J. W. **Comparison of calculated hourly cooling load and attic temperature with measured data for Houston test house**.

ASRAE Transaction, v. 87. Part. 1.

KUSUDA, T.; PIERCE, E. T.; BEAN, J. W. **Comparison of calculated hourly load and indoor temperature with data for high mass building tested in an environmental chamber.** ASRAE Transaction, v. 87. Part. 1.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730: Moderate Thermal Enviroments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.** 1984.

LACCHINI, A. S. **Desempenho termoeenergético de edificações industriais.** Mestrado em Arquitetura. 2010. 206f. Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

LAMBERT, R. L.; GHISI, E.; ABREU, A. L. P.; CARLO, J. C.; BATISTA, J. O.; NARANJO, A. **Desempenho térmico de edificações..** Disponível em: [www.labee.ufsc.br](http://www.labee.ufsc.br). Acesso em março de 2011.

LARSEN, S. F.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. La incidencia de los usuarios en el comportamiento ermico de verano de una vivienda en el noroeste argentino. In: **IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES\_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES)**, Cusco, 2010.

LAVERNE, R. J.; LEWIS, G. McD. **The effect of vegetation on residential energy use in Ann Arbor, Michigan.** In: Journal of Arboriculture 22(5): September 1996.

LEÃO, E. B. **Carta Bioclimática de Cuiabá.** 2007. 147 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá- MT.

LI, J.; WANG, X-R.; WANG, X-J.; MA, W.; ZHANG, H. Remote sensing evaluation of urban heat island and its spatial pattern of the Shanghai Metropolitan Area, China. **Ecological Complexity.** v. 6, ed. 4, p. 413-420, 2009.

LIGGETT, R.; MILNE, M. California Energy Comission PIER Program. **Climate Consultant.** Disponível em: [www.energy-design-tools.aud.ucla.edu](http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu). Versão 5.0, 2010.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; CERQUEIRA, L. S. C. **Árvores exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas.** Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2003.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; CERQUEIRA, L. S. C.; FERREIRA, E. **Palmeiras brasileiras e exóticas cultivadas.** Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2004.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil,** 4 ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2002.

MAITELLI, G. T. **Uma abordagem tridimensional do Clima Urbano em Área Tropical Continental: O Exemplo de Cuiabá/MT**. 1994. Tese (Doutorado em Climatologia). Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo-SP.

MASCARÓ, J. J.; WENTZ, C. F.; ROCHA, V. T. Avaliação do desempenho ambiental de ruas arborizadas e ruas sem arborização em Porto Alegre, RS, Brasil. In: 11ª Conferência Internacional da Latin American Real State Society. São Paulo/SP. 2011.

MELO, A. P., LAMBERTS, R. O método do balanço térmico através de simulação computacional no programa EnergyPlus. Florianópolis, 2008. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br>. Acesso em: 20 Mar. 2010.

MORENO, G.; HIGA, T. C. S., (orgs.); colaboradora MAITELLI, G. T. **Geografia de Mato Grosso: território, sociedade, ambiente**. Cuiabá: Entrelinha, 2005.

NAVARINI, F. C.; KLOSOWSKI, E. S.; TORRES, A. C.; ROCKENBACH, E. K.; EYNG, C.; LIMA M. Avaliação de diferentes diâmetros e materiais para confecção de globos negros para estimativa de índice de conforto térmico em condições de pasto. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ZOOTECNISTAS, 2007, Brasília. **Anais...** Brasília: ABZ, 2007. Disponível em: <<http://www.abz.org.br/publicacoes-tecnicas/anaiz-zootec/artigos-cientificos/bioclimatologia-ambiencia>>. Acesso em: 20 Mar. 2010.

NSRDB. NATIONAL SOLAR RADIATION DATABASE. Disponível em: [http://rredc.nrel.gov/solar/old\\_data/nsrdb/1961-1990/tmy2/](http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1961-1990/tmy2/). Acesso em: janeiro/2011.

OLGAY, V. **Design with climate**. Princeton University Press, New Jersey, 1963.

OLIVEIRA, A. S. **Influência da vegetação arbórea no microclima e uso de praças públicas**. 2011. 162f. Tese (Doutorado em Física Ambiental). Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT.

OLIVEIRA, L. A., COSTA, A. C. L. da. Estudo da influência da vegetação relacionado com o conforto térmico dentro do Campus Básico e Profissional da Universidade Federal do Pará. **Revista Científica da UFPA**. Belém, 6 ed., jan 2006.

OLIVEIRA, R. P. **Utilização de um aplicativo computacional na avaliação de desempenho térmico de protótipo de Habitação de Interesse Social (HIS)**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Centro de Tecnologia, Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.

OMAR, L. G.; MIRANDA, S. A.; CARVALHO, B. C.; APOLONIO, R. Proposta alternativa de globo negro para obtenção de temperatura radiante em ambientes internos, 2010, Canela. In: ENTAC – 2010, XIII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2010, Canela, Out. 2010. **Anais...**

2010, Canela.

OMETO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1981.

PAPADAKIS, G., TSAMIS, P., KYRITSTIS, S. An experimental investigation of the effects of shading with plants for solar control of buildings. **Energy and Buildings** 33 (2001) 833-836.

PIETROBON, C. E. **Luz e calor no ambiente construído escolar e sombreamento arbóreo: conflito ou compromisso com a conservação de energia?** 1999. 554f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

PINHO, J. G. de. **A Evolução da Intensidade da Ilha de Calor em Cuiabá – MT: 1990 a 2002**. 2003. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Geografia). Departamento de Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT.

PINTO-JUNIOR, O. B.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A. C.; NOGUEIRA, J. S. Efluxo de CO<sub>2</sub> do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. In: **Acta Amaz.** Vol. 39 n.4, Manaus, 2009.

PIVETA, J. **Influência de elementos paisagísticos no desempenho térmico de edificação térrea**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento Universidade Estadual de Londrina. 2010.

RAMOS, G.; GHISI, E. **Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 157-169, abr./jun. 2010.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera**. Barueri: Manole, 2004.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima. Acondicionamento térmico natural**. 2. ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1986. 240 p.

SANCHES, J. C. M. **O estudo de microclimas como ferramenta para o planejamento urbano**. 2005. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Ciências humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT.

SANTOS, E.; RAMALHO, R. S. O gênero *Ficus* (*Moraceae*) L. em Viçosa-MG. **Revista CERES**, 44 (256): 646-665. Vol. XLIV. 1997.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

SOUZA, C. F.; TINÔCO, I. F. F.; BAÊTA, F. C.; FERREIRA, W. P. M.; SILVA, R. S. Avaliação de materiais alternativos para confecção do termômetro de globo.

**Ciênc. Agrotec.**, Lavras, n. 1, v. 26, p.157-164, jan./fev., 2002.

SPANGENBERG, J.; SHINZATO, P.; E. JOHANSSON, E.; DUARTE, D. Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo. **Rev. SBAU**, Piracicaba, v.3, n.2, jun. 2008, p. 1-19

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and antropogenic heat. **Energy and Buildings** 25, p. 99-103, 1997.

VERSAGE, R. S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS**. 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

YANG, Z. L.; DAI, Y.; DICKINSON, R. E.; SHUTTLEWORK, W. J. Sensitivity of ground heat flux to vegetation cover fraction and leaf area index. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D16, p. 19,505-19,514, August 27, 1999.

YIK, F. W. H.; UNDERWOOD C. P.; CHOW, W. K. Simultaneous modeling of heat and moisture transfer and air-conditioning system in buildings. Conference Building Simulation 95. Madison. Wisconsin. USA. August 14-16, p. 14-21.

YOSHIMI, I.; ALTAN, H. THERMAL SIMULATIONS on the effects of vegetated walls on indoor buildings environments. In: **Proceedings of Building Simulation**, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16, November.

WEILLER, G. C. B. **A influência de variáveis de entorno no desempenho térmico de habitações de interesse social**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Londrina-PR.

WITTE, M. J.; HENNINGER, R. H.; GLAZE J. **Testing and validation of a new building energy simulation program**. In: Seventh International IBPSA Conference. Rio de Janeiro, Brazil. August 13-15, 2001.

WESTPHAL, F. S. **Análise de Incertezas e de Sensibilidade Aplicadas à Simulação de Desempenho Energético de Edificações Comerciais**. 2007. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

## ANEXOS

### ANEXO 1: CARACTERIZAÇÃO DAS ESPÉCIES

As espécies vegetais de sombreamento das edificações foram Ficus, Mangueira e Oiti, sendo descritas, a seguir, suas características gerais.

#### a) Ficus (*Ficus benjamina* Linn / *Moraceae*)

Árvore originária da Índia e Malásia, foi introduzida no Brasil por volta de 1970 (SANTOS e RAMALHO, 1997). Possui porte alto (DANTAS e SOUZA, 2004). Nas Figuras 100-a e 100-b mostra-se um indivíduo ainda não adulto e suas folhas. As folhas são pequenas, brilhantes e próximas umas das outras.



a)



b)

**Figura 100** - Ficus (a); folhas e floração (b)

**Fonte:** ARVORESBRASIL (2010)

b) Mangueira (*Mangifera indica*)

Árvore exótica de origem da Índia e Sudeste Asiático (DANTAS e SOUZA, 2004), porém muito adaptada no Brasil, é muito comum por toda parte do país. Seus frutos são muito apreciados e sua floração ocorre entre Julho e Julho (ARVORESBRASIL, 2010). Nas Figuras 101-a e 101-b mostra-se um indivíduo adulto, suas folhas e floração. As folhas são grandes, bem como o porte do indivíduo adulto.



a)



b)

**Figura 101** - Mangueira (a); folhas e floração (b)

Fonte: ARVORESBRASIL (2010)

c) Oiti (*Licania tomentosa* / Chrysobalanaceae)

Árvore nativa, ocorre mais no nordeste, porém muitíssimo disseminada em paisagismo urbano. Floresce principalmente entre Agosto e Setembro. As folhas são de tamanho médio e o indivíduo adulto possui grande porte (Figuras 102-a e 102-b).



a)



b)

**Figura 102** - Oiti (a); folhas e floração (b)

Fonte: ARVORESBRASIL (2010)

## **ANEXO 2: TESTES PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA**

Para fins de contextualização da construção da instrumentação, registra-se que foram feitas medições preliminares, cujos resultados subsidiaram o planejamento e a tomada de decisões da instrumentação final. Foram elas: nos dias 22 (início às 8h25min) e 23/05/2010 (término às 16h15min), na Escola 3, interna e externamente às salas de aula, e nos dias 29/05/2010 (início às 11h30min) a 31/05/2010 (término às 7h20min), na Escola 1, interna e externamente às salas de aula, ambas sem ocupação durante as medições.

Nessas duas etapas preliminares, foi definida a técnica para medição da temperatura superficial das paredes externas, comparando-se os resultados de três formas de fixação do sensor:

- a) sensor inserido em furo de igual tamanho do sensor, vedação com pasta térmica, sem proteção da radiação;
- b) sensor inserido em furo de igual tamanho do sensor, vedação com pasta térmica com proteção da radiação de meia cana de tubo de 100mm de diâmetro;
- c) sensor posicionado paralelamente à parede, fixação com fita adesiva na junção do sensor com o cabo, proteção da radiação de meia cana de tubo de 100mm de diâmetro;

Na opção “a”, ocorreu sobreaquecimento do sensor quando havia incidência de radiação solar direta e a temperatura excedia o limite superior da faixa de medição do sensor. Na opção “c”, o sensor perdia o contato com a parede à medida que o sistema se aquecia, falseando os resultados e entrada de radiação solar direta pelas laterais da proteção recorria aos resultados excedentes ao limite superior da faixa de

medição do sensor. Além disso, a parede externa das escolas com acabamento chapiscado não permitiria contato perfeito entre o sensor e a superfície da parede.

Desta forma, os melhores resultados foram obtidos com o sensor inserido em furo de igual tamanho do sensor, vedação com pasta térmica, proteção da radiação de meia cana de tubo de 100mm de diâmetro e comprimento de 50cm. Esta opção permite a proteção do sol e a ventilação pelas laterais da proteção, o que corrobora com Barbosa et al. (2007).

Estas etapas também permitiram a tomada de decisões frente a coleta de dados de radiação solar global, os quais pretendia-se inicialmente coletar por meio de estações meteorológicas móveis e que por questões de segurança dos equipamentos, optou-se por utilizar dados secundários da pesquisa de doutorado de Callejas (2011).

A condição de uso das salas durante a medição também foi definida nessas etapas preliminares. Após várias tentativas de medição com as salas ocupadas, não foi obtido êxito nas mesmas, por não ser possível garantir a segurança dos equipamentos e uma condição única para todo o período de medição. Além disso, a disposição dos equipamentos de medição restringiriam o uso e ocupação da sala. Desta forma, optou-se por trabalhar com as salas desocupadas, janelas e portas fechadas e luzes apagadas.

Abreu (2004) cita que a importância de se realizar as medições em ambientes ocupados é que se consegue identificar os ajustes que o usuário faz para melhorar sua sensação de conforto. Estes ajustes em ambientes não climatizados podem ser: abrir ou fechar janelas para aumentar ou diminuir a velocidade do ar dentro do ambiente, ou aumentar o número de trocas de renovação do ar interno e abrir ou fechar cortinas e venezianas. Pode ser considerada também, a possibilidade de eventuais trocas do vestuário, o que no caso das escolas, é descartado, visto que a vestimenta é padronizada no uniforme, idêntico para as três escolas.

No caso deste estudo, as Escolas 1 e 2 dispõem de condicionamento de ar individual do tipo janela e *split*, respectivamente. Devido ao subdimensionamento do equipamento, muitas vezes as salas são ocupadas com as janelas e portas abertas e com ventiladores e condicionador de ar ligados. Na Escola 3, que não possui

condicionamento de ar ainda instalado, as salas são operadas com portas e janelas totalmente abertas e ventiladores ligados.

Acerca da medição da temperatura de globo, foi estabelecida a correlação entre as medições com a esfera padrão de cobre de diâmetro de seis polegadas e a esfera de polietileno de três polegadas que permitiu o uso deste como alternativa a aquela, tendo sido obtida correlação forte e positiva nos testes ( $R^2=0,9627$ ), corroborando com SOUZA et al (2000), NAVARINI et al (2007) e OMAR et al (2010).

Outro aspecto fundamental nestas medições é que a iluminação artificial pouco contribui para a distribuição das temperaturas ao longo da largura das salas, uma vez que as lâmpadas são fluorescentes, em número de oito por sala. Tendo em vista a necessidade de uniformizar as medições em termos de sistemas de iluminação, decidiu-se operar com as luzes permanentemente apagadas e, conseqüentemente, sem ocupação, uma vez que as salas da Escola 2 só são habitáveis utilizando-se a iluminação artificial e as das Escolas 1 e 3 não disponibilizam iluminação natural suficiente durante todo o período diurno para o ambiente de salas de aula.

### ANEXO 3: CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS QUANTO ÀS CARACTERÍSTICAS TERMOFÍSICAS

Lacchini (2010) classificou os materiais de acordo com suas características termofísicas de condutividade, densidade, calor específico, espessura e absorvência, conforme abaixo:

| Característica Termofísica            | Intervalo                        | Classificação       |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| Condutividade $\kappa^*$              | 0,0 a 0,20 W/m.K                 | Pouco condutivo     |
|                                       | 0,21 a 1,0 W/m.K                 | Condutivo           |
|                                       | >1,0 W/m.K                       | Muito condutivo     |
| Densidade $\rho$                      | 0,0 a 100,0 kg/m <sup>3</sup>    | Pouco denso         |
|                                       | 100,1 a 1000,0 kg/m <sup>3</sup> | Denso               |
|                                       | >1000,0 kg/m <sup>3</sup>        | Muito denso         |
| Calor Específico $c$                  | 0,0 a 500,0 J/kg.K               | Fácil aquecimento   |
|                                       | 500,1 a 1000,0 J/kg.K            | Médio aquecimento   |
|                                       | >1000,0 J/kg.K                   | Difícil aquecimento |
| Espessura para planos verticais       | 0,0 a 15,0 cm                    | Pouco espesso       |
|                                       | 15,1 a 25,0 cm                   | Espesso             |
|                                       | > 25,0 cm                        | Muito espesso       |
| Espessura para isolamento e cobertura | 0,0 a 1,0 cm                     | Pouco espesso       |
|                                       | 1,1 a 5,0 cm                     | Espesso             |
|                                       | > 5,0 cm                         | Muito espesso       |
| Absorvência**                         | 0,0 a 0,2                        | Pouco absorvivo     |
|                                       | 0,21 a 0,5                       | Absorvivo           |
|                                       | > 0,5                            | Muito absorvivo     |