UNIVERDIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO – FAU
DOUTORADO – ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIDADES

IURI ÁVILA L. DE ARAÚJO

Eficácia de diretrizes construtivas para HIS unifamiliar no Brasil com base no conceito de conforto adaptativo

Maceió AL

IURI ÁVILA L. DE ARAÚJO

Eficácia de diretrizes construtivas para HIS unifamiliar no Brasil com base no conceito de conforto adaptativo

Tese apresentada à Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Leonardo S. Bittencourt, PhD.

Maceió AL

2021

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

A663e Araújo, Iuri Ávila L. de.
Eficácia de diretrizes construtivas para HIS unifamiliar no Brasil com base no conceito de conforto adaptativo / Iuri Ávila L. de Araújo. – 2021.
225 f. : il. color.

Orientador: Leonardo S. Bittencourt.
Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 139-148.
Apêndices: f. 149-225.

1. Conforto adaptativo. 2. Ventilação natural. 3. Habitação popular. 4. Desempenho de materiais de construção. 5. Diretrizes construtivas. I. Título.

CDU: 728.222

IURI ÁVILA L. DE ARAÚJO

Eficácia de diretrizes construtivas para HIS unifamiliar no Brasil com base no conceito de conforto adaptativo

Tese apresentada à Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo para a obtenção do título de Doutor. Aprovada em 30/09/2021.

Dr. LEONARDO SALAZAR BITTENCOURT, UFAL
(Orientador)

Banca Examinadora

Drª. JULIANA OLIVEIRA BATISTA, UFAL
(Examinadora interna)

Prof. Fernando A. de M. Sá Cavalcanti
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Universidade Federal de Alagoas
SIAPE Nº 2198876

Dr. FERNANDO ANTONIO DE MELO SÁ CAVALCANTI, UFAL
(Examinador interno)

Dr. VICTOR FIGUEIREDO RORIZ, USP
(Examinador externo)

Drª. CLAUDIA MARIZ DE LYRA BARROSO KRAUSE, UFRJ
(Examinadora externa)

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, que me ensinou a ver beleza no conhecimento.

À minha mãe, que me ensinou a acreditar no valor dos estudos.

À minha esposa por estar ao meu lado ao longo dessa jornada, oferecendo apoio e compreensão.

À minha filha por encher os meus dias de amor e carinho.

Ao meu orientador pela oportunidade e por todo incentivo, apoio e dedicação.

Aos professores que contribuíram, valorizaram e incentivaram este trabalho.

Aos colegas pesquisadores pela solicitude em oferecer suporte e compartilhar conhecimento e experiência.

Aos colegas de doutorado pelo companheirismo em compartilhar generosamente angústias, sugestões, críticas e perseverança.

Aos colegas do Curso de Arquitetura e Urbanismo da UFAL - Campus Arapiraca pelo apoio e incentivo ao meu doutoramento.

RESUMO

O uso de condicionamento térmico é visto pela população como melhoria da qualidade de vida, por causa do frequente desconforto térmico nos edifícios. Esse desconforto é especialmente frequente em Habitação de Interesse Social (HIS), pela tendência à padronização e à priorização do baixo custo de produção das unidades, nos empreendimentos. O consumo energético em moradias tem aumentado e a posse de equipamentos para conforto térmico está se tornando mais frequente. A expansão acentuada do consumo de energia tende a esgotar recursos naturais e a gerar outros impactos ambientais. Diferentes instituições brasileiras têm promovido o consumo eficiente de energia, para conter o crescimento da demanda. A criação de normas e regulamentos para orientar a produção dos edifícios está entre as ações mais importantes dos últimos 20 anos. O clima é fator relevante para o conforto térmico nos edifícios e estratégias bioclimáticas são diretrizes de projeto que promovem a adaptação do edifício ao clima, a fim de maximizar o conforto por meios passivos. Diretrizes construtivas conduzem à aplicação eficaz de estratégias bioclimáticas no projeto e podem ser determinantes para o desempenho térmico. A principal referência no Brasil sobre adaptação do edifício ao clima permanece sendo o zoneamento bioclimático da norma NBR 15220-3, que vem fornecendo parâmetro de avaliação e diretrizes construtivas. A eficácia dessas diretrizes foi estabelecida pela comparação de estimativas de conforto, por método prescritivo. A revisão dessa norma é ainda uma agenda de pesquisa, apesar das propostas recentes sobre revisão da classificação climática e do método de avaliação do edifício. As normas brasileiras ainda não dispõem de método para avaliar conforto térmico em ambientes ventilados naturalmente. Os requisitos de área e operação de abertura para ventilação não consideram a contribuição efetiva dos ventos locais. Não há requisitos de vazão mínima, para avaliar a qualidade do ar em espaços domésticos naturalmente ventilados. Parâmetros adaptativos têm menor incerteza na previsão do conforto com ventilação natural, por estimarem o efeito da aclimatação térmica dos usuários às condições locais e sazonais. Esses parâmetros também são mais adequados à avaliação da tipologia HIS, já que esta é mais dependente de meios passivos para conforto. As normas brasileiras ainda não oferecem métodos adaptativos e o parâmetro de conforto é determinante na comparação de alternativas. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficácia de diretrizes construtivas nas normas NBR 15220-3, NBR 15575 e RTQ-R, para HIS unifamiliar, pela abordagem do conforto adaptativo, incluindo parâmetros de velocidade e qualidade do ar. O método do presente trabalho consiste em uma análise comparativa do desempenho de modelos, em relação ao conforto do usuário. Uma amostra de modelos representou a tipologia e as diretrizes abordadas. Simulações com as ferramentas computacionais *EnergyPlus* e *Ansys CFX* geraram dados de temperatura, umidade e ventilação nos modelos, a partir de uma amostra de arquivos climáticos da base INMET 2018, representando grupos climáticos propostos por Roriz. A análise dos dados comparou percentual do ano em conforto, graus-hora-ano de desconforto, autonomia da ventilação natural na manutenção da qualidade do ar e contribuição efetiva da ventilação natural para o percentual do ano em conforto. Os resultados levantaram questões sobre a eficácia das diretrizes em normas brasileiras e deram base para afirmar a importância do uso de ventilação higiênica permanente e do uso de ventiladores, para explorar completamente o potencial de incremento do conforto, por velocidade do ar.

Palavras-chave: Conforto adaptativo, Ventilação natural, Desempenho térmico passivo, Habitação de interesse social, Diretrizes construtivas.

ABSTRACT

The use of air conditioning is seen by people as a better quality of life, because of the frequent thermal discomfort in buildings. That is frequent in social housing, due to the standardization and low cost of units, in the enterprises. Energy consumption in homes has increased and the possession of thermal comfort equipment is becoming more frequent. The expansion of this consumption tends to deplete the natural resources and generate other environmental impacts. Brazilian institutions have been promoting energy efficiency to contain the growth in demand. Standards and regulations for building are among the most important actions of the last 20 years. The climate is a relevant factor for thermal comfort in buildings and bioclimatic strategies are design guidelines that promote the adaptation of the building to the climate, in order to maximize comfort by passive means. Constructive guidelines lead to the effective application of bioclimatic strategies in design and can improve thermal performance. The main reference in Brazil to adapt the building to climate remains the bioclimatic zoning of the NBR 15220-3 standard, which have been providing assessment parameter and construction guidelines. The effectiveness of the guidelines was established by comparing comfort estimates by prescriptive method. Their review is still a research agenda, despite recent proposals for reviewing the climatic classification and the building assessment method. Brazilian standards do not yet offer a method to assess thermal comfort in naturally ventilated environments. Requirements to area and operation of opening to ventilation do not consider the effective contribution of local winds. There are no minimum flow requirements to assess air quality in domestic naturally ventilated spaces. Adaptive parameters have less uncertainty in predicting comfort by natural ventilation, as they estimate the effect of users' thermal acclimatization to local and seasonal conditions. These parameters are also more suitable for evaluating HIS typologies, because those are more dependent on passive means for comfort. Brazilian standards do not yet provide adaptive methods and comfort parameters are crucial for comparison of the alternatives. The aim of this study was to evaluate the effectiveness of constructive guidelines in the standards NBR 15220-3, NBR 15575 and RTQ-R, for single-family social housing, through the adaptive comfort approach, including speed and air quality parameters. The method of the present work consists of a comparative analysis of the performance of models, focus to user comfort. A sample of models represented the typology and guidelines addressed. Simulations with the computational tools EnergyPlus and Ansys CFX generated temperature, humidity and ventilation data in the models, based on a sample of climate files from the INMET 2018 database, representing climate groups proposed by Roriz. Data analysis compared percentage of the year in comfort, degree-hour-year of discomfort, autonomy of natural ventilation in maintaining indoor air quality and effective contribution of natural ventilation to the percentage of year in comfort. The results raised questions about the effectiveness of guidelines in Brazilian standards and allowed to claim the importance of using permanent hygienic ventilation and the use of fans, to explore the all potential of air velocity to raise comfort.

Key Words: Adaptive thermal comfort, Natural ventilation, Passive thermal performance, Social housing, Design guidelines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Exemplo de estudo em câmara climatizada, mostrando experimento com ocupantes (A), e exemplo de estudo de campo, mostrando estação microclimática (B). 27

Figura 2-2 Comparação entre a resposta de indivíduos sobre sua sensação térmica e a resposta prevista pelo método PMV, em ambiente ventilado naturalmente. 27

Figura 2-3 – *Z*ona de conforto de verão e inverno para países quentes e em desenvolvimento. 28

Figura 2-4 Zona de conforto de Givoni (1992) e zonas alternativas propostas por pesquisadores brasileiros. 29

Figura 2-5 Carta de Conforto Adaptativo da *ANSI/ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2017).30

Figura 2-6 Taxa de calor produzida pelo metabolismo em diferentes atividades (escala met), à esquerda, e nível de isolamento térmico de diferentes tipos de vestimenta (escala clo), à direita. 31

Figura 2-7 Proposta de expansão do limite inferior da zona de conforto por adaptação da vestimenta (clo). 33

Figura 2-8 Carta de Conforto Adaptativo Residencial. 33

Figura 2-9 Dados de estudos de campo sobre aceitabilidade térmica em ambientes naturalmente ventilados em diferentes regiões do Brasil. 34

Figura 2-10 Classificação climática global pelo método Köppen-Geiger. 39

Figura 2-11 Classificação climática do Brasil pelo método Köopen-Geiger. 40

Figura 2-12 Mapa do Brasil representando dados de altitude. 41

Figura 2-13 Mapa do Brasil representando dados de pluviosidade. 42

Figura 2-14 Mapa do Brasil representando dados de temperatura. 43

Figura 2-15 Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento no Brasil. 44

Figura 2-16 Regimes diários de velocidade do vento em diferentes pontos do Brasil, velocidade média horária em razão da velocidade média anual. 45

Figura 2-17 Dados de frequência por direção do vento em pontos da região Norte (A) e Nordeste (B) do Brasil. 46

Figura 2-18 Direções predominantes em diferentes pontos do Brasil e para duas estações: norte da Nordeste (B e D) e sul do estado do Acre (A e B). 47

Figura 2-19 Dados de temperatura, umidade e frequência anual de conforto no clima de cidades brasileiras e estrangeiras. 48

Figura 2-20 Mapa do Zoneamento Bioclimático Brasileiro e estratégias bioclimáticas prescritas. 49

Figura 2-21 Zonas Bioclimáticas da BBCC de Givoni e da NBR 15 220-3. 51

Figura 2-22 Primeira proposta de classificação climática do Brasil. Mapa das Zonas de 1 a 8, Mapa das zonas de 9 a 16, Mapa das zonas de 17 a 20. 53

Figura 2-23 Segunda proposta de classificação climática do Brasil, a partir de dados de desconforto térmico. 54

Figura 2-24 Terceira proposta de classificação climática do Brasil. Mapeamento dos grupos climáticos de G1 a G8 (acima), de G9 a G16 (ao centro) e de G17 a G24 (abaixo). 55

Figura 3-1 Projeto padrão de Habitação de Interesse Social da CEF. 69

Figura 3-2 Modelos usados nas simulações: aberturas grandes, médias e pequenas. 79

Figura 3-3 Modelo-base da análise paramétrica. 82

Figura 3-4 Dimensões do domínio fluido da simulação computacional, à esquerda. Malha do domínio fluido, à direita e acima. Configuração dos limites do domínio fluido, à direita e abaixo. 83

Figura 3-5 À esquerda, direções do vento simuladas, incidências: -45°, 0°, 45°, 90°. À direita, Malhas de pontos, dimensões 4 m x 4 m (16 pontos), sendo uma em cada ambiente. 83

Figura 3-6 Modelos usados nas simulações de velocidade do ar: modelo com abertura pequena, à esquerda, modelo com abertura média, ao centro, modelo com abertura grande, à direita. 84

Figura 3-7 Dimensões da malha de pontos usada nas simulações de velocidade do ar, em todos os modelos simulados. 85

Figura 3-8 Direções usadas nas simulações do vento.....86

Figura 3-9 Formato e dimensões do domínio fluido, à esquerda. Malha no domínio à direita e acima. Limites do domínio, à direita e abaixo.....86

Figura 3-10 Diagrama do fluxo de informação entre os procedimentos que geraram os dados usados nas análises. 88

Figura 4-1 Dados de desempenho no município de São Joaquim-SC (ZB1 e G1a), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. .91

Figura 4-2 Dados de desempenho no município de Curitiba-PR (ZB1 e G2), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. .92

Figura 4-3 Dados de desempenho no município de Canela-RS (ZB1 e G6), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. .93

Figura 4-4 Dados de desempenho no município de Novo Horizonte-SC (ZB2 e G5), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB2. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. 94

Figura 4-5 Dados de desempenho no município de Santa Maria-RS (ZB2 e G8), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB2. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. .95

Figura 4-6 Dados de desempenho no município de Florianópolis-SC (ZB3 e G1b), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. .99

Figura 4-7 Dados de desempenho no município de São José dos Campos-SP (ZB3 e G3), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. 100

Figura 4-8 Dados de desempenho no município de Caldas-MG (ZB3 e G4), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.101

Figura 4-9 Dados de desempenho no município de Chapecó-SC (ZB3 e G7), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.102

Figura 4-10 Dados de desempenho no município de Londrina-PR (ZB3 e G15), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.103

Figura 4-11 Dados de desempenho no município de Foz do Iguaçu (ZB3 e G16), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.104

Figura 4-12 Dados de desempenho no município de Bauru-SP (ZB4 e G12), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB4. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.106

Figura 4-13 Dados de desempenho no município de Governador Valadares-MG (ZB5 e G9), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB5. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. 107

Figura 4-14 Dados de desempenho no município de Santos-SP (ZB5 e G13), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB5. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.108

Figura 4-15 Dados de desempenho no município de Triunfo-PE (ZB6 e G11), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB6. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.109

Figura 4-16 Dados de desempenho no município de Espinosa-MG (ZB6 e G23), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB6. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.110

Figura 4-17 Dados de desempenho no município de Euclides da Cunha-BA (ZB7 e G14), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. 113

Figura 4-18 Dados de desempenho no município de São João do Piauí-PI (ZB7 e G19), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. 114

Figura 4-19 Dados de desempenho no município de Palmas-TO (ZB7 e G20), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.115

Figura 4-20 Dados de desempenho no município de Mossoró-RN (ZB7 e G22), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.116

Figura 4-21 Dados de desempenho no município de Campina Grande-PB (ZB8 e G10), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. 118

Figura 4-22 Dados de desempenho no município de Belém-PA (ZB8 e G17), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.119

Figura 4-23 Dados de desempenho no município de Natal-RN (ZB8 e G18), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.120

Figura 4-24 Dados de desempenho no município de Maceió-AL (ZB8 e G21), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.121

Figura 4-25 Dados de desempenho no município de Pão de Açúcar (ZB8 e G24), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos. 122

Figura 4-26 Síntese da classificação do desempenho dos modelos nos 25 municípios da amostra, à direita. Síntese da configuração dos modelos, à direita. 126

Figura 4-27 Coeficientes de ventilação médios calculados a partir das velocidades simuladas. 133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Correção do limite superior da zona de conforto adaptativo em função da velocidade do ar. 31

Tabela 2-2 Vazões mínimas (L/s) para manter a qualidade do ar em moradias, em função da área útil e do número de dormitórios. 37

Tabela 2-3 Requisitos para envoltória e prescrições para operação de aberturas na NBR 15220-3. 59

Tabela 2-4 Requisitos para envoltória e prescrições para operação de aberturas no RTQ-R. . 62

Tabela 2-5 Requisitos de área de abertura na envoltória NBR 15575-4. 63

Tabela 5-6 Novos requisitos de área e operação de aberturas, a partir do projeto de revisão da NBR 15575-4. 64

Tabela 3-1 – Amostra de climas usada no estudo. 68

Tabela 3-2 Propriedades e constituição dos sistemas de envoltória adotados. 71

Tabela 3-3 Opções de parede, cobertura e abertura, nos modelos da primeira etapa de definição. 72

Tabela 3-4 Sistema de janela com camada de fechamento interna e externa e opções de operação. 73

Tabela 3-5 Opções de envoltória, formadas pela combinação de dois tipos de parede e dois de cobertura. 74

Tabela 3-6 Sistema de janela composto, com camada de fechamento interna e externa. 76

Tabela 3-7 Coeficientes para cálculo de gradiente de vento. 87

Tabela 4-1 Classificação do desempenho dos modelos em cada município da amostra. 125

Tabela 4-2 Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a 0°. 130

Tabela 4-3 Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a 45°. 131

Tabela 4-4 Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a 90°. 131

Tabela 4-5 Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a -45°. 132

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.U. – Área útil do ambiente

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditionig Engeneers / Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado.

BBCC – Building Bioclimatic Confort Chart / Carta de Conforto Bioclimático da Edificação.

CEF – Caixa Econômica Federal.

HIS – Habitação de interesse social.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.

NBR – Norma Brasileira

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.

TBS – Temperatura de bulbo seco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20

1.1 Objetivo 23

1.1.1 Objetivos específicos: 23

1.2 Estrutura da Tese 23

2 REVISÃO DE LITERATURA 25

2.1 Avaliação do Conforto Térmico 25

2.1.1 Abordagem adaptativa do conforto térmico 26

2.1.2 Carta Bioclimática de Givoni 28

2.1.3 Carta de Conforto Adaptativo 30

2.1.4 Influência da velocidade e umidade do ar no conforto térmico 34

2.1.5 Critérios de qualidade do ar interno 36

2.1.6 Avaliação de conforto no Brasil 37

2.2 Climas brasileiros 38

2.2.1 Zoneamento climático brasileiro para conforto térmico 47

2.2.2 Propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro 52

2.3 Diretrizes construtivas para conforto em HIS no Brasil 56

2.3.1 Diretrizes construtivas da norma NBR 15220-3 58

2.3.2 Diretrizes para ventilação natural na norma NBR 15220-3 59

2.3.3 Diretrizes construtivas no RTQ-R 61

2.3.4 Diretrizes construtivas da norma NBR 15575 62

2.3.5 Desempenho e conforto térmico em HIS no Brasil 64

3 MÉTODO 67

3.1 Amostra de climas 67

3.2 Definição de modelos 68
3.2.1 Amostra de modelos 69
3.3 Produção e análise de dados 78
3.3.1 Simulação de temperatura, umidade e taxa de renovação 78
3.3.2 Avaliação de conforto 79
3.3.3 Avaliação da ventilação higiênica 80
3.3.4 Avaliação da ventilação de resfriamento 80
3.3.5 Teste de incerteza na estimativa de velocidade do ar 81
3.3.6 Simulação da velocidade do ar 84
3.3.7 Análise dos dados gerados nas simulações 88
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 90
4.1 Análise de conforto e qualidade do ar 90
4.1.1 Zona Bioclimática Um e Dois 90
4.1.2 Zona Bioclimática Três 98
4.1.3 Zona Bioclimática Quatro, Cinco e Seis 105
4.1.4 Zona Bioclimática Sete 111
4.1.5 Zona Bioclimática Oito 117
4.1.6 Análise de eficácia de diretrizes construtivas 123
4.1.7 Análise da ventilação higiênica 128
4.2 Análise da ventilação natural de resfriamento 129
4.2.1 Resultados do teste de incerteza na estimativa de velocidades do ar 130
4.2.2 Estimativa das velocidades do ar no ambiente interno 133
4.2.3 Contribuição efetiva da ventilação para o conforto térmico 134
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 136
6 REFERÊNCIAS 139

APÊNDICE A 149

1 INTRODUÇÃO

O clima é fator relevante para o conforto térmico nos edifícios. Estratégias bioclimáticas são diretrizes de projeto que promovem a adaptação do edifício ao clima, a fim de maximizar o conforto por meios passivos. Diretrizes construtivas conduzem à aplicação eficaz de estratégias bioclimáticas no projeto e podem ser determinantes para o desempenho térmico dos edifícios, contribuindo assim para inibir o consumo de eletricidade para fins de conforto.

A evolução das diretrizes construtivas para conforto passivo em residências no Brasil teve impulso notável com a publicação da norma NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005). A sua Parte 3, Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social, dividiu o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas e definiu diretrizes construtivas para as mesmas, a fim de orientar o projeto a um melhor desempenho térmico passivo. Essas diretrizes abrangiam a envoltória do edifício e a operação de suas aberturas, usando um critério de estação do ano para isso. A proposição dessa norma baseou-se na *Building Bioclimatic Confort Chart (BBCC)* de Givoni (1992) e no Método Mahoney (KOENIGSBERGER; MAHONEY; EVANS, 1970). Estas são ferramentas prescritivas, que estimam o comportamento do edifício a partir de dados do clima local. Elas foram adaptadas ao contexto brasileiro e usadas na análise e classificação climáticas (RORIZ; GHISI; LAMBERTS, 1999).

Posteriormente, o Regulamento Técnico para a Qualidade do Nível de Eficiência Energética das Edificações Residenciais, RTQ-R (INMETRO, 2012), especificou em seu método prescritivo requisitos para o desempenho térmico da envoltória, a fim de classificar o nível de eficiência energética dos edifícios. Esses requisitos diferiam das diretrizes da NBR 15220-3, mas faziam referência ao seu zoneamento bioclimático. No ano seguinte, a NBR 15575 Edificações Habitacionais-Desempenho (ABNT, 2013) foi publicada e voltou-se ao comportamento dos sistemas que compõem o edifício, para atender diferentes exigências de desempenho. A Parte 4, Sistema de Vedações Verticais Internas e Externas, e a Parte 5, Requisitos para Sistemas de Coberturas, contêm em seu método normativo (prescritivo) requisitos mínimos de envoltória para desempenho térmico aceitável. Esses requisitos diferiam daqueles do RTQ-R apenas no tocante a áreas mínimas de abertura para ventilação, estando igualmente referenciados no zoneamento da NBR 15220-3.

Propostas de modificação nesses instrumentos vêm surgindo em anos recentes. Roriz (2012a; 2012b; 2014) elaborou classificações climáticas alternativas, para apreciação do Grupo de Discussão da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), a fim de aperfeiçoar o zoneamento da NBR 15220-3. Essas propostas foram motivadas por sucessivas críticas de pesquisadores brasileiros (BASTOS; KRAUSE; BECK, 2007; FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2014; BOGO, 2016). O objetivo das propostas de Roriz limitou-se a estabelecer um novo agrupamento e mapeamento de climas brasileiros, deixando a revisão das diretrizes construtivas para etapa posterior (RORIZ, 2014). O Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) elaborou proposta para atualizar a classificação climática usada no RTQ-R (BAVARESCO et al; 2017), substituindo as oito zonas bioclimáticas da NBR 15220-3 pelos 24 grupos climáticos de Roriz (2014), mas sem indicar ainda novos requisitos para envoltória. A NBR 15575 apresenta algumas limitações em sua versão atual (SORGATO et al, 2012). Então, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) colocou em consulta pública um projeto de emenda à NBR15575-Desempenho (ABNT, 2021). Essa proposta modifica o método de avaliação do desempenho térmico (VEIGA et al, 2020; KRELLING et al, 2020), mas mantém os requisitos da envoltória como na versão vigente, acrescentando apenas limites para a área de superfícies transparentes.

O Brasil permanece até o presente sem norma específica para a avaliação de conforto térmico em ambientes ventilados naturalmente. Atualmente, a avaliação da contribuição da velocidade do ar para o conforto na legislação brasileira baseia-se apenas em estimativa, a partir da área de abertura. Mas o Comitê Brasileiro de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABNT/CB-055) publicou o terceiro projeto de revisão da NBR 16401-Instalações de Ar Condicionado, Sistemas Centrais e Unitários, Parte 2, Parâmetros de Conforto Térmico (ABNT, 2019). O escopo dessa norma é especificar combinações de variáveis ambientais que produzam condições térmicas aceitáveis. O projeto de revisão incorpora a essa norma brasileira o método adaptativo de avaliação de conforto, contido na seção 5.4 da norma norte-americana *ANSI/ASHRAE Standard* 55, *Thermal e Envionmental Conditions for Human Occupancy* (ANSI; ASHRAE, 2017). Também, a NBR16401, Parte 3, Qualidade do Ar (ABNT, 2008) está também em processo de revisão. A versão atual dessa norma não oferece requisitos específicos para avaliar a qualidade do ar interno em espaços domésticos e naturalmente ventilados.

A eficácia das diretrizes contidas na legislação brasileira foi estabelecida a partir da comparação de alternativas. Mas o resultado dessa comparação é afetado pelos parâmetros de eficácia adotados na avaliação. A identificação de estratégias bioclimáticas e diretrizes construtivas de maior eficácia foi estabelecida na NBR 15220-3 com base na comparação de frequências de conforto estimadas por meio de métodos prescritivos (ABNT, 2005). A avaliação de conforto pelo método adaptativo da *ANSI/ASHRAE Standard* 55 (ANSI; ASHRAE, 2017) é menos incerta, pois considera a aclimatação dos usuários do edifício e a contribuição efetiva da velocidade do ar para o conforto. Para tanto, esse método adota uma zona de conforto que varia em função de temperaturas médias externas, locais e sazonais e da velocidade média do ar no recinto. Essa flexibilidade reduz a incerteza na previsão da frequência de conforto, uma vez que estudos de campo no Brasil já vinham indicando que a zona de conforto é diferente para regiões como Natal-RN (ARAÚJO; ARAÚJO, 1997), Florianópolis-SC (XAVIER, 1998) e Belo Horizonte-MG (GONÇALVES, 2000). O projeto de criação da Base Brasileira de Dados em Conforto Térmico (ANDRÉ et al. 2019), que já reuniu 10.925 votos de sensação térmica, comprovou diferenças nos limites de aceitabilidade térmica no território brasileiro, devido à aclimatação. Os requisitos da envoltória prescritos no Brasil não consideraram essa variação em sua definição, o que pode ter induzido a erros na previsão de frequências de conforto. Também, a parcela da frequência de conforto prevista e devida à contribuição do resfriamento fisiológico por ventilação natural consiste em uma estimativa, que só se efetiva se as velocidades do ar no recinto forem suficientes. A definição dos requisitos de área e operação de abertura para ventilação não consideraram dados locais do vento e não aplicaram critérios de velocidade e vazão mínima, o que pode gerar demandas imprevistas por ventilação mecânica nos edifícios.

Ferramentas computacionais de simulação são um meio efetivo para avaliar o desempenho do edifício. O RTQ-R (INMETRO, 2012) e a NBR 15575 (ABNT, 2013) introduziram no contexto brasileiro a opção da avaliação do desempenho por simulação computacional. Mas arquitetos utilizam pouco essas ferramentas para dar suporte ao projeto (MACIEL, 2007; VENÂNCIO, 2012). Por isso, as diretrizes construtivas contidas em métodos prescritivos permanecem tendo um papel relevante como suporte ao projeto e à avaliação de edifícios, por serem fáceis e rápidas, de aprender e aplicar. Avaliar a eficácia de diretrizes construtivas estabelecidas em instrumentos normativos brasileiros com base em conforto adaptativo e em critérios de velocidade e qualidade do ar tem potencial para ratificar

essas diretrizes ou expor questões novas, que contribuam para o aperfeiçoamento dos métodos prescritivos vigentes.

1.1 Objetivo

Avaliar a eficácia de diretrizes construtivas para HIS unifamiliar estabelecidas nas normas NBR 15220-3, RTQ-R e NBR 15275, a partir de conforto adaptativo e de critérios de velocidade e qualidade do ar interno.

1.1.1 Objetivos específicos:

a) Definir procedimentos para avaliar conforto pela abordagem adaptativa.
b) Definir procedimentos para avaliar conforto com base em critérios de velocidade e qualidade do ar.

1.2 Estrutura da Tese

O texto está organizado em quatro capítulos principais, que se sucedem a partir da Introdução. Na sequência, o capítulo Revisão de Literatura enfoca o edifício como um mediador entre as condições climáticas e as condições do conforto humano, com função de maximizar o conforto a partir de suas características. Esse capítulo está dividido em três seções principais. A primeira aborda a possibilidades de avaliação do conforto térmico passivo no edifício. A segunda seção trata da diversidade climática no território brasileiro e de propostas para sua classificação, como base à normatização da adaptação do edifício ao clima. A terceira e última seção do capítulo discute as diretrizes construtivas para habitação em instrumentos normativos brasileiros, visando a uma maior eficácia de estratégias passivas de conforto. O capítulo Método detalha procedimentos para alcançar os objetivos propostos na pesquisa. Ele está dividido em três seções principais, que descrevem respectivamente a seleção de amostra de climas brasileiros, a definição de modelos, a definição de simulações de desempenho e procedimentos de análises dos dados gerados. O capítulo Resultado descreve os dados obtidos com os procedimentos definidos no capítulo anterior e discute suas implicações para as questões suscitadas pelos objetivos do trabalho. Esse capítulo está dividido em duas sessões principais. A primeira avalia as diretrizes construtivas representadas nos modelos, com base em frequências de conforto e taxas de renovação de ar. A segunda sessão avalia dados de velocidade do ar e discute a contribuição efetiva da ventilação natural para o conforto. O texto encerra no capítulo seguinte, que traz as considerações finais, revisando as principais conclusões e destacando contribuições ao campo de estudo, questões

persistentes, limitações dos procedimentos e possíveis desenvolvimentos futuros. Esse capítulo final é sucedido pelas referências e por um apêndice, que reúne dados sobre o clima dos municípios da amostra.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a base conceitual que dá suporte aos procedimentos da pesquisa, definindo conceitos e identificando questões relevantes. Ele está organizado em três seções. A primeira aborda a definição e possibilidade de avaliação do conforto térmico passivo, na perspectiva adaptativa e com destaque para sua interação com a ventilação natural e umidade do ar. A segunda parte enfoca a diversidade climática no Brasil e propostas para sua classificação, como base para o zoneamento bioclimático brasileiro. A terceira e última parte deste capítulo trata da adaptação do edifício ao clima, a partir das prescrições construtivas contidas em instrumentos normativos brasileiros.

2.1 Avaliação do Conforto Térmico

Segundo a *ANSI/ASHRAE Standard 55* (2017), conforto térmico é um estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico. O conforto térmico é determinado por fatores físicos, relacionados às trocas de calor, mas também por fatores fisiológicos e psicológicos como: reação, adaptação, percepção e expectativa (LAMBERTS et al, 2014). As definições de conforto térmico implicam na ausência de sensações desconfortáveis. O estresse térmico se manifesta por dois pares de sensações, que surgem como resposta do indivíduo ao ambiente. O primeiro é o par formado por sensação de calor ou de frio. O segundo par de sensações está relacionado à transpiração: sensação de pele muito seca ou de pele muito úmida (GIVONI, 1998). As sensações desconfortáveis podem afetar o corpo de modo total ou parcial (desconforto localizado) (LAMBERTS et al, 2014), mas o presente trabalho aborda apenas o primeiro deles.

O corpo humano produz calor continuamente, devido a seus processos metabólicos. Essa produção é de 100 W em média, variando de 70 W (adormecido) a 700 W (em atividade física intensa). Esse calor precisa ser dissipado para o meio, ou haverá sobreaquecimento do corpo, o que acarreta a sensação de calor no indivíduo. No entanto, se o corpo perde calor demasiadamente para o meio, não conseguirá manter-se aquecido, gerando assim a sensação de frio. A troca de calor com o meio é contínua e ocorre por meio da pele e da respiração. O corpo deve manter uma temperatura aproximada de 37°C e a pele deve permanecer entre 31°C e 34°C (SZOKOLAY, 2004). A umidade da pele depende da taxa de secreção e de evaporação do suor, que dependem da temperatura, umidade e velocidade do ar (GIVONI, 1998). A secreção de suor na pele é contínua e seu aumento é uma reação do organismo ao

sobreaquecimento. A evaporação do suor é um processo que retira calor da pele. Mas se for restringida ou excessiva, produzirá as sensações de pele úmida ou de pele seca.

O ambiente influencia as trocas de calor pelos processos de radiação, condução, convecção e evaporação. Essas trocas dependem respectivamente da temperatura das superfícies e também da temperatura, umidade e velocidade do ar. O indivíduo influencia essas trocas por meio de sua atividade e vestimenta (LAMBERTS et al, 2014). O conforto térmico pode ser também definido como um conjunto de condições microclimáticas consideradas confortáveis ou aceitáveis no interior do edifício (GIVONI, 1998). O estudo sobre avaliação do conforto térmico busca estabelecer a condição necessária para um ambiente ser termicamente adequado à ocupação humana. Essa condição é geralmente denominada de zona de conforto. É improvável que todos os ocupantes de um ambiente sintam o mesmo nível de conforto térmico, devido a diferenças relacionadas a sexo, idade, hábitos etc. A possibilidade viável para avaliação é buscar uma condição de aceitabilidade térmica para a maior parcela dos indivíduos. Os estudos da avaliação de conforto térmico visam ainda estabelecer métodos para avaliar o desempenho do edifício, com base em objetivos de satisfação e desempenho dos ocupantes, além da conservação energética (LAMBERTS et al, 2014).

2.1.1 Abordagem adaptativa do conforto térmico

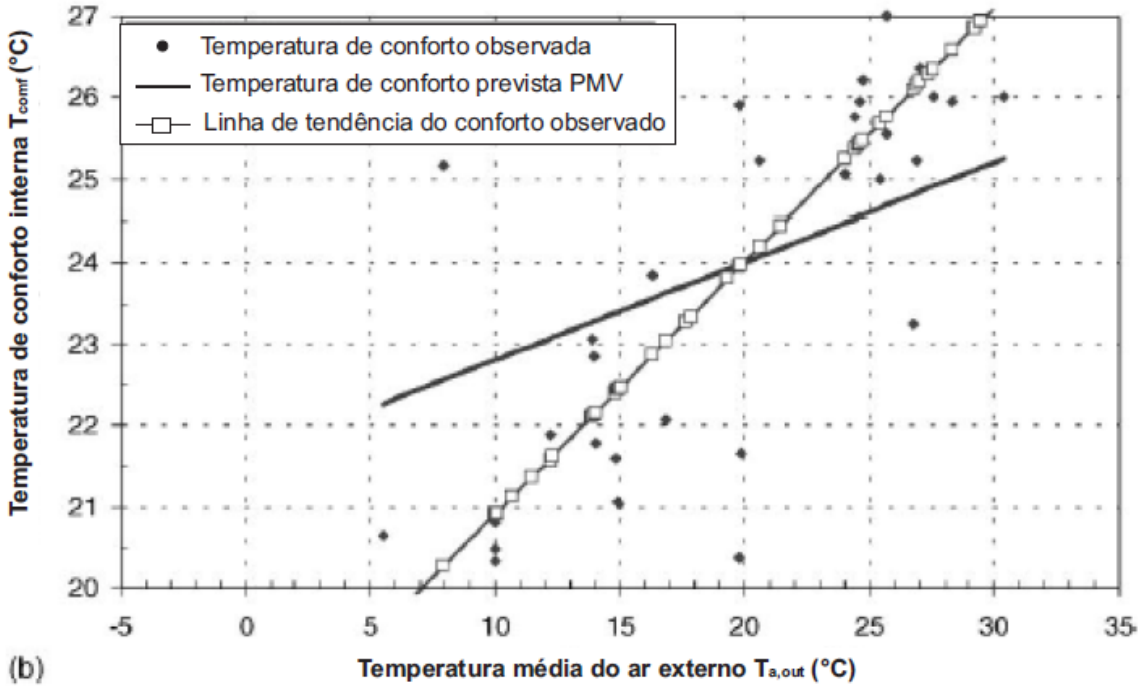
Há duas abordagens na avaliação do conforto térmico: a estática (ou analítica) e a adaptativa. A primeira teve início com pesquisas de Ole Fanger, usando câmaras climatizadas. Essa abordagem apoia-se no conceito de neutralidade térmica, que representa o conforto como uma condição universal de equilíbrio entre a produção de calor do corpo e sua troca com o meio. Assim sendo, a neutralidade térmica considera o voto de um indivíduo médio. A segunda abordagem teve início com as pesquisas de campo de Michael Humphreys e apoia-se no conceito de adaptação, que representa o conforto térmico como uma condição variável e influenciada por fatores fisiológicos, psicológicos e comportamentais de grupos humanos (LAMBERTS et al, 2014). Essa abordagem considera a resposta de um indivíduo aclimatado. A abordagem estática deu origem ao modelo de cálculo Voto Médio Previsto (*PMV*, na sigla em inglês), que passou por desenvolvimentos sucessivos e tornou-se o método de avaliação de ambientes climatizados, constando atualmente em normas como a *ANSI/ASHRAE Standard* 55 (ANSI; ASHRAE, 2017) e a *ISO*-7730 (ISO, 2005). A Figura 2-1 mostra exemplos de pesquisa de laboratório e de campo, sobre conforto térmico.

Figura 2-1 - Exemplo de estudo em câmara climatizada, mostrando experimento com ocupantes (A), e exemplo de estudo de campo, mostrando estação microclimática (B).

Fonte: Adaptado de Lamberts et al. (2014).

O fenômeno adaptativo despertou o interesse de pesquisadores a partir da constatação de que a resposta dos indivíduos em câmara climatizada diferia da sua resposta em ambientes naturalmente ventilados. As pessoas toleram variações e intervalos maiores de temperatura quando na condição natural à qual estão adaptadas (LAMBERTS et al, 2014). A Figura 2.2 mostra a tendência da aceitabilidade térmica de indivíduos em ambiente naturalmente ventilado, expondo a diferença entre esta e a previsão pelo método *PMV*.

Figura 2-2 - Comparação entre a resposta de indivíduos sobre sua sensação térmica e a resposta prevista pelo método PMV, em ambiente ventilado naturalmente.

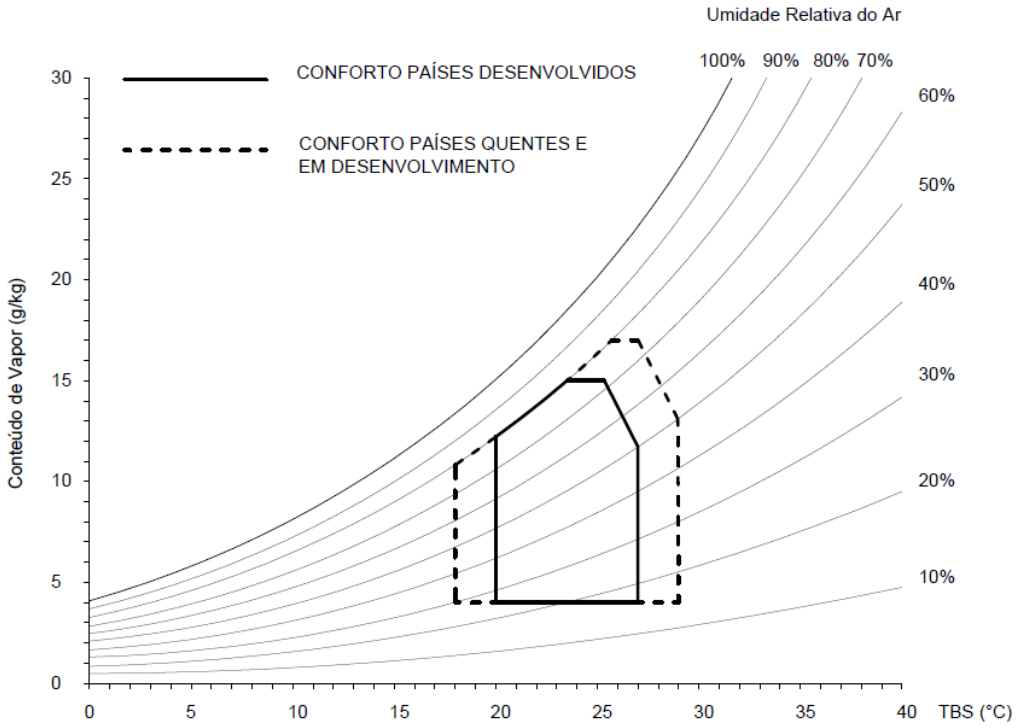


Fonte: Adaptado de DeDear e Brager (2002).

2.1.2 Carta Bioclimática de Givoni

Givoni (1992) propôs um método prescritivo de análise climática, para adaptação do edifício ao clima. A Figura 2-3 mostra a zona de conforto proposta na *Bioclimatic Building Confort Chart (BBCC)* (GIVONI, 1992). Essa proposta estimava a temperatura interna, a partir de dados de temperatura e umidade externas. Ela também propunha uma zona de conforto específica para países quentes e em desenvolvimento, considerando atividade sedentária e roupa comum de verão, em ambiente doméstico. Essa zona estendia-se de 20°C a 29°C de temperatura de bulbo seco e 4 g/kg a 17 g/kg de umidade absoluta (à sombra), e diferenciava-se da zona para países desenvolvidos por 2°C a mais no limite superior de temperatura do ar e mais 2 g/kg no limite superior de umidade absoluta.

Figura 2-3 – *Zona de conforto de verão e inverno para países quentes e em desenvolvimento.*



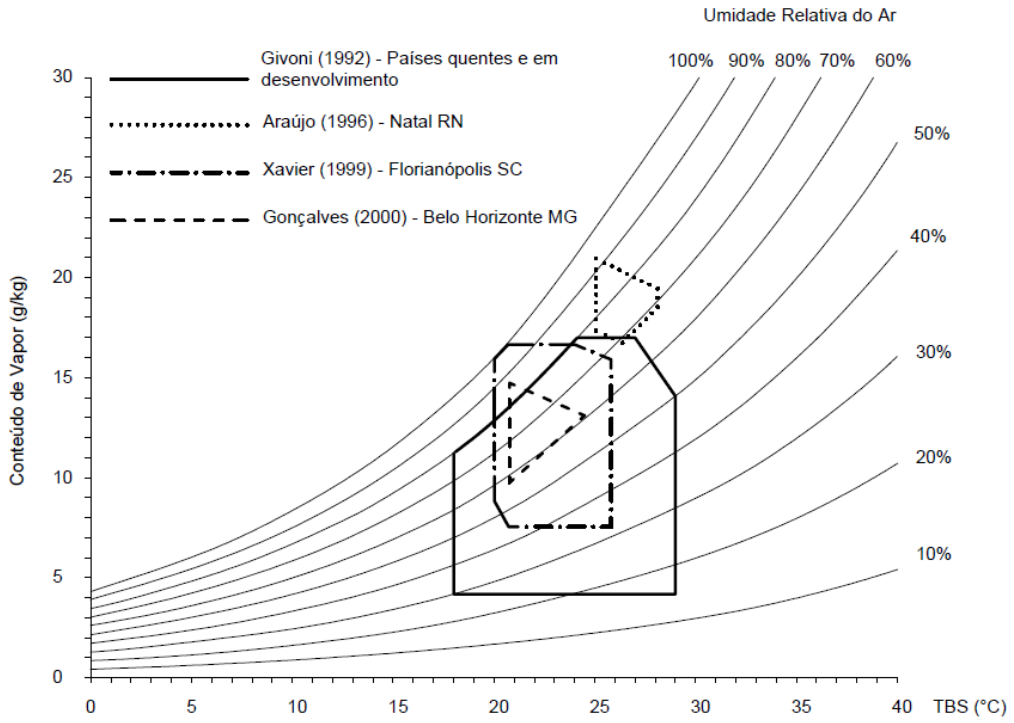
Fonte: Adaptado de Givoni (1992).

O autor dessa proposta buscava compensar as limitações de duas das principais propostas até aquele momento: Zona de Conforto da *ASHRAE* (ASHRAE, 1985) e Carta Bioclimática de Olgyay (OLGAY, 1963). A zona de conforto proposta pela *ASHRAE* foi feita para ambientes climatizados e por isso subestimava a tolerância a temperaturas acima de 27°C e a velocidades do ar acima de 0,2m/s. Isso podia ser observado especialmente em habitantes de países quentes e em desenvolvimento, onde a maioria da população estava habituada a ambientes naturalmente ventilados, sem dispor de equipamentos eletromecânicos para

conforto térmico. Já a Carta Bioclimática de Olgyay usava dados de temperatura externa, não considerando as diferenças entre temperatura interna e externa, nem a influência de estratégias passivas para conforto térmico nos edifícios.

A *BBCC* influenciou a criação da norma brasileira NBR 15220-Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações de Interesse Social Unifamiliares (RORIZ; GHISI; LAMBERTS, 1999; ABNT, 2005). Essa norma permanece como uma das principais referências no Brasil, quanto a prescrições para uma arquitetura adaptada ao clima. Bogo et al. (1994) comparou resultados obtidos com a *BBCC* de Givoni com propostas alternativas de Olgyay (1963; 1968), Watson e Labs (1983), Gonzalez (1986), Szokolay (1987), *ASHRAE* (1992). Esse estudo concluiu que a *BBCC* era adequada às previsões de conforto térmico no contexto brasileiro. No entanto, pesquisas de campo posteriores (ARAÚJO; ARAÚJO, 1997; XAVIER, 1999; GONÇALVES, 2000) indicavam que sua zona de conforto ignorava diferenças regionais, devido à aclimatação dos habitantes. Essas diferenças tendem a provocar superestimativa na previsão das frequências de conforto e podem distorcer a comparação de eficácia entre estratégias bioclimáticas alternativas, como pode ser visto na Figura 2-4.

Figura 2-4 - Zona de conforto de Givoni (1992) e zonas alternativas propostas por pesquisadores brasileiros.



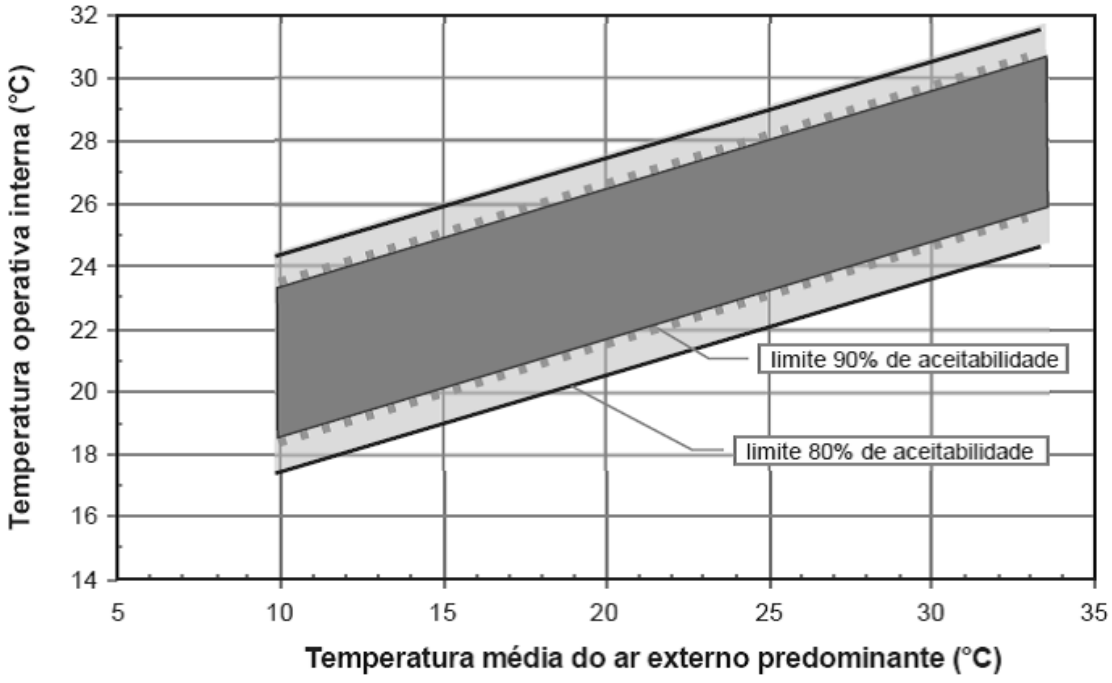
Fonte: Adaptado de Pereira e Assis (2010), a partir de dados de pesquisas de campo no Brasil (ARAÚJO; ARAÚJO, 1997; XAVIER, 1999; GONÇALVES, 2000).

O projeto de criação da Base Brasileira de Dados de Conforto Térmico reuniu 19.925 votos de sensação térmica, das cidades de São Luís-MA, Maceió-AL, Maringá-PR e Florianópolis-SC. Esses dados representam o conforto em climas tropicais e subtropicais do Brasil (ANDRÉ et al, 2019) e demonstraram haver uma diferença de 3°C entre os votos de temperatura confortável em climas tropicais e subtropicais. A mesma diferença ocorreu para os votos de temperatura inaceitável.

2.1.3 Carta de Conforto Adaptativo

A norma norte-americana *ANSI*/*ASHRAE Standard* 55, *Thermal e Envionmental Conditions for Human Occupancy* (ASHRAE, 2017) apresenta a Carta de Conforto Adaptativo para ambientes ventilados naturalmente. Esse método de avaliação de conforto é baseado na proposta de DeDear e Brager (2002), que foi desenvolvida a partir de dados do relatório RP-884 (DEDEAR; BRAGER; COOPER, 1997), coletados em 160 edifícios comerciais, em diferentes zonas climáticas de quatro continentes. Essa norma serviu de referência para o terceiro projeto de revisão da NBR 16401-Instalações de Ar Condicionado, Sistemas Centrais e Unitários, Parte 2, Parâmetros de Conforto Térmico (ABNT, 2019). A Carta de Conforto Adaptativo da *ANSI*/*ASHRAE Standard* 55 pode ser vista na Figura 2.5, para 80% e 90% de aceitabilidade térmica.

Figura 2-5 - Carta de Conforto Adaptativo da *ANSI/ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2017).



Fonte: Adaptado de *ANSI*/*ASHRAE Standard* 55 (ASHRAE, 2017).

Os limites da zona de conforto nesse método variam em função da temperatura média externa, da temperatura operativa interna e da velocidade média do ar no recinto. A Tabela 2.1 mostra a expansão do limite superior da zona de conforto em função da velocidade média do ar, que ocorre a partir de 25°C de temperatura operativa e de 0,6 m/s de velocidade do ar.

Tabela 2-1 - Correção do limite superior da zona de conforto adaptativo em função da velocidade do ar.

	Velocidade do ar acima de 0,6 m/s	Velocidade do ar acima de 0,9 m/s	Velocidade do ar acima de 1,2 m/s
Expansão do limite superior da zona de conforto	1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: Adaptado de *ANSI/ASHRAE Standard* 55 (ASHRAE, 2017).

A avaliação do conforto por esse método considera indivíduos adultos, ocupando o recinto há pelo menos 15 minutos, sob uma pressão atmosférica equivalente a altitudes de até 3000m. Sua aplicação depende das seguintes condições:

a) Não haver nenhum tipo de condicionamento mecânico;
b) Possuir aberturas para ventilação controladas pelo usuário;
c) Atividade do usuário restrita ao intervalo entre 1 e 1,3 met, de acordo com a Figura 2.6;
d) Vestimenta do usuário restrita ao intervalo entre 0,5 e 1 clo, de acordo com a Figura 2.6;
e) Temperatura média prevalecente do ar externo entre 10°C e 33,5°C.

Figura 2-6 - Taxa de calor produzida pelo metabolismo em diferentes atividades (escala met), à esquerda, e nível de isolamento térmico de diferentes tipos de vestimenta (escala clo), à direita.

Fonte: Fanger (1987).

A temperatura média predominante do ar externo é determinada por meio da Equação 2.1 (ANSI; ASHRAE, 2017) e com base nas temperaturas de bulbo seco (TBS) externas nos sete últimos dias antes do dia em questão.

$$T_{mpa(out)}=0,34t_{od-1}+0,23t_{od-2}+0,16t_{od-3}+0,11t_{od-4}+0,08t_{od-5}+0,05\ t_{od-6}+0,03t_{od-7} \qquad \text{Equação 2.1}$$

Onde: $T_{pma(out)}$ é a temperatura média predominante do ar exterior e $T_{od\ -\ 1}$ é a temperatura do dia anterior ao dia em questão. A temperatura média do ar externo diária para

cada um dos sete dias deve ser definida a partir de uma média aritmética simples, considerando todas as observações nas 24 horas do dia. A temperatura média predominante deve estar contida no intervalo entre 10°C e 33,5°C, para que o método tenha validade. A avaliação do conforto térmico do usuário depende das temperaturas operativas internas, que devem estar contidas nos limites de 80% de aceitabilidade da zona de conforto. Esses limites são determinados segundo as equações 2.2 e 2.3 (ANSI; ASHRAE, 2017), onde "t_{mpa}" é a temperatura média predominante externa:

Limite superior de 80 % de aceitabilidade (°C)=0,31t_{mpa}(ext)+21,3 Equação 2.2

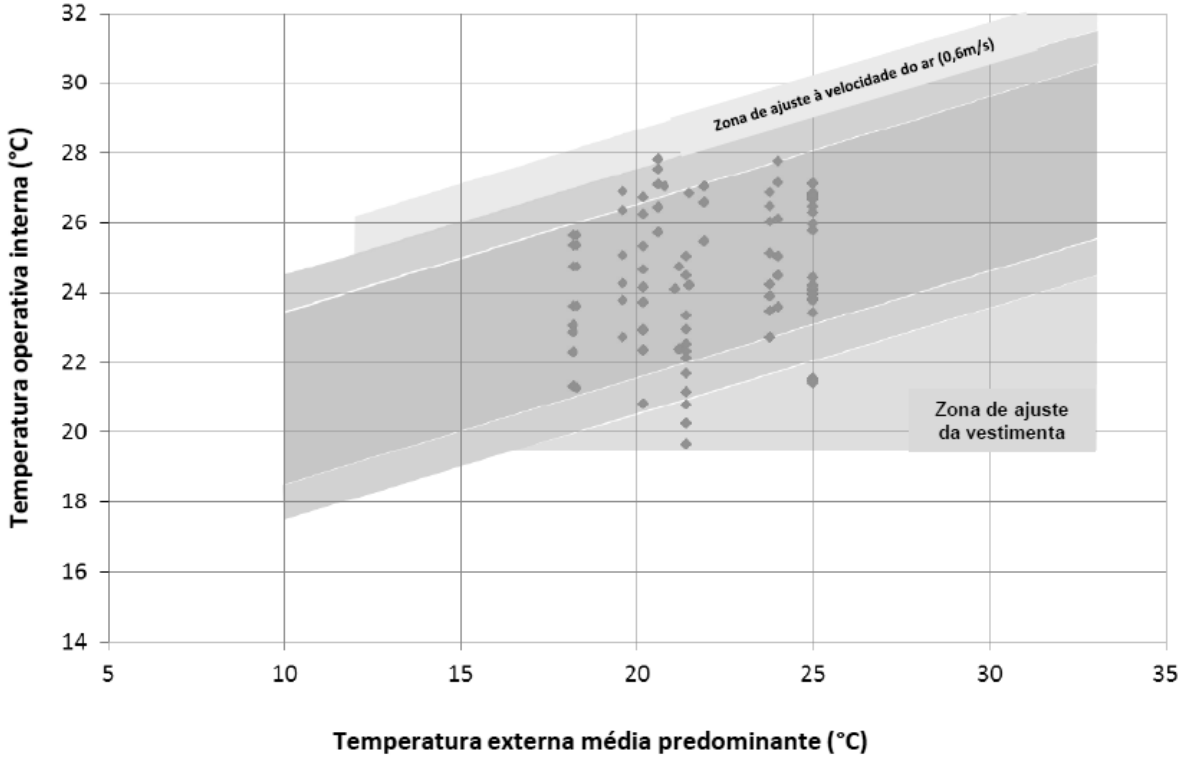
Limite inferior de 80 % de aceitabilidade (°C)=0,31t_{mpa}(ext)+14,3 Equação 2.3

O fenômeno da aclimatação envolve os hábitos do usuário, além de sua resposta fisiológica. A vestimenta pode ter influência considerável na aceitabilidade térmica (DEVECCHI; LAMBERTS; CANDIDO, 2017). Em ambiente doméstico, pode-se dispor de cobertores para os momentos de maior frio ou de roupas mais leves, para os momentos de calor. A Carta de Conforto Adaptativo da *ANSY/ASHRAE Standard* 55 (ANSI; ASHRAE, 2017) foi desenvolvida com base em dados do relatório *RP*-884 (DEDEAR; BRAGER; COOPER, 1997), coletados em edifícios comerciais. Por isso, ela ignora atividades abaixo de 1 met e vestimenta abaixo de 0,5 clo e acima de 1,3 clo, que refletem condições e adaptações frequentes em ambiente doméstico no Brasil.

De Vecchi et al. (2014) propôs uma correção à Carta de Conforto Adaptativo da *ANSY/ASHRAE Standard* 55 (ANSI; ASHRAE, 2017), para compensar em parte as limitações da norma norte-americana. A proposta da zona de ajuste da vestimenta fixa o limite inferior da zona de conforto para 80% de aceitabilidade térmica em 19,5°C, a partir da ocorrência combinada de temperatura média do ar externo acima de 16,5°C e temperatura operativa interna acima de 19,5°C, como pode ser visto na Figura 2.7. Essa proposta de correção foi aceita e incorporada ao terceiro projeto de revisão da NBR 16401-2 (ABNT, 2019).

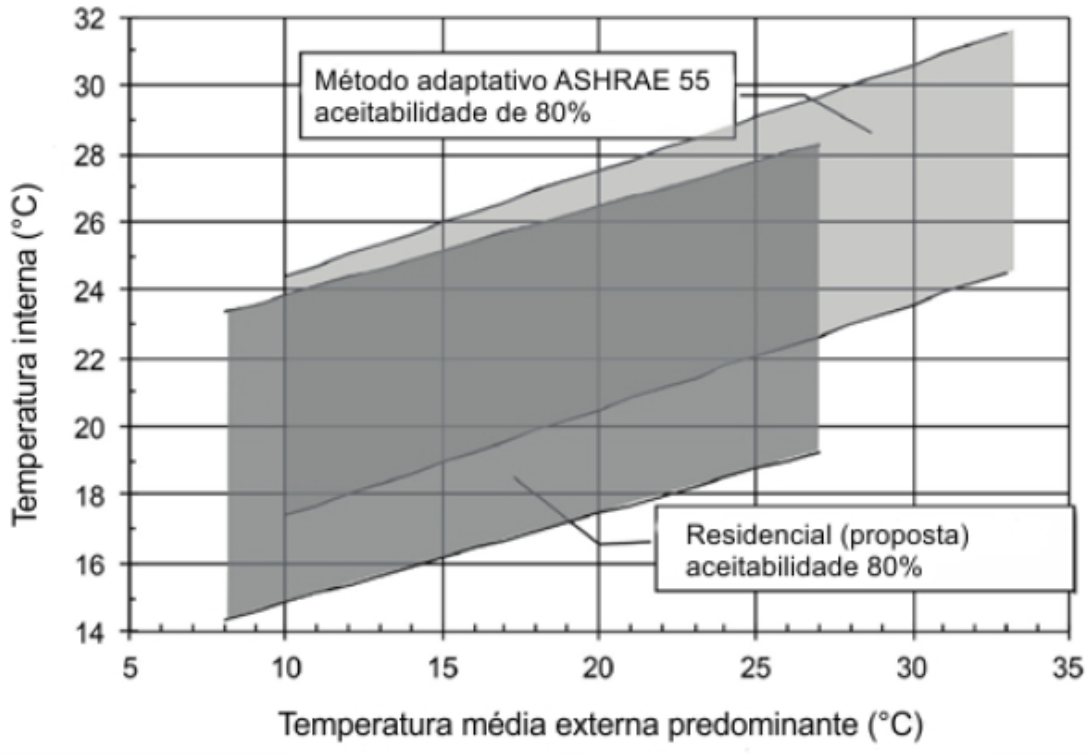
DeDear, Kim e Parkinson (2018) realizaram estudo sobre conforto, envolvendo 42 residências em clima subtropical na Austrália. Os resultados mostravam que indivíduos em espaços domésticos se adaptam a um intervalo de temperatura diferente de indivíduos em espaços comerciais. O limite inferior da zona para 80% de aceitabilidade ficou 2°C mais baixo, em relação a *ANSI-ASHRAE Standard* 55 (2017). Os autores então propuseram um modelo de conforto adaptativo residencial, que pode ser visto na Figura 2.8.

Figura 2-7 - Proposta de expansão do limite inferior da zona de conforto por adaptação da vestimenta (clo).



Fonte: Adaptado de DeVechi et al. (2014). Os dados do gráfico são de estudo de campo em Florianópolis-SC (DEVECCHI, 2011).

Figura 2-8 - Carta de Conforto Adaptativo Residencial.



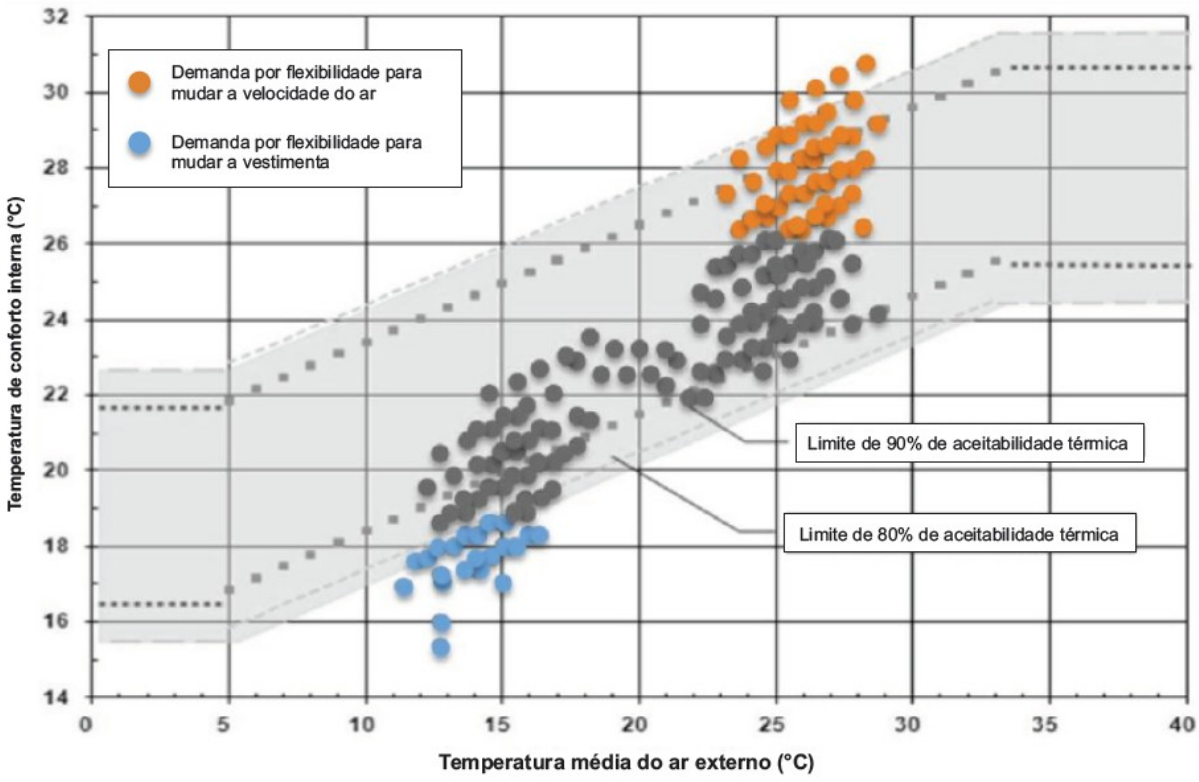
Fonte: Adaptado de DeDear, Kim e Parkinson (2018).

Essa proposta de zona de conforto adaptativo residencial está sendo usada como referência para o cálculo do percentual de horas ocupadas dentro de faixas de temperatura operativa confortável, no método de avaliação do desempenho térmico de residências no projeto de revisão da NBR 15575 (KRELLING et al, 2020; ABNT, 2021). Mas a amostra de dados que baseou a proposta de DeDear, Kim e Parkinson (2018) abrangeu apenas clima subtropical na Austrália e provavelmente deverá ser aperfeiçoada em breve, a partir de dados de outros climas.

2.1.4 Influência da velocidade e umidade do ar no conforto térmico

Cândido et al. (2010) reuniram dados de pesquisas de campo realizadas em diferentes climas brasileiros, mostrando votos de aceitabilidade térmica de ocupantes de edifícios naturalmente ventilados. A Figura 2.7 mostra esses dados na Carta de Conforto Adaptativo de DeDear e Brager (2002), expondo o quanto o método consegue prever o conforto. Ainda assim, Lamberts et al. (2013) destacaram nesse mesmo gráfico a demanda dos usuários por maior velocidade do ar, que ficou notável acima de 26°C de temperatura operativa.

Figura 2-9 - Dados de estudos de campo sobre aceitabilidade térmica em ambientes naturalmente ventilados em diferentes regiões do Brasil.



Fonte: Adaptado de Lamberts et al. (2013), a partir de gráfico de Cândido et al. (2010).

Modelos adaptativos de previsão de conforto térmico vêm sendo propostos por pesquisadores desde a década de 70 (HUMPHREYS, 1078; AULICIENS, 1981; AULICIENS; SZOKOLAY, 1997; HUMPHREYS; NICOL, 2002; DEDEAR; BRAGER, 2002). A previsão do conforto por essas propostas foi comparada com pesquisas de campo no território brasileiro (PEREIRA; ASSIS, 2010; NEGREIROS, 2010; FERREIRA; SOUZA, 2013; LAMBERTS et al 2013). O modelo de DeDear e Brager (2002) esteve sempre entre os mais bem sucedidos nas previsões. Apesar disso, Ferreira e Souza (2013) obtiveram resultados que indicam que esse modelo foi mais incerto que o de Humphreys (1978) em cidades de clima quente, como Natal-RN e Manaus-AM. Enquanto saiu-se melhor nas previsões para cidades de clima ameno, como Florianópolis-SC, Londrina-PR e Belo Horizonte-MG.

Givoni (1992) considera que a ventilação natural expande o limite da zona de conforto até 32°C de temperatura do ar e até 90% de umidade relativa do ar, mas isso dependia de velocidades contínuas do ar, em torno de 2 m/s. Uma condição comum em ambientes com ventilação cruzada, segundo o mesmo. Ele também afirma que a velocidade do ar não afeta a sensação de calor no intervalo entre 33°C e 37°C e aumenta essa sensação acima dos 37°C, embora continue ainda atenuando a sensação desconfortável de pele úmida. Lamberts et al. (2016) afirmam que a velocidade do ar é eficiente para o resfriamento no intervalo entre 27°C e 32°C, mas apenas se a umidade relativa estiver entre 15% e 75%. A partir da temperatura do ar de 32°C, a ventilação representaria aumento prejudicial nos ganhos por convecção no recinto. Buonocore et al. (2018) realizaram estudo em salas de aula naturalmente ventiladas na cidade de São Luís-MA, que apresentavam umidade relativa interna mínima de 60%. Esse estudo mostrou aumento significativo da sensação de calor a partir da temperatura operativa interna de 30°C e de umidade relativa interna de 70%. O desconforto foi descrito pelos participantes da pesquisa como inaceitável, mesmo com velocidades do ar acima de 1m/s. A Carta de Conforto com Ventilação, proposta por Khedari (2000) para Tailândia, mostra que os votos de sensação neutra, com umidade relativa do ar abaixo de 65%, ocorreram em temperaturas de até 33°C e com velocidade do ar de até 3 m/s. Já os votos de temperatura neutra para umidade relativa acima de 75% ocorreram apenas até a temperatura do ar de 30°C, com velocidade do ar de até 1m/s. No entanto, o modelo adaptativo da *ANSI*/*ASHRAE Standard 55* considera uma temperatura operativa de 33°C aceitável para 80% dos ocupantes, desde que a temperatura média externa predominante seja 31°C e a velocidade do ar seja de 1,2m/s (HOYT et al, 2017) . Mas, esse modelo preditivo não está em função da umidade do ar

e um estudo mostrou que sua previsão de conforto precisa ser aperfeiçoada, pois superestima o conforto com umidades relativas acima de 75% (TOE; KUBOTA, 2013). Nicol (2004) comparou dados de 113 estudos de campo realizados em cidades de 16 países, com climas quentes e úmidos, quentes e secos e temperados. Esse estudo conclui que as temperaturas de conforto apontadas em climas quentes e úmidos (U.R.>75%) apresentavam aproximadamente 1°C a menos que aquelas apontadas em climas quentes e secos (U.R.<64%). A partir dessa conclusão, Nicol recomenda que a zona de conforto adaptativo, em condições de umidade relativa acima de 75%, tenham 1°C a menos em seu limite superior. O autor também concluiu que a velocidade do ar pode expandir o limite superior da zona de conforto em 2°C, coincidindo com o modelo contido na norma *ANSI/ASHRAE Standard 55* (ANSI; ASHRAE, 2017).

O limite máximo de velocidade do ar considerado aceitável em interiores e para atividade sedentária pode variar entre 0,5 e 2,5 m/s, de acordo com diferentes autores (LAMBERTS et al, 2014). Givoni (1998) considera a velocidade de 2 m/s necessária para o conforto por efeito da velocidade do ar. O estudo de Khedari (2000) na Tailândia mostrou sensação neutra ocorrendo com temperatura do ar de 30°C, umidade relativa de 60% e velocidade do ar de 0,5m/s. Mas quando a umidade aumentou para 75%, na mesma temperatura, a velocidade do ar precisou ser de 1m/s, para sensação neutra. Quando a temperatura aumentou para 32°C e a umidade relativa permaneceu em 75%, a velocidade do ar precisou aumentar para 2m/s, para sensação neutra. Cândido et al. (2010) demonstraram que a velocidade mínima para 80% de aceitação foi de 0,2m/s, com temperatura operativa entre 18°C e 24°C. Mas precisa aumentar para 0,7m/s, se as temperaturas estiverem entre 25°C e 32°C, em ambientes naturalmente ventilados e em clima quente e úmido no Brasil. A *ANSI/ASHRAE Standard 55* adotava 0,8m/s como limite máximo de velocidade do ar em ambientes naturalmente ventilados, até a versão de 2004 (CANDIDO; DEDEAR; LAMBERTS, 2011). Na versão atual dessa norma, não há mais tal limite, desde que o usuário tenha liberdade de operar aberturas e ventiladores para ajustar a velocidade a sua necessidade de conforto (ANSI; ASHRAE, 2017).

2.1.5 Critérios de qualidade do ar interno

A ventilação do edifício tem duas funções relevantes para o conforto humano: a térmica e a higiênica (LAMBERTS et al. 2016). Atividades humanas alteram a qualidade do ar no interior do edifício, podendo torná-la inadequada. Certo número de renovações de ar nos

ambientes, por meios naturais ou mecânicos, é importante para saúde e conforto dos usuários. Há momentos em que os ganhos ou perdas térmicas produzidas pela ventilação não contribuem para um balanço térmico favorável ao conforto, mas a ventilação permanece nesses momentos tendo ainda um papel relevante na manutenção da qualidade do ar. A norma brasileira NBR 16401, Instalações de Ar-Condicionado-Sistemas Centrais e Unitários, Parte 3, Qualidade do ar interior (ABNT, 2008) estabelece condições básicas e requerimentos mínimos para qualidade aceitável do ar interno. No entanto, ela está baseada na norma norte-americana *ANSI*/*ASHRAE* 62-1 e na norma europeia EN 779:2002 e aplica-se apenas à ventilação mecânica, em edifícios não residenciais.

A norma norte-americana *ANSI*/*ASHRAE Standard* 62-2- *Ventilation* and *Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings* (ANSI; ASHRAE, 2016) define requisitos mínimos para que sistemas de ventilação mecânico ou natural possam prover qualidade aceitável do ar interno em edifícios residenciais unifamiliares. A concentração de CO_2 é o principal indicador de concentração excessiva de poluentes no ar interno. No entanto, a versão de 2016 da norma norte-americana havia abandonado os critérios de qualidade do ar baseados em produção de CO_2 por indivíduo e vazão de ar fresco para conter a concentração de CO_2, alegando a falta de estudos mais recentes sobre o tema. Nessa versão, a norma exige apenas que o sistema de ventilação forneça um suprimento contínuo de ar externo para a unidade habitacional, com vazão igual ou superior a indicada na Tabela 2.2. Esse critério considera que unidades com um único dormitório são habitadas por duas pessoas, contabilizando uma pessoa a mais por cada dormitório adicional. Unidades habitacionais com número total de habitantes acima dessa previsão devem contabilizar mais 3,5 L/s por cada pessoa adicional.

Tabela 2-2 - Vazões mínimas (L/s) para manter a qualidade do ar em moradias, em função da área útil e do número de dormitórios.

	Número de dormitórios			
Área (m²)	**1**	**2**	**3**	**4**
< 47	14	18	21	25
De 47 a 93	21	24	28	31
De 94 a 139	28	31	35	38

Fonte: Adaptado de *ANSI/ASHRAE Standard* 62-2 (2016).

2.1.6 Avaliação de conforto no Brasil

A avaliação de conforto térmico no contexto brasileiro está baseada na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Esta tem como base a Carta de Givoni (1992) e o Método Mahoney (KOENIGSBERGER; MAHONEY; EVANS, 1970), que são instrumentos prescritivos, cuja

avaliação se baseia em estimativa do comportamento de um edifício hipotético, a partir de dados do clima. Os instrumentos RTQ-R (INMETRO, 2012) e NBR 15575 (ABNT, 2013) são posteriores à NBR 15220 e contam com método prescritivo (normativo) e avaliativo. Eles introduziram a opção de basear a avaliação do desempenho em simulação computacional, por diferentes critérios de desempenho como: estimativa de graus-hora de desconforto e diferença de temperatura interna e externa.

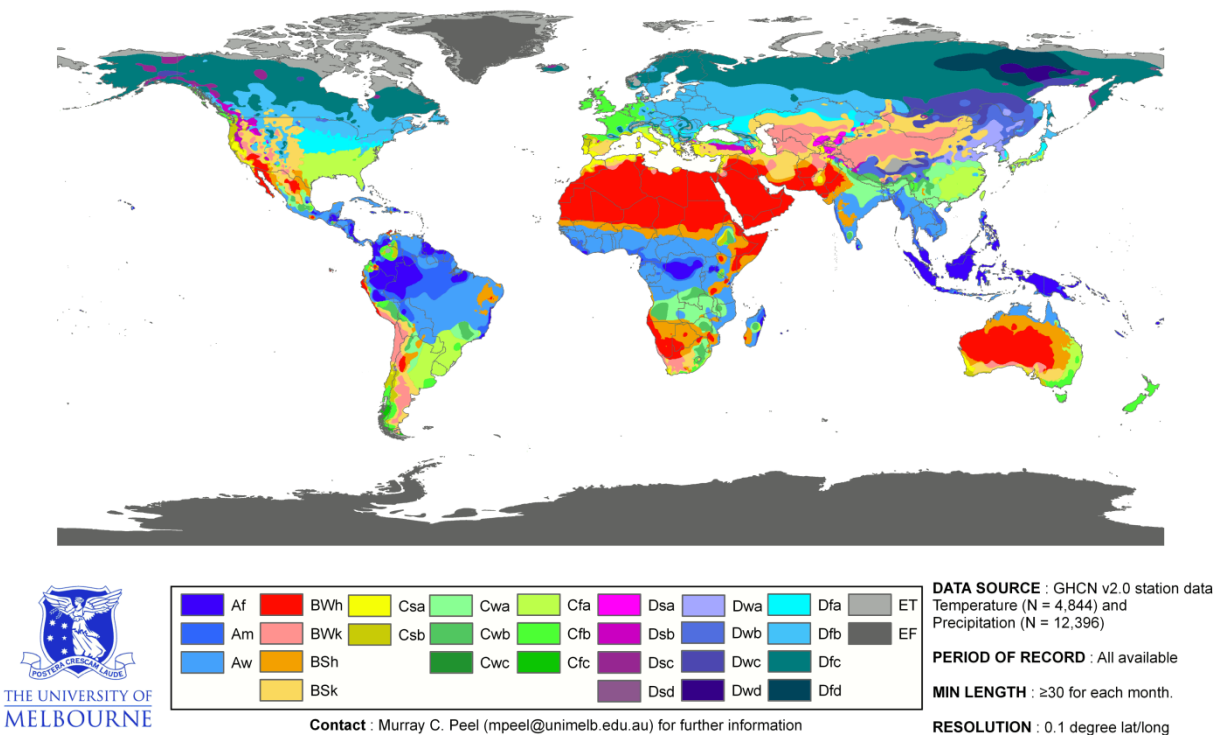
Critérios adaptativos têm menor incerteza em espaços naturalmente ventilados, por estimarem o efeito da aclimatação térmica e da contribuição efetiva da velocidade do ar. O método proposto por DeDear e Brager (2002) e adotado pela norma norte-americana *ANSI/ASHRAE Standard 55* (ANSI; ASHRAE, 2017) mostrou-se eficaz nas previsões de conforto para o território brasileiro. Ele está sendo adotado na nova versão da norma brasileira NBR 16401-2 (ABNT, 2017). Apesar disso, estudos (LAMBERTS et al, 2013; FERREIRA; SOUZA, 2013; TOE; KUBOTA, 2013) vêm pontuando algumas limitações em suas previsões. Ele tem o mérito de considerar o efeito da temperatura operativa e da velocidade do ar no conforto, mas ignora sua interação com a umidade do ar. Ainda assim, há também estudos (NICOL, 2004; DEVECCHI, 2014) que vêm propondo correções para compensar tais limitações. Assim, o método está passível de aperfeiçoamento, mas já vem sendo utilizado em pesquisas no Brasil, mesmo antes da publicação da nova versão da norma brasileira NBR 16401-2 (ABNT, 2019). Não foram encontrados em normas brasileiras critérios para avaliar da função higiênica da ventilação natural, embora estes critérios já constem em normas norte-americanas, que vêm servindo de referência para normatização no Brasil.

2.2 Climas brasileiros

Tempo meteorológico é o conjunto de condições atmosféricas apresentado em uma localização e momento específicos. Já o clima expressa um padrão nessas condições do tempo meteorológico em uma dada região, com base em observações de 30 anos ou mais (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Os climas da Terra são gerados principalmente por diferenças na quantidade de energia solar incidente na superfície terrestre. Tais diferenças geram temperaturas médias diferentes e são a força que desencadeia fenômenos atmosféricos e oceânicos, que transferem calor e umidade de uma região a outra. As variáveis mais representativas dos diferentes climas da Terra são temperatura e umidade. Latitude é a distância angular do Equador e é determinante para as temperaturas, por sua relação com a radiação incidente na superfície. Altitude é a distância vertical a partir do nível do mar e é

determinante na temperatura e umidade. Continentalidade é a distância horizontal de grandes massas de água e influencia a umidade, embora não tenha variação linear por ser afetada pelo relevo (FLORENSA; ROURA, 1995). A interação entre essas variáveis produz a variedade de climas no globo, embora esses climas sofram ainda influência de regimes de vento, massas de ar, correntes oceânicas e topografia. Apesar da notável diversidade climática global, é possível convencionar similaridades entre regiões e fazer alguma classificação. Há métodos diferentes para classificar climas, a depender do objetivo envolvido. Um dos métodos mais amplamente usados deriva do trabalho de Wladimir Köppen e seu colaborador Rudolf Geiger, proposto em 1900 e baseado em dados da flora, temperatura, quantidade e distribuição anual da precipitação (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). A Figura 2.10 mostra a distribuição global dos 29 climas da classificação Köppen-Geiger.

Figura 2-10 - Classificação climática global pelo método Köppen-Geiger.

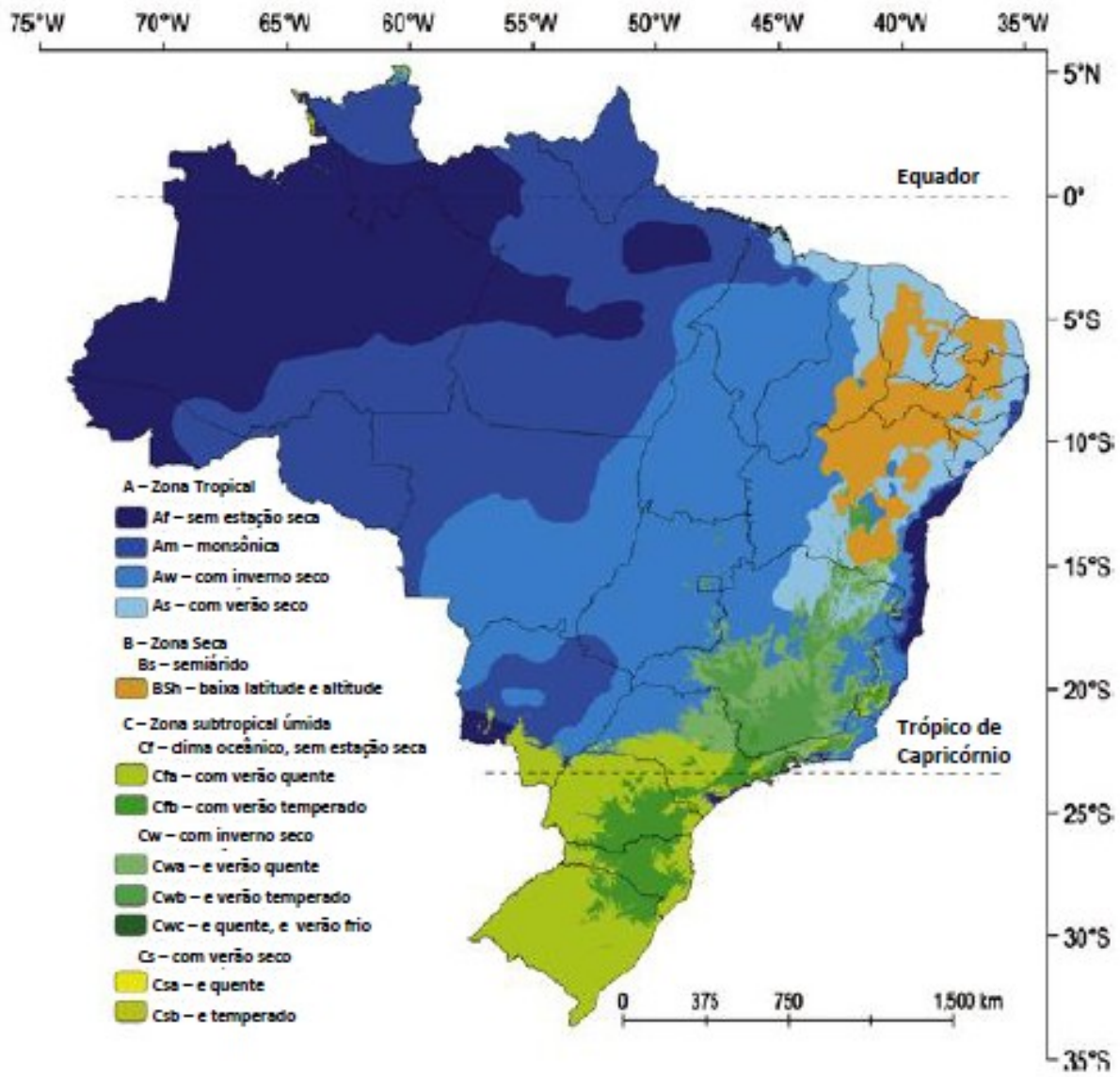


Fonte: Peel, Finlayson e McMahon (2007).

A primeira letra do código de sequência tripla indica: A (climas tropicais), B (climas áridos), C (climas temperados, temperados quentes ou subtropicais), D (climas continentais ou temperados frios), E (climas polares). Há 12 climas no Brasil, dentre os 29 da classificação Köppen-Geiger. A Figura 2-11 mostra a distribuição desses climas no território brasileiro. Eles aparecem agrupados em uma zona tropical (A), uma zona semiárida (B) e uma zona

subtropical (C). A zona tropical tem climas sem estação seca (Af), climas monçônicos (Am), climas com inverno seco (Aw) ou com verão seco (As). A zona subtropical úmida tem climas sem estação seca e com verão quente (Cfa), ou com verão ameno (Cfb), ou inverno seco e verão quente (Cwa), ou com verão ameno (Cwb), verão curto e frio (Cwc), verão seco e quente (Csa), ou seco e ameno (Csb). A zona semiárida apresente apenas o clima semiárido de baixa latitude e altitude (Bsh).

Figura 2-11 - Classificação climática do Brasil pelo método Köopen-Geiger.

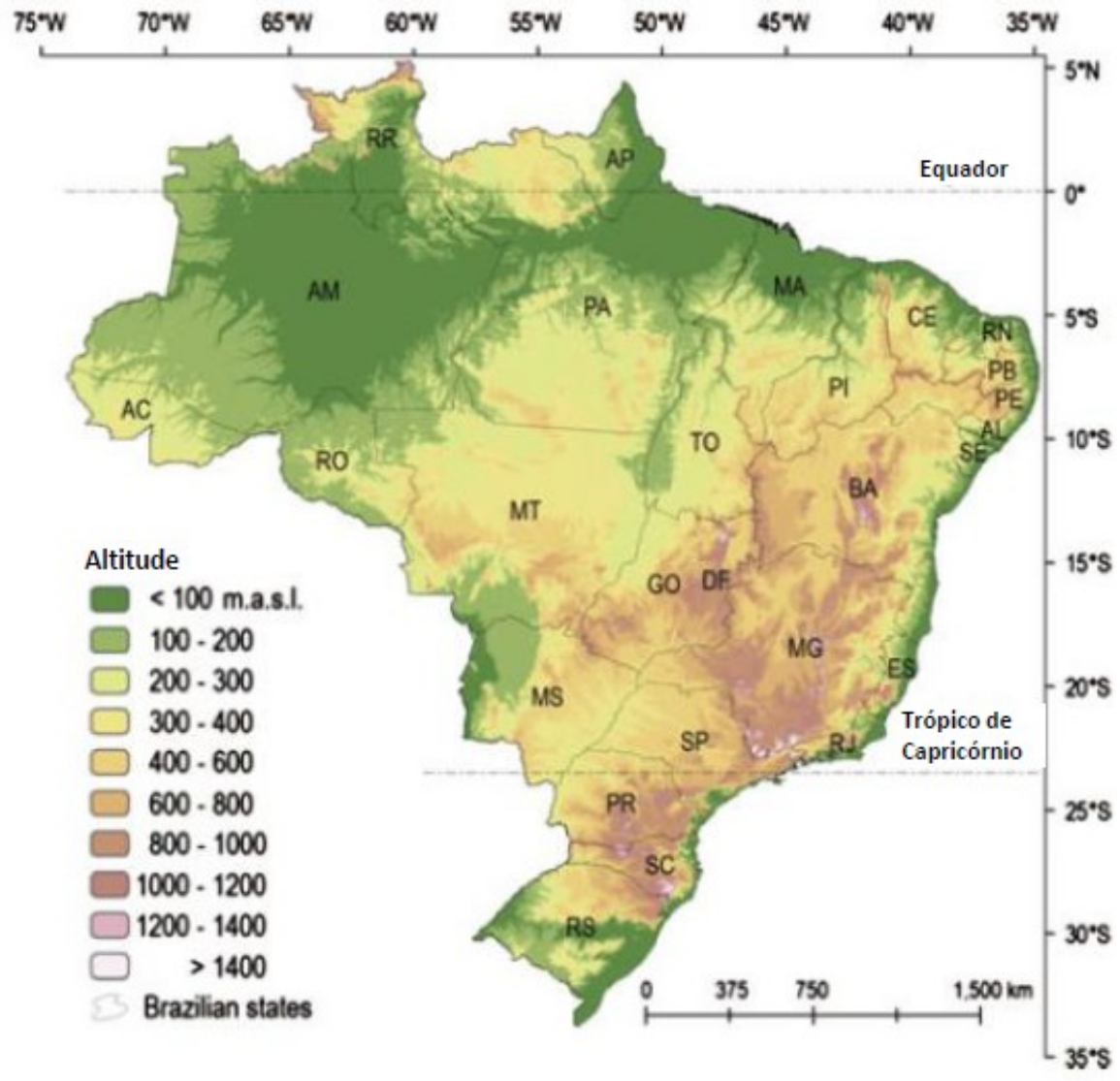


Fonte: Adaptado de Alvares (2014).

Figura 2.12, Figura 2.13 e Figura 2.14 mostram variações de altitude, precipitação e temperatura no território brasileiro. Essas variações causam diferenças regionais significativas, dotando o território brasileiro de considerável diversidade climática. De modo

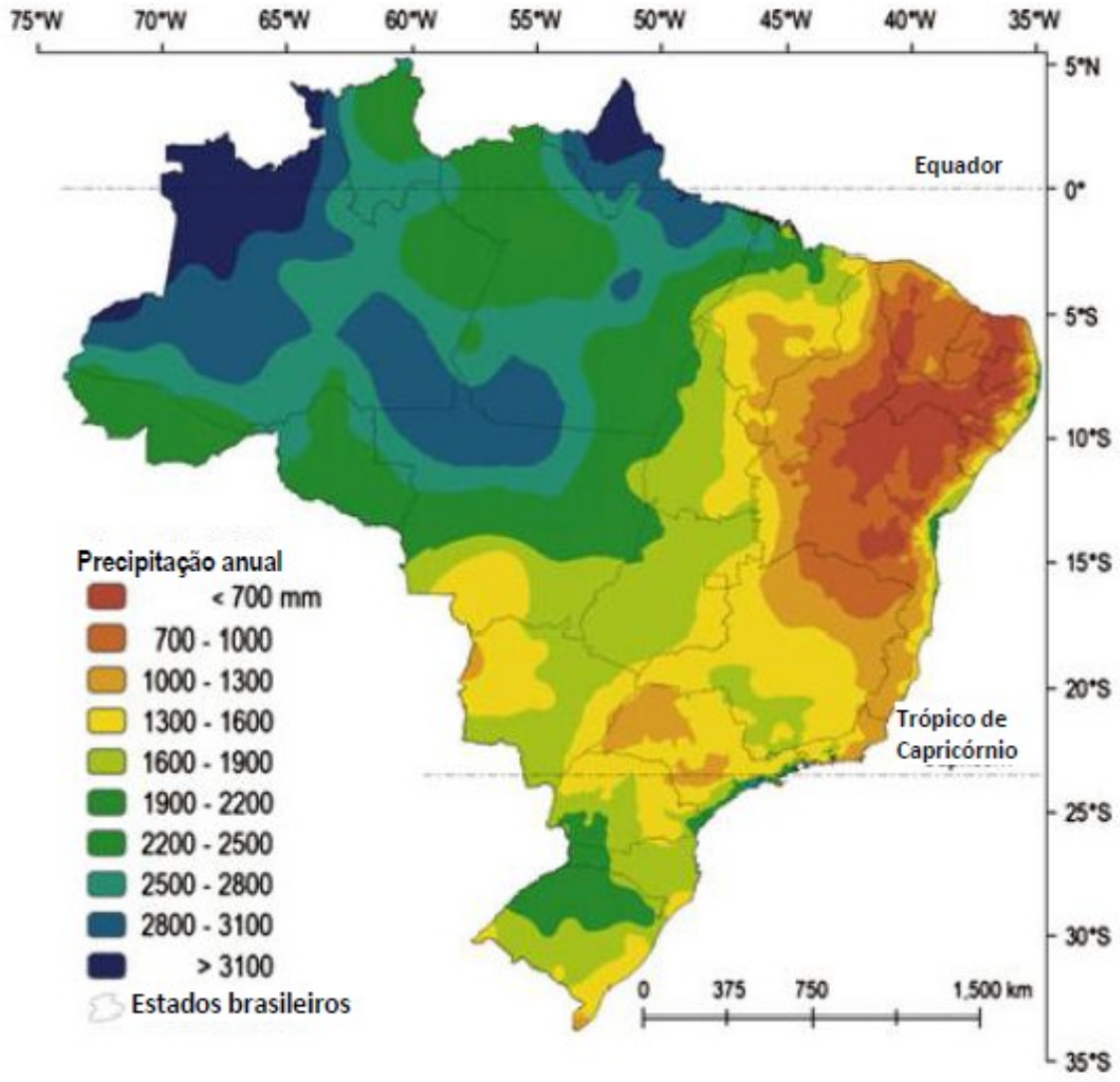
geral, o mapeamento dessas variáveis indica temperaturas mais elevadas na porção norte do Brasil, combinadas com extremos de umidade baixa e alta, respectivamente no extremo norte da zona semiárida (Sertão) e na porção norte da zona tropical (Amazônia). As temperaturas mais baixas coincidem com os pontos de maior altitude na zona subtropical, entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, também entre os estados do Paraná, Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul.

Figura 2-12 - Mapa do Brasil representando dados de altitude.



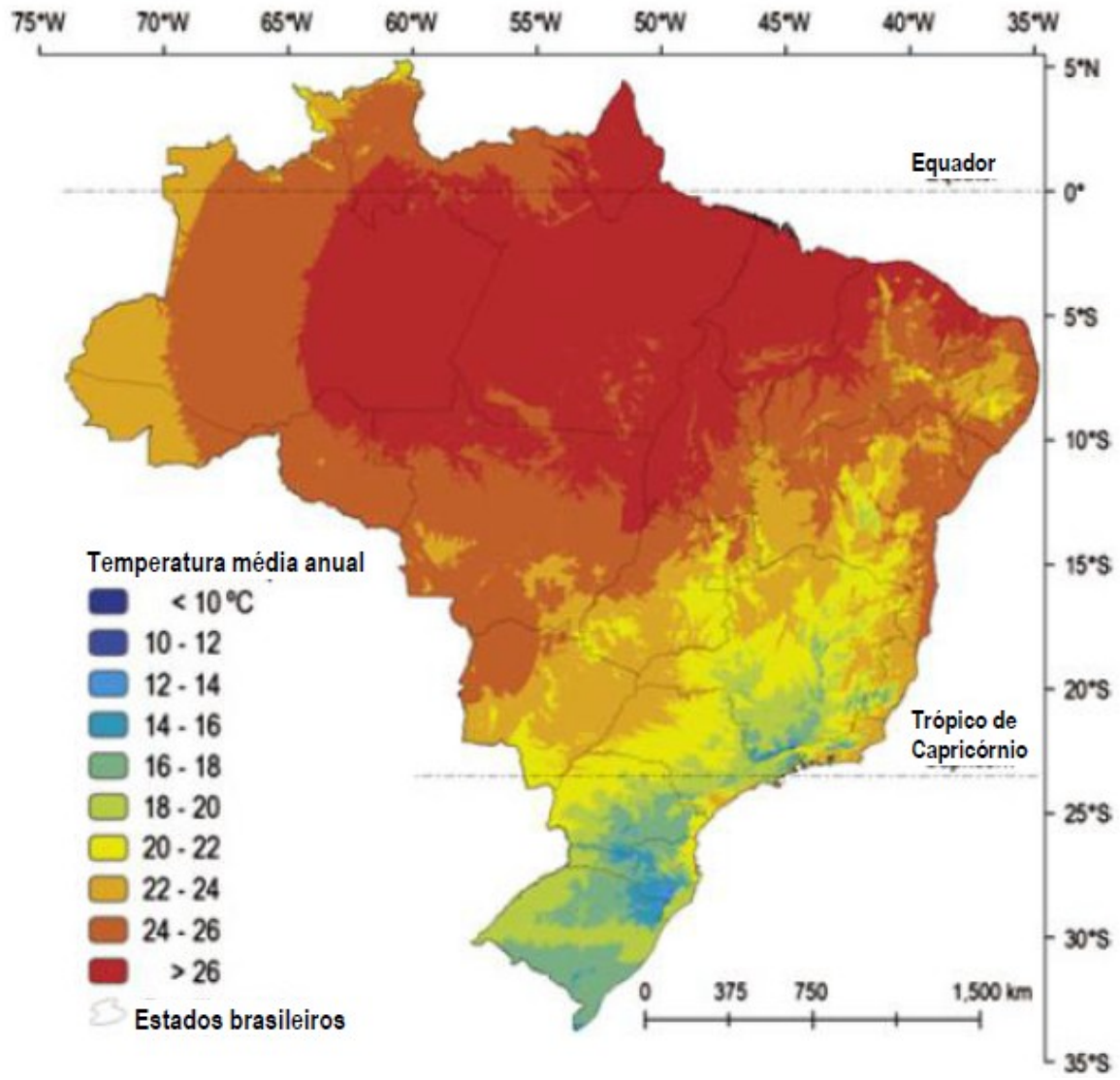
Fonte: Adaptado de Alvares (2014).

Figura 2-13 - Mapa do Brasil representando dados de pluviosidade.



Fonte: Adaptado de Alvares (2014).

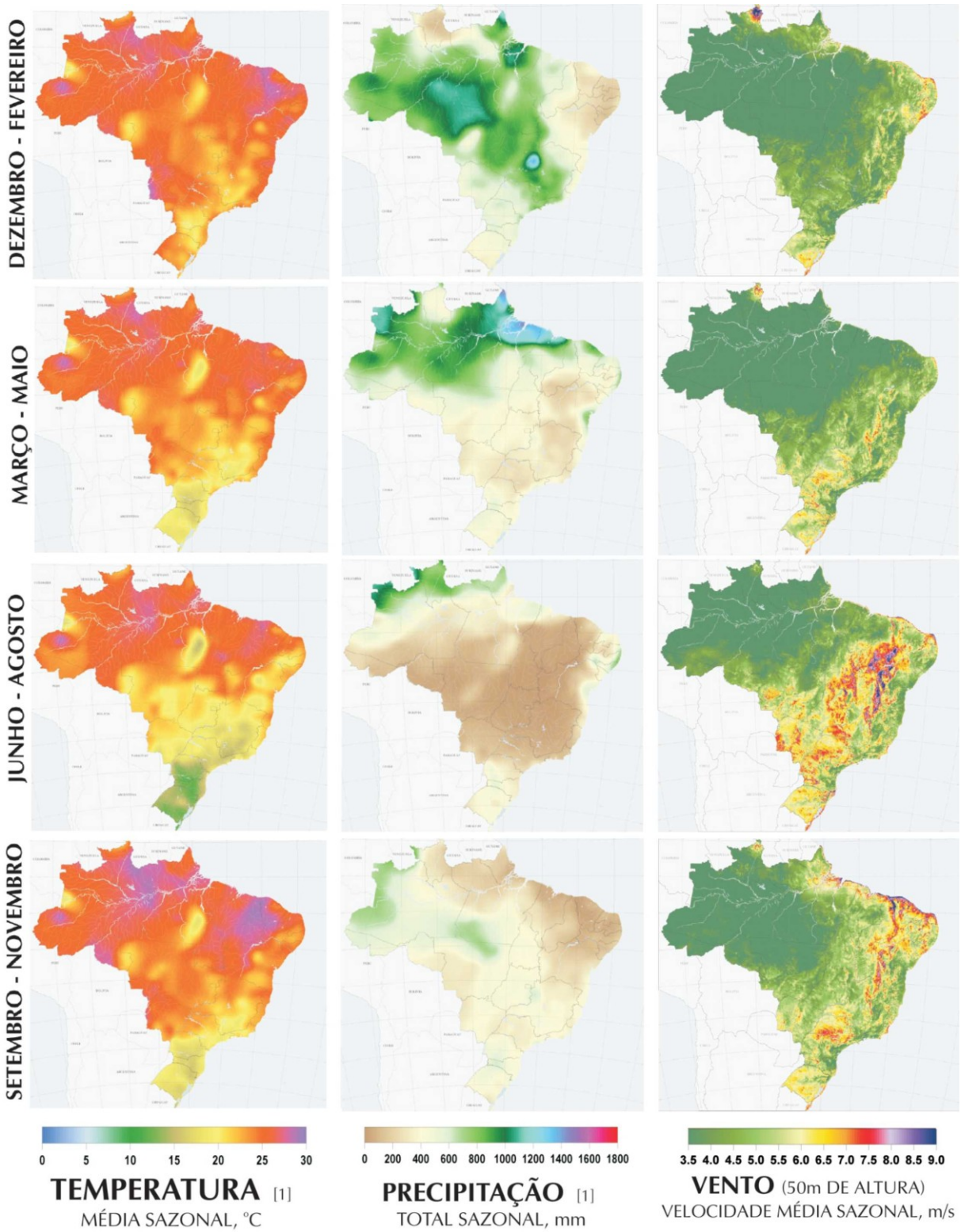
Figura 2-14 - Mapa do Brasil representando dados de temperatura.



Fonte: Adaptado de Alvares (2014).

O valor sazonal dessas variáveis climáticas pode diferir significativamente do valor anual. A Figura 2.15 mostra os valores de três variáveis em quatro estações do ano, no Brasil. O inverno seco e o verão úmido são mais comuns no país. As temperaturas mais elevadas (em torno de 30°C) são mais frequentes na primavera da porção superior da Região Norte e do Sertão Nordestino. As velocidades do vento são consideravelmente mais baixas na região amazônica (ao norte), o ano todo. As velocidades mais altas ocorrem ao longo do litoral (leste), até o extremo nordeste, aumentando no período de inverno e primavera, reduzindo-se no outono e verão.

Figura 2-15 - Médias climatológicas sazonais de temperatura, precipitação e velocidade de vento no Brasil.

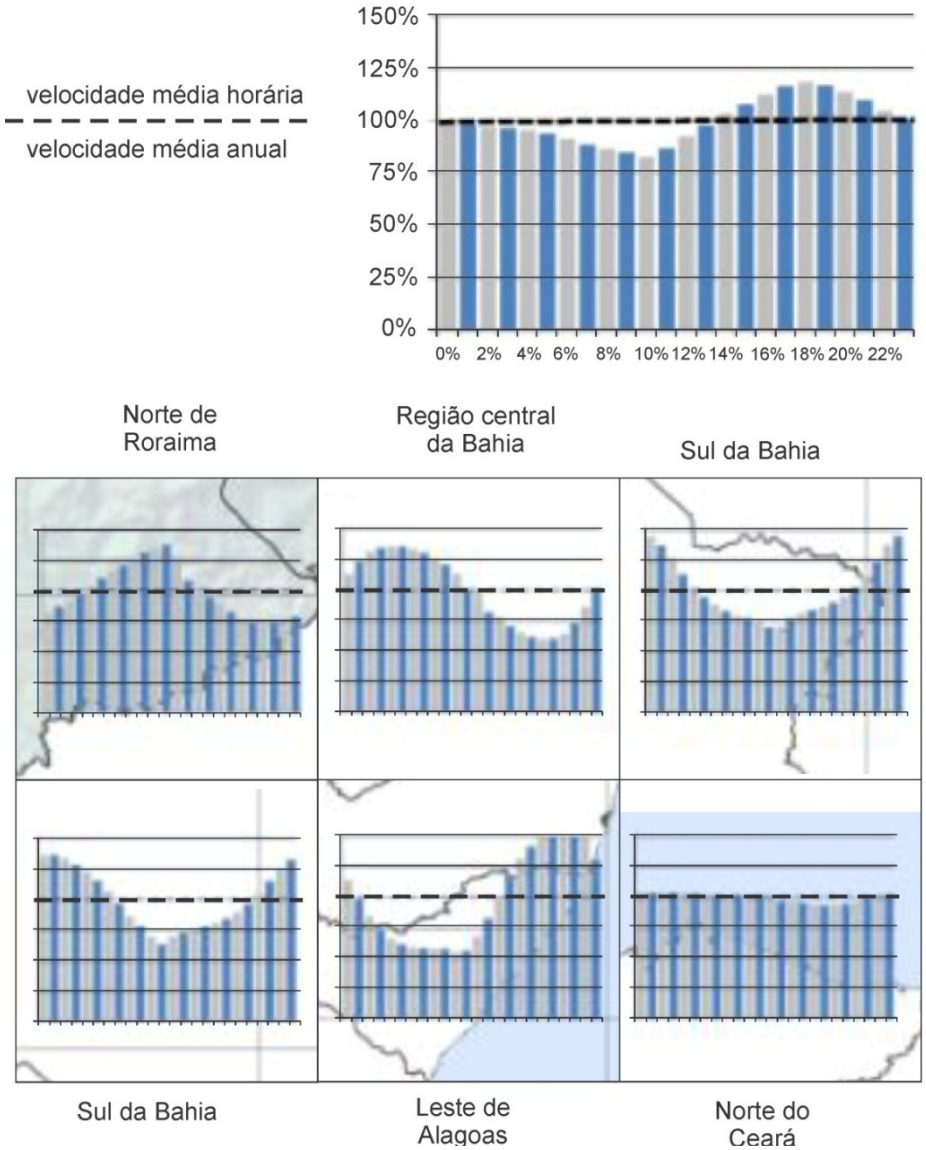


Fonte: Adaptado do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al, 2001).

As Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010 (INMET, 2019) contém médias mensais e anuais de velocidade do vento em 266 municípios, na altura de 10 m do solo. A

maior das médias anuais é de 5 m/s e a maior média mensal 6,2 m/s, sendo a média anual brasileira de 2,4 m/s. No entanto, as médias das Normais Climatológicas foram calculadas sem desconsiderar os períodos de calmaria (velocidades abaixo de 0,5m/s), o que provoca médias mais baixas. Além disso, a tarde é o período mais quente do dia e a madrugada é o período mais frio, mas as maiores velocidades do vento podem ocorrer em horários diversos. A Figura 2.16 mostra diferentes padrões de variação ao longo do dia, em diferentes pontos do Brasil. Alguns regimes diários são quase invertidos.

Figura 2-16 - Regimes diários de velocidade do vento em diferentes pontos do Brasil, velocidade média horária em razão da velocidade média anual.

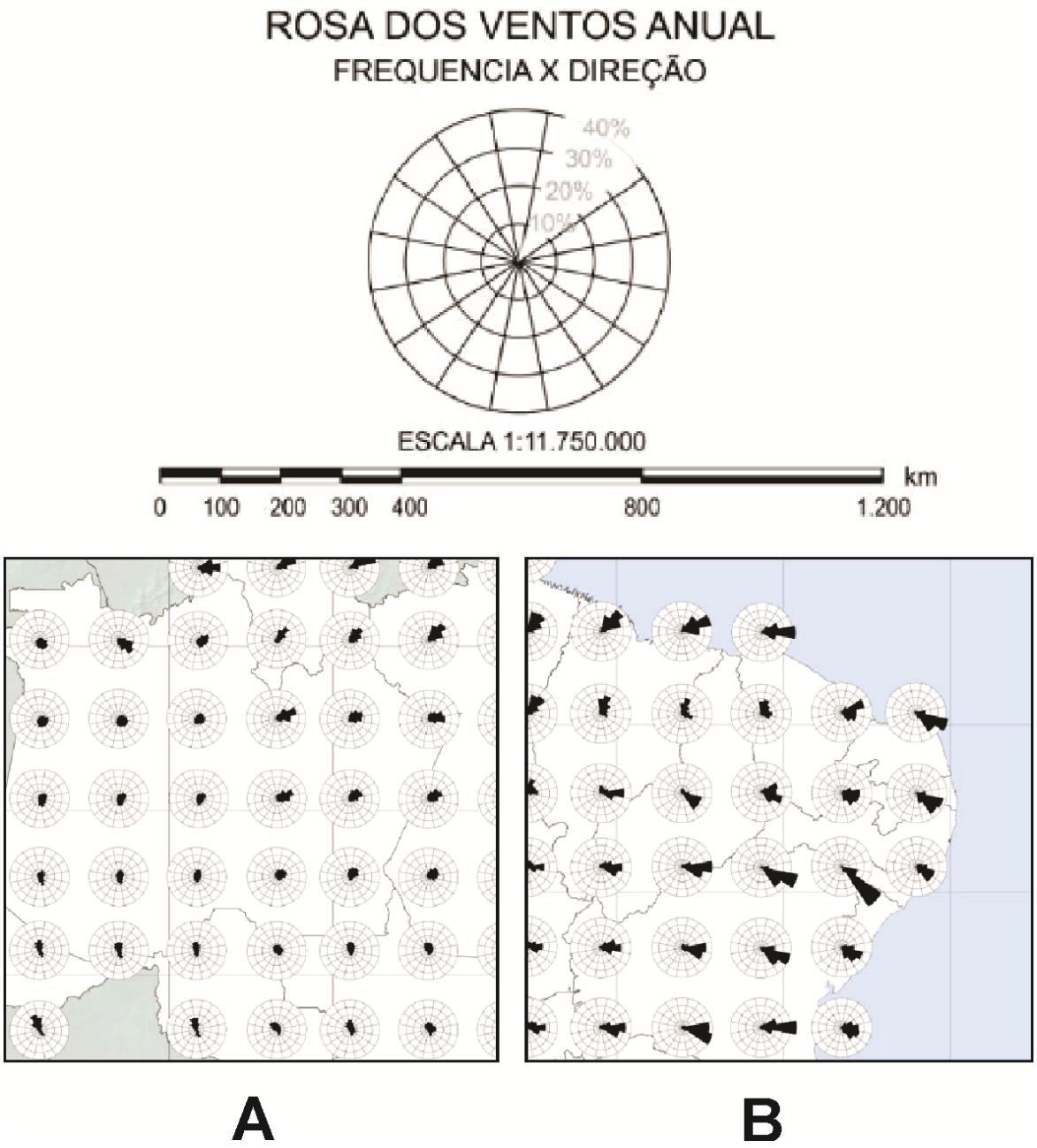


Fonte: Adaptado do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (NEIVA et al, 2017).

As direções do vento também podem variar significativamente. A Figura 2.17 mostra como é notória a predominância das direções do quadrante leste, em pontos do Nordeste

brasileiro que estão mais próximos ao litoral (B). Essa condição difere da apresentada em regiões no estado do Amazonas, onde, em vários pontos, é mais difícil distinguir o predomínio de uma direção (A).

Figura 2-17 - Dados de frequência por direção do vento em pontos da região Norte (A) e Nordeste (B) do Brasil.

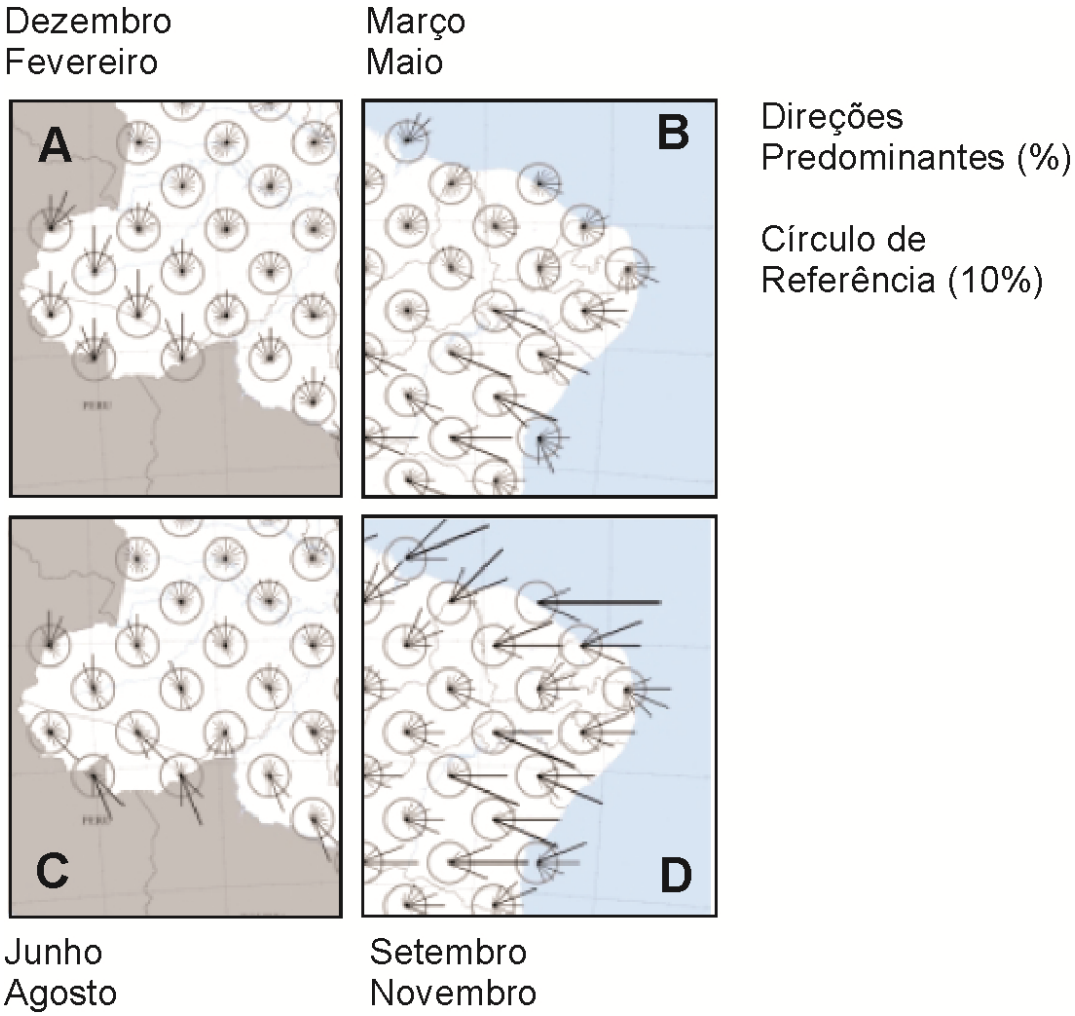


Fonte: Adaptado do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (NEIVA et al, 2017).

O predomínio de uma direção pode variar também sazonalmente. A Figura 2-18 mostra que há um forte predomínio das direções do quadrante leste nos meses de setembro a novembro, na parte mais ao norte da região Nordeste do Brasil (D). Mas este é bem menos

perceptível nos meses de março a maio (B). Na região sul do estado do Acre, há o predomínio das direções do quadrante norte, nos meses de dezembro a fevereiro (A), e das direções do quadrante sul, nos meses de junho a agosto (C).

Figura 2-18 - Direções predominantes em diferentes pontos do Brasil e para duas estações: norte da Nordeste (B e D) e sul do estado do Acre (A e B).



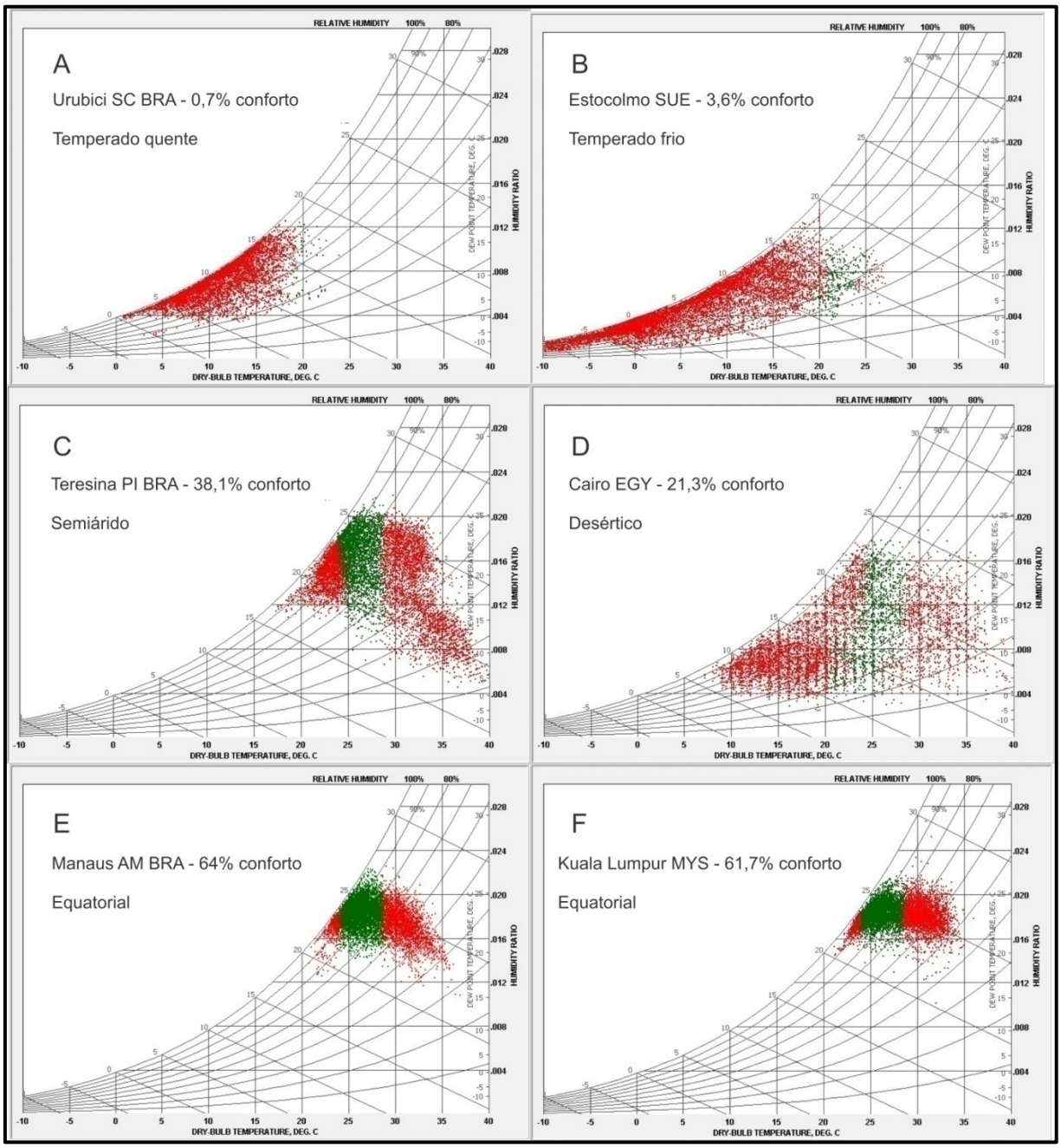
Fonte: Adaptado do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al, 2001).

2.2.1 Zoneamento climático brasileiro para conforto térmico

As variações do conforto térmico são determinadas pela interação entre variáveis climáticas e variáveis de conforto. O território brasileiro possui uma considerável diversidade climática. Condições extremas para o conforto térmico observadas no Brasil são comparáveis com pontos díspares do globo terrestre. A Figura 2.19 apresenta a frequência anual de conforto em três cidades estrangeiras (B, D, F) e três cidades brasileiras (A, C, E). Os dados de temperatura e umidade aparecem nos diagramas psicrométricos da figura e são destacados em vermelho e verde, indicando respectivamente desconforto e conforto, de acordo com a

zona de conforto adaptativo da norma norte-americana *ANSI/ASHRAE Standard 55* 2010 (LIGGETT; MILNE, 2008).

Figura 2-19 - Dados de temperatura, umidade e frequência anual de conforto no clima de cidades brasileiras e estrangeiras.



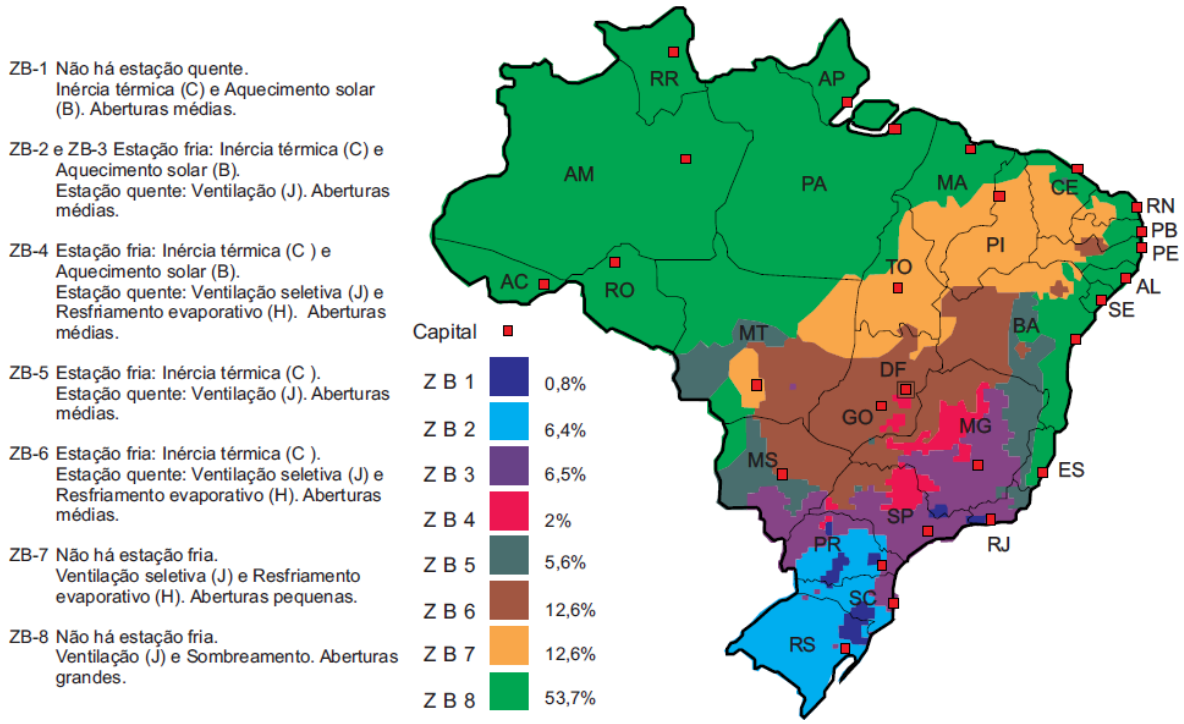
Fonte: Adaptado de Climate Consultant (LIGGETT; MILNE, 2008), com dados de temperatura e umidade de arquivos INMET 2018 (LABEEE, 2021) e EnergyPlus Weather (U.S.DOE, 2009).

Os gráficos “A” e “B” mostram que o município de Urubici-SC (28°S de latitude e 1810m de altitude), com clima temperado quente em altitude elevada da zona subtropical brasileira, apresenta aproximadamente cinco vezes menos conforto térmico que a cidade

sueca de Estocolmo (Latitude 59°N e 61m de altitude), que tem Clima Temperado Frio da região subártica. Os gráficos "C" e "D" mostram que o clima semiárido no município de Teresina-PI (5°S de latitude e 74m de altitude), situado no Sertão Brasileiro, apresenta condição quente e seca extrema, com temperaturas entre 35°C e 40°C e umidades relativas entre 10% e 30%. E isso ocorre mais frequentemente que no clima desértico da cidade egípcia do Cairo (Latitude 30°N e 74m de altitude). Os gráficos "E" e "F" mostram duas cidades de clima equatorial: a brasileira Manaus-AM (Latitude 3,1°S e 37m de altitude) e a cidade malaia de Kuala Lumpur (Latitude 3,1°N e 22m de altitude). É notável a similaridade entre elas quanto ao padrão anual de conforto, apesar dos contextos geográficos consideravelmente distintos.

O zoneamento da NBR 15220-3 dividiu o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas, que são regiões onde as estratégias passivas mais eficazes seriam as mesmas. A Figura 2.20 mostra o mapa das zonas, o percentual do território representado por cada uma delas e suas estratégias bioclimáticas mais relevantes.

Figura 2-20 - Mapa do Zoneamento Bioclimático Brasileiro e estratégias bioclimáticas prescritas.



Fonte: Adaptado de NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

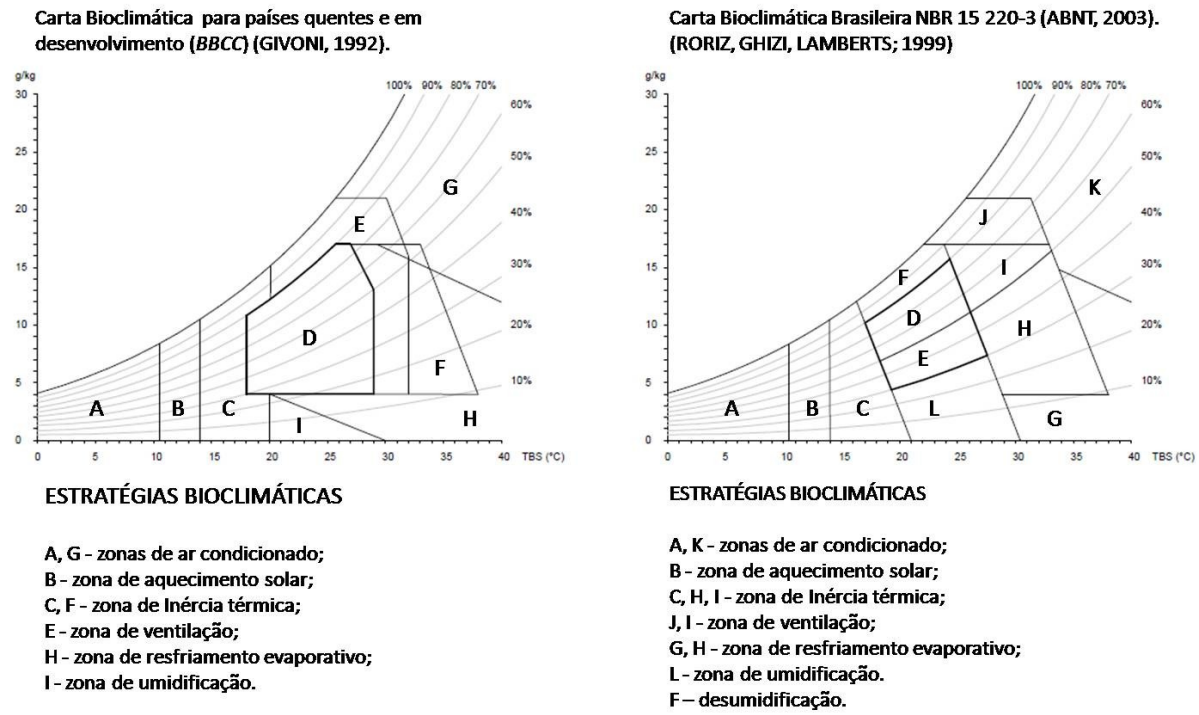
A norma NBR 15220-Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3-Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social (ABNT, 2005), representou um avanço significativo no debate nacional sobre o papel

dos edifícios para o crescimento da demanda por energia elétrica. Essa norma foi a primeira proposta de agrupamento climático para o Brasil, com a finalidade de definir diretrizes para adaptar o edifício ao clima. O mapa do zoneamento foi gerado pela divisão do território brasileiro em 6500 células. Havia normais climatológicas para 330 células (5%), sendo normais 1961/1990 para 206 municípios, normais 1931/1960 para 124 municípios. O restante das células precisou ter dados estimados por interpolação. Os dados dos municípios contidos na amostra foram representados na carta bioclimática por meio das médias mensais das máximas e mínimas de temperatura e umidade relativa do ar. Esse procedimento estabeleceu as cinco estratégias de maior relevância e, a partir delas, classificou os municípios em uma das oito zonas bioclimáticas adotadas (ABNT, 2005).

A carta de Givoni (1992) propunha zonas de conforto em função de estratégias bioclimáticas como ventilação, massa térmica e resfriamento evaporativo. Essas zonas foram propostas com base em estimativa das temperaturas internas, a partir das temperaturas externas. Essas estimativas consideravam um edifício hipotético, onde as referidas estratégias tivessem sido aplicadas eficazmente, embora não esclarecesse como alcançar tal eficácia, deixando isso a cargo da literatura especializada. No entanto, a carta bioclimática de Givoni não oferecia diretrizes construtivas, então a referência para a NBR 15220-3 foi o Método Mahoney (KOENIGSBERGER; MAHONEY; EVANS, 1970; RORIZ; GHISI; LAMBERTS, 1999; RORIZ, 2008). Este é um instrumento prescritivo para análise climática, desenvolvido na década de 70, a partir da experiência da equipe do Departamento de Estudos Tropicais da Associação de Arquitetura de Londres, sob a coordenação de Carl Mahoney (RORIZ, 2008).

A proposição da norma NBR15220-3 (RORIZ; GHISI; LAMBERTS, 1999) fez adaptações nas zonas bioclimáticas da carta de Givoni (1992) e as diretrizes construtivas do Método Mahoney (KOENIGSBERGER; MAHONEY; EVANS, 1970) ao contexto brasileiro, para corresponder à experiência da Comissão de Estudos sobre Desempenho Térmico e Eficiência Energética de Edificações (CE-02:135.07), vinculada ao Comitê Brasileiro de Construção Civil da ABNT (CB-02). A Figura 2-21 mostra a carta bioclimática original (GIVONI, 1992) e sua versão adaptada, que consta na norma brasileira NBR 15220-3. Essas zonas baseiam-se na estimativa das condições no interior do edifício, a partir de dados do clima e considerando um edifício ideal, onde a referida estratégia tenha sido aplicada de modo eficaz. A norma sugere que essa eficácia seria alcançada se as diretrizes construtivas para cada zona fossem obedecidas.

Figura 2-21 - Zonas Bioclimáticas da BBCC de Givoni e da NBR 15 220-3.



Fonte: Adaptado de Roriz, Ghisi, Lamberts (1999).

A zona de conforto mudou e foi dividida em conforto (E) e conforto com baixa umidade (D). Foi criada a zona de desumidificação/renovação do ar (F). Mudaram as zonas de umidificação (L), resfriamento evaporativo (G+H), massa para resfriamento (H+I), ventilação diurna e noturna (I+J), umidificação (G), resfriamento artificial (K) e massa para aquecimento (C). Apenas as zonas de aquecimento artificial (A) e aquecimento solar (B) permaneceram as mesmas (ABNT, 2005).

Segundo o zoneamento brasileiro, os climas da Zona Bioclimática Um não apresentam estação quente, essa zona representa 1% do território nacional. A cidade de Urubici-SC está situada nessa zona. Os climas da Zona Bioclimática Sete e da Zona Bioclimática Oito não apresentam estação fria e representam uma região quente que abrange 66% do país. As cidades de Manaus-AM e Teresina-PI estão situadas respectivamente nessas zonas. As demais zonas apresentam uma estação quente e uma fria, com uma área combinada que representa 33% do território.

Há uma tendência mundial crescente de basear zoneamento em dados de desempenho simulado, em vez de dados climáticos (WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2017), como ocorre com o zoneamento brasileiro atual. Alguns estudos vêm demonstrando inconsistências

geradas pelo método de classificação da NBR 15220-3. Pereira e Assis (2005) classificaram a cidade de Belo Horizonte-MG seguindo essa norma, mas usando um ano climático selecionado entre dados de nove anos de uma estação meteorológica padrão. O resultado colocou a cidade na Zona Bioclimática Quatro, a mesma que Brasília-DF. Em vez da Zona Bioclimática Três, a mesma que Florianópolis-SC, como consta na norma. Os pesquisadores julgaram o resultado mais acertado, pois percebiam mais similaridades entre o clima da capital mineira e o da capital do Distrito Federal. Rocha, Assis e Gonçalves (2009) usaram o Método Mahoney para propor um zoneamento bioclimático do estado de Minas Gerais e chegaram a um zoneamento de apenas quatro zonas, em vez das seis zonas definidas pela NBR 15220-3. Isso ocorreu a despeito do fato de o Método Mahoney ter servido também de base para a norma brasileira. Martins, Bittencourt e Krause (2012) demonstraram que, de acordo com a norma, a cidade de Pão de Açúcar-AL seria classificada na Zona Bioclimática Oito se fossem usados apenas dados do período úmido do ano. Mas que a mesma cidade seria classificada na Zona Bioclimática Sete se apenas dados do período seco fossem usados. Resultado similar foi também observado para a cidade Mata Grande-AL, por Correia e Barbirato (2013). No entanto, as prescrições para Zona Bioclimática Oito e Zona Bioclimática Sete não preveem duas estações distintas nesses municípios.

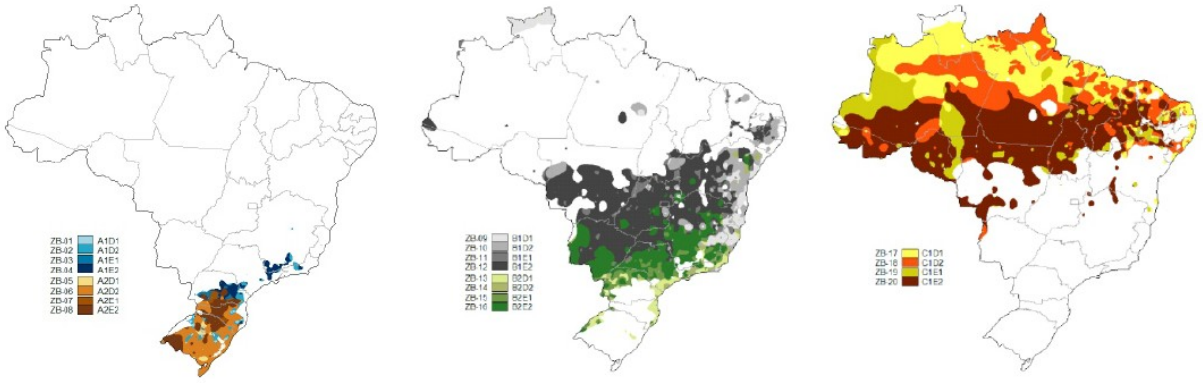
O zoneamento bioclimático da NBR15220-3 permanece como o principal instrumento no Brasil para orientar a adaptação do edifício ao clima. Ainda assim, há sugestões de revisão feitas frequentemente por pesquisadores brasileiros (BASTOS; BARROSO-KRAUSE; BECK, 2007; FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2014; BOGO, 2016). As críticas convergem para a capacidade de distinção entre climas no método de classificação e também para os requisitos de envoltória, sombreamento e ventilação. Ainda assim, a ausência de requisitos para ventilação e qualidade do ar não tem sido criticada.

2.2.2 Propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro

Roriz (2012a; 2012b) propôs dois zoneamentos climáticos alternativos para o Brasil, para apreciação do Grupo de Discussão da ANTAC, a fim de aperfeiçoar o zoneamento da NBR 15220-3. A primeira das propostas de Roriz (2012a) usou dados de 610 estações no território nacional (9% do território) e interpolação para o restante. Essa proposta classificou os climas em 20 grupos, com base em valores médios de temperatura do ar e amplitude térmica. A Figura 2.22 mostra os mapas desse zoneamento e os critérios de classificação. O território brasileiro ficou dividido em uma região mais fria ao sul (de Z1 a Z8), uma região

intermediária na porção central (de Z9 a Z16) e uma região mais quente ao norte (de Z17 a Z20).

Figura 2-22 - Primeira proposta de classificação climática do Brasil. Mapa das Zonas de 1 a 8, Mapa das zonas de 9 a 16, Mapa das zonas de 17 a 20.

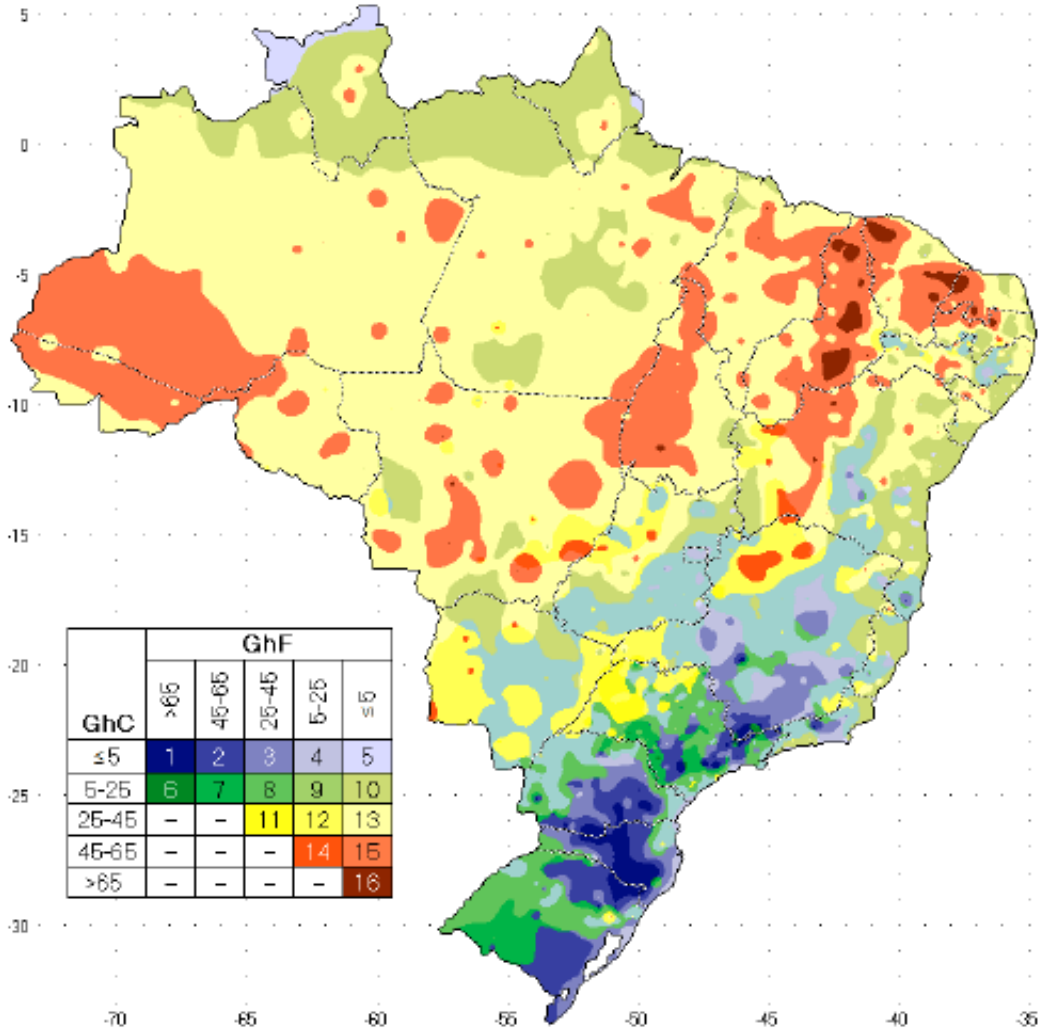


			T med Ano <= 20		20 < T med Ano <= 26		T med Ano > 26
			dT <= 8.4	dT > 8.4	dT <= 5.4	dT > 5.4	
			A1	A2	B1	B2	C1
A med Ano <= 10	dA <= 2.3	D1	Z1	Z5			
	dA > 2.3	D2	Z2	Z6			
A med Ano > 10	dA <= 2.3	E1	Z3	Z7			
	dA > 2.3	E2	Z4	Z8			
A med Ano <= 10	dA <= 3.6	D1			Z9	Z13	
	dA > 3.6	D2			Z10	Z14	
A med Ano > 10	dA <= 3.6	E1			Z11	Z15	
	dA > 3.6	E2			Z12	Z16	
A med Ano <= 10	dA <= 4.2	D1					Z17
	dA > 4.2	D2					Z18
A med Ano > 10	dA <= 4.2	E1					Z19
	dA > 4.2	E2					Z20

Fonte: Adaptado de Roriz (2012a).

A segunda proposta de Roriz (2012b) reuniu dados para 1265 pontos do território brasileiro (19% do território) e usou dados de satélite da Agência Espacial Norte-Americana (*NASA*) para o restante do território. Essa proposta classificou os climas em 16 zonas, com base em intervalos de graus-hora de calor e frio, usando a zona de conforto contida na carta bioclimática NBR 15220-3 (ABNT, 2005). A Figura 2-23 mostra o mapa desse zoneamento e os critérios de classificação. A maior área com o maior valor em graus-hora de calor ocorreu na porção norte do Sertão Nordestino, predominantemente nos estados do Piauí e Ceará. A maior área com mais graus-hora de frio ocorreu nas regiões de maior altitude, nos estados de Santa Catarina e entre os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. O referencial para a determinação de graus-hora de desconforto foi a zona de conforto contida na carta bioclimática da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Figura 2-23 - Segunda proposta de classificação climática do Brasil, a partir de dados de desconforto térmico.



Fonte: Roriz (2012b).

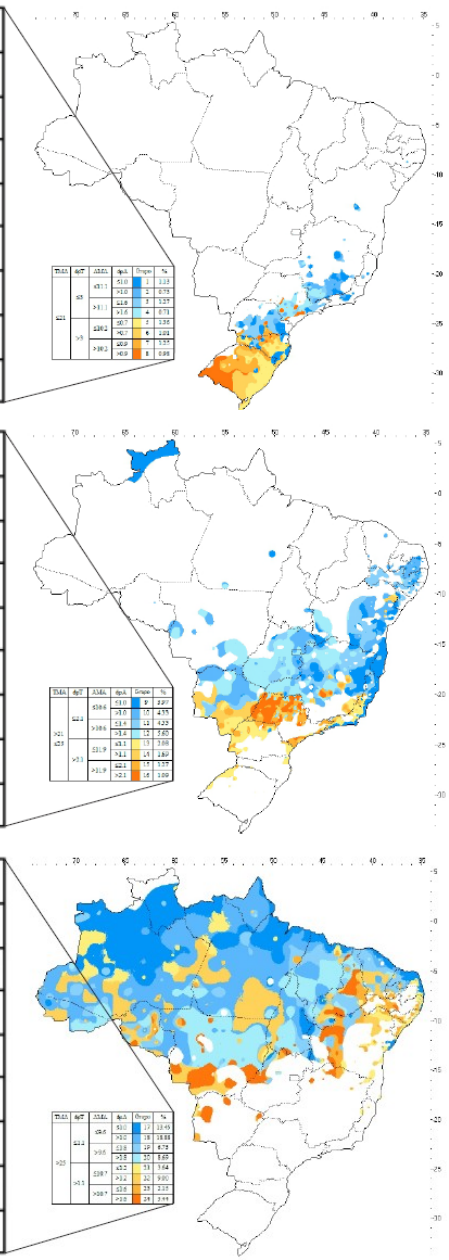
A terceira proposta de zoneamento climático do Brasil elaborada por Roriz (2014) conseguiu reunir um amostra de dados climáticos para 5564 municípios brasileiros, contando com dados de satélite da Agência Espacial Norte-Americana (*NASA*) para 1067 pontos no território brasileiro. Esses climas foram classificados em 24 grupos, por média anual de temperatura (TMA), média anual das amplitudes mensais (AMA), desvio padrão de temperatura média anual (dpT) e desvio padrão da média anual de amplitudes mensais (dpA). A Figura mostra os critérios de classificação e o mapa desse agrupamento climático.

Figura 2-24 - Terceira proposta de classificação climática do Brasil. Mapeamento dos grupos climáticos de G1 a G8 (acima), de G9 a G16 (ao centro) e de G17 a G24 (abaixo).

TMA	dpT	AMA	dpA	Grupo	%
≤21	≤3	≤11.1	≤1.0	1	1.13
			>1.0	2	0.73
		>11.1	≤1.6	3	1.27
			>1.6	4	0.71
	>3	≤10.2	≤0.7	5	1.36
			>0.7	6	1.01
		>10.2	≤0.9	7	1.25
			>0.9	8	0.98

TMA	dpT	AMA	dpA	Grupo	%
>21 ≤25	≤2.1	≤10.6	≤1.0	9	3.97
			>1.0	10	4.33
		>10.6	≤1.4	11	4.55
			>1.4	12	5.60
	>2.1	≤11.9	≤1.1	13	2.08
			>1.1	14	1.69
		>11.9	≤2.1	15	1.27
			>2.1	16	1.09

TMA	dpT	AMA	dpA	Grupo	%
>25	≤1.1	≤9.6	≤1.0	17	13.45
			>1.0	18	18.88
		>9.6	≤1.8	19	6.73
			>1.8	20	8.69
	>1.1	≤10.7	≤1.2	21	3.64
			>1.2	22	9.00
		>10.7	≤1.6	23	2.15
			>1.6	24	3.44



Fonte: Roriz (2014).

Os mapas da figura mostram que os grupos climáticos de 1 a 8 se concentram na região Sul e em parte da região Sudeste do Brasil. Os grupos climáticos de 9 a 16 se concentram em parte da região Nordeste, porção mais ao sul da região Centro-Oeste, porção oeste e litorânea da região Sudeste, além do extremo norte do estado de Roraima. Os grupos de 17 a 24 concentram na região Norte, porção norte da região Centro-Oeste, porção oeste e litorânea da região Nordeste do Brasil. O zoneamento climático por essa terceira proposta pode se diferenciar consideravelmente do atual zoneamento, uma vez que ela foi dotada de

maior sensibilidade para fazer distinções entre climas, como demonstrado por Amorim e Carlo (2017). Essa terceira proposta de grupos climáticos (RORIZ, 2014) foi selecionada pelo CB3E, a fim de substituir as oito zonas bioclimáticas da NBR 15220-3 no RTQ-R e RTQ-C. Mas foi acrescentada a proposta de subdivisão do Grupo 1 em "1a" e "1b", considerando as diferenças entre alguns climas neste grupo (BAVARESCO et al, 2017). O arquivo disponibilizado no sítio do Programa Brasileiro de Etiquetagem PBE Edifica, para instrução normativa Inmetro INI-C, aprovada pela Portaria N° 42 (INMETRO, 2020), contém 5.564 municípios classificados nos grupos climáticos de Roriz (2014), adotando a distinção proposta pelo CB3E (BAVARESCO et al, 2017) entre grupo G1a e G1b. Segundo esses dados, os municípios do grupo G1a têm temperatura média anual a partir de 12°C, enquanto os do grupo G1b têm temperatura média anual a partir de 14°C.

A diversidade climática do território brasileiro e o zoneamento bioclimático da NBR 15220-3 (ABNT, 2005) têm sido foco de questionamentos e críticas. As três propostas de zoneamento climático de Roriz representam bem a evolução da disponibilidade de dados climáticos para o Brasil e a busca por melhores critérios de classificação climática. O objetivo das propostas de Roriz (2012a; 2012b; 2014) limitou-se a estabelecer critérios para o mapeamento dos climas no Brasil. Estava previsto para etapa posterior identificar as diretrizes construtivas a serem prescritas para diferentes tipologias em cada grupo climático. Assim, o estudo lograria a revisão completa do atual zoneamento bioclimático brasileiro, mas esse objetivo ainda não foi alcançado. Assim, as estratégias prescritas pela NBR15220-3 permanecem como a principal referência normativa para adaptação do edifício ao clima no Brasil. Há uma tendência de basear zoneamento em dados de desempenho simulado, em vez de dados climáticos (WALSH; CÓSTOLA; LABAKI, 2017). Mas não foram identificados estudos que tenham realizado o mapeamento do desempenho mais eficaz de tipologias, na escala do território brasileiro e com base em dados de simulação.

2.3 Diretrizes construtivas para conforto em HIS no Brasil

O uso de ar condicionado é visto pela população como melhoria da qualidade de vida, por causa do frequente desconforto térmico nos edifícios. Esse desconforto é especialmente frequente em HIS, pela tendência à padronização e à priorização do baixo custo de produção das unidades (ALMEIDA et al, 2013; SILVA; PAULA; BARBIRATO, 2013; ZAMBONATO et al, 2020; LIMA; PACHECO, 2020). Triana, Lamberts e Sassi (2015) constataram a partir da análise do censo IBGE 2010 que unidades unifamiliares autônomas

representavam 85% das moradias urbanas particulares no Brasil. Uma parcela de 49,2% dessas moradias pertencia à população com renda familiar de até três salários mínimos. A envoltória dessas moradias alcançou classe de eficiência energética “D” e “E”, nas zonas ZB3 e ZB8, respectivamente e considerando a escala do RTQ-R. Em 2005, o condicionamento ambiental artificial já era responsável por 20% do consumo de eletricidade em residências brasileiras, ficando pouco abaixo do consumo com chuveiro elétrico e refrigerador. Na região Norte, ele representava 40% do consumo das residências (ELETROBRAS, 2007). Entre o ano de 2005 e 2018, a posse de condicionadores de ar em residências no Brasil aumentou 6,2 pontos percentuais e passou a estar presente em 16,7% das residências (ELETROBRAS, 2019), ocorrendo em 5,2% das moradias de famílias com renda de até quatro salários mínimos e em 60,2% das moradias de famílias com renda acima de 20 salários mínimos. De acordo com o Balanço Energético Nacional (MME; EPE, 2019), o consumo final de eletricidade no Brasil no ano de 2018 registrou aumento de 1,4%, seguindo a tendência de aumento dos últimos anos. Residências consumiram 25,4% da eletricidade nesse mesmo ano, pouco mais que o setor comercial e público, juntos. O aumento do consumo no setor residencial em relação ao ano anterior foi de 1,3%, superando o aumento no setor industrial e comercial.

A expansão acentuada do consumo de energia tende a esgotar os recursos naturais usados em sua produção e a gerar outros impactos ambientais. Diferentes instituições brasileiras tem promovido o consumo eficiente de energia, com o objetivo de conter o crescimento da demanda, sem comprometer o crescimento econômico do país e a qualidade de vida da população. A criação de normas e regulamentos para orientar a produção dos edifícios residenciais está entre as ações mais relevantes nos últimos 20 anos. A publicação da norma NBR 15220-Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005), a publicação do Regulamento Técnico para a Qualidade do Nível de Eficiência Energética das Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012) e a publicação da norma NBR 15575-Edificações Habitacionais-Desempenho (ABNT, 2013), formaram um processo contínuo de aperfeiçoamento de instrumentos que buscam induzir a elevação do desempenho térmico das moradias no país.

Como visto na seção 2.2.1, a NBR 15220-3, Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social (ABNT, 2005) dividiu o território brasileiro em oito zonas e definiu estratégias bioclimáticas mais relevantes em cada uma delas. Segundo o zoneamento, os climas da Zona Bioclimática Um não apresentam estação quente, os climas Zona Bioclimática Sete e da Zona Bioclimática Oito

não apresentam estação fria. As demais zonas apresentam um período quente e um frio. O sombreamento e a ventilação permanente são estratégias recomendadas para todo o ano na Zona Bioclimática Oito e no período quente das zonas Dois, Três e Cinco. O sombreamento, a ventilação seletiva, a inércia térmica (das paredes externas) e o resfriamento evaporativo são as estratégias para o ano todo na Zona Bioclimática Sete e para a estação quente nas zonas Quatro e Seis. Aquecimento solar e inércia térmica (das paredes internas) são as estratégias prescritas para todo o ano na Zona Bioclimática Um e no período frio das zonas Dois, Três e Quatro. A recomendação é de apenas inércia térmica (das paredes externas) no período frio das zonas Cinco e Seis (ABNT, 2005). A estratégia aquecimento solar refere-se à orientação das superfícies envidraçadas e às cores externas da envoltória. A inércia térmica para resfriamento e/ou aquecimento está relacionada respectivamente ao atraso térmico pelas vedações externas e à massa térmica das vedações internas. O resfriamento evaporativo trata de sistemas que promovam evaporação direta de água, combinados com taxas de ventilação baixas. A estratégia de ventilação permanente envolve sistema de ventilação cruzada para incrementar o resfriamento fisiológico dos ocupantes e as perdas por convecção do recinto. Esta pode ainda ser seletiva, limitando-se aos momentos em que a temperatura externa é inferior à interna. A norma ainda considera as necessidades de umidificação, aquecimento e resfriamento artificial do ar (ABNT, 2005).

2.3.1 Diretrizes construtivas da norma NBR 15220-3

A norma 15220-3 (ABNT, 2005) definiu diretrizes construtivas, para promover a maior eficácia das estratégias recomendadas em cada zona. As diretrizes da NBR 15220-3 oferecem requisitos para envoltória e prescrições para operação das aberturas. Os requisitos são expressos por transmitância térmica, fator solar e atraso térmico, de paredes e cobertura, e por intervalos de área de abertura para ventilação. As prescrições informam quando sombrear as aberturas e quando permitir a ventilação por elas. Não há requisitos sobre ventilação e qualidade do ar, nos períodos em que a ventilação deve ser suspensa. Também não há requisitos específicos sobre área de superfícies transparentes, para aquecimento solar. A análise dos dados do clima não avalia velocidades e direções do vento, não havendo requisitos relacionados a esses dados. A Tabela 2-4 apresenta o valor dos requisitos para os três tipos de parede e cobertura, e para os três tamanhos de área de abertura.

Tabela 2-3 - Requisitos para envoltória e prescrições para operação de aberturas na NBR 15220-3.

PAREDES EXTERNAS				
ZB	**Tipo**	**Transmitância (W/m²K)**	**Fator Solar (%)**	**Atraso Térmico (horas)**
1 e 2	**Leve**	≤ 3	≤ 5	≤ 4,3
3, 5 e 8	**Leve e refletora**	≤ 3,6	≤ 4	≤ 4,3
4, 6 e 7	**Pesada**	≤ 2,2	≤ 3,5	≥ 6,5
COBERTURAS				
ZB	**Tipo**	**Transmitância (W/m²K)**	**Fator Solar (%)**	**Atraso Térmico (horas)**
1 a 6	**Leve e isolada**	≤ 2	≤ 6,5	≤ 3,3
8	**Leve e refletora**	≤ 2,3*	≤ 6,5	≤ 3,3
7	**Pesada**	≤ 2	≤ 6,5	≥6,5
*FT: Fator de correção que admite transmitâncias mais altas em coberturas com ático ventilado (ABNT, 1998).				
ÁREA DE ABERTURA E OPERAÇÃO				
ZB	**Tipo**	**Área (% A.U.*)**	**Sombreamento**	**Ventilação**
1	**Média**	De 15% a 25%	Nunca	Nenhuma
2 e 3			Apenas no verão	Permanente no verão
4			Apenas no verão	Seletiva no verão
5			Sempre	Permanente no verão
6			Sempre	Seletiva no verão
7	**Pequena**	De 10% a 15%	Sempre	Seletiva
8	**Grande**	≥ 40%	Sempre	Permanente

* % A.U. Percentual da área útil do recinto.

Fonte: Adaptado de NBR15220-3 (ABNT, 2005).

Triana, Lamberts e Sassi (2015) reuniram dados referentes a 68 projetos de HIS, concluídos entre 2012 e 2014, em diferentes regiões do Brasil. Os dados mostraram que a maior parte dos empreendimentos (35%) eram moradias unifamiliares autônomas, com dois dormitórios e área construída variando entre 38m² a 55m². A envoltória mais comum nos empreendimentos era feita com paredes de bloco cerâmico rebocado e cobertura em telha cerâmica com forro de madeira. A área de abertura na zona social dos empreendimentos variava entre 12% e 29% da área útil. Nos dormitórios, variava entre 12% e 19%. Esses valores não atendem ao requisito para ZB8, quanto à área de abertura para ventilação, que deve ser maior que 40% da área útil. De acordo com o zoneamento da NBR 15220-3 (ABNT, 2005), parede e cobertura "pesada" devem ter atraso térmico igual ou maior que 6,5 horas. Os sistemas construtivos apresentados no Anexo D da NBR 15220-3 mostram que esse requisito só é atendido por paredes de alvenaria dupla e cobertura em laje maciça de concreto com 20 cm de espessura. Estes são sistemas pouco frequentes em HIS no Brasil, devido ao seu custo mais elevado.

2.3.2 Diretrizes para ventilação natural na norma NBR 15220-3

Há dois efeitos positivos da ventilação natural. O primeiro é a extração de ar quente interno, substituindo-o por ar externo, menos quente, elevando assim as perdas por convecção

no recinto e aproximando as temperaturas internas e externas. O segundo efeito é o resfriamento fisiológico dos ocupantes, que depende menos do volume e mais da velocidade do fluxo (LAMBERTS et al, 2016). Ambos se beneficiam do sistema de ventilação cruzada, onde o ar é impulsionado por diferenças nos coeficientes de pressão entre fachadas. Maior área de abertura tende a elevar as velocidades médias do ar e o número de renovações. Isso amplia o resfriamento fisiológico dos ocupantes e restringe o amortecimento provocado pela envoltória. Inversamente, área de abertura menor tende a reduzir a ventilação ao nível higiênico, reduzindo o número de renovações e a velocidade média do ar. Isso tende a intensificar o amortecimento térmico provocado pela envoltória e a contribuição do resfriamento evaporativo, mas restringe o resfriamento fisiológico. A recomendação de uma envoltória completamente leve e sem isolamento ocorre apenas para a Zona Bioclimática Oito. A recomendação de ventilação permanente e de área de abertura "grande" ocorre apenas nela também. Isso acontece provavelmente devido à prioridade dada ao resfriamento fisiológico e às perdas de calor por convecção, para o conforto no edifício. Uma envoltória inteiramente "pesada" é recomendada apenas para a Zona Bioclimática Sete, que também é a única zona onde há recomendação de área de abertura "pequena" e ventilação seletiva contínua. Isso ocorre provavelmente pela relevância atribuída à inércia térmica para resfriamento e ao resfriamento evaporativo direto.

A ventilação natural tem ainda a função higiênica de manter uma vazão mínima que garanta qualidade aceitável do ar interno (LAMBERTS et al, 2016). Os instrumentos normativos brasileiros não têm requisitos de qualidade do ar interno em edifícios residenciais ventilados naturalmente. A NBR 15220-3 não tem diretrizes para dimensionamento e operação de aberturas voltadas à manutenção da qualidade do ar interno, apesar de recomendar a suspensão da ventilação natural dos ambientes de seis a 12 meses por ano, nas zonas de Um a Seis. Apenas a Zona Oito tem recomendação de ventilação permanente, já que a ventilação seletiva recomendada para a Zona Sete exclui a ventilação em momentos de temperatura externa desfavorável. Como visto na seção 2.1.5, a norma norte-americana *ANSI/ASHRAE Standard* 62-2-*Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residencial Buildings* (ANSI; ASHRAE, 2016) recomenda vazões mínimas em espaços residenciais, em função da área dos recintos e do número de dormitórios da moradia. Segundo essa norma, cada espaço de permanência prolongada da unidade habitacional deve ter aberturas de ventilação voltadas ao exterior, com área efetiva de ventilação equivalendo a no mínimo 4% da área útil do recinto, não sendo menor que 0,5 m². Banheiros e áreas de serviço poderiam ter

aberturas de pelo menos 0,15 m². A área de abertura mínima para ventilação entre recintos (aberturas internas) deve ter ao menos 8% da área útil. No entanto, essa norma não diz como essa área de abertura deve ser distribuída nas fachadas. O número médio de renovações pode ser incrementado se a área de abertura for distribuída em fachadas com diferente orientação, para ventilação cruzada.

2.3.3 Diretrizes construtivas no RTQ-R

No ano de 2012, houve a publicação do Regulamento Técnico para a Qualidade do Nível de Eficiência Energética das Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012). Ele apresentava em seu método prescritivo requisitos para o desempenho térmico da envoltória, a fim de classificar o nível de eficiência energética de edifícios residenciais. Essa classificação se dá por meio de cinco níveis, variando de "A" a "E". Os requisitos de envoltória diferiam das diretrizes da NBR 15220-3, mas ainda se referenciavam em seu zoneamento. O desempenho era determinado segundo estimativa de graus-hora de desconforto, para cada zona bioclimática. Esses requisitos eram expressos em valores de transmitância, absortância, capacidade térmica e área mínima de abertura. O intervalo de valores requeridos eram os mesmos para todas as zonas e diferenciam-se apenas em função da absortância da face externa de paredes e cobertura. O regulamento estipulava três limites mínimos de área de abertura para ventilação e estes estavam abaixo dos intervalos contidos na NBR15220-3. Ainda assim, maiores áreas de abertura permaneciam recomendadas para Zona Bioclimática Oito e menores para a Zona Bioclimática Sete, demonstrando a referência às estratégias do zoneamento vigente. O sombreamento não tinha requisitos, mas sua aplicação era pontuada positivamente no cálculo do equivalente numérico da envoltória. As recomendações de controle da ventilação limitavam-se a determinar o fechamento das aberturas, quando a temperatura interna estivesse abaixo de 20°C. O regulamento estipulou uma área mínima efetiva para iluminação natural de 12,5% da área útil do recinto, até o limite de 15 m². Também atribuiu bonificação para unidades habitacionais autônomas onde haja aberturas equivalendo a 20% de pelo menos duas fachadas, com orientação distinta (ventilação cruzada), venezianas e peitoril ventilado, porosidade nos fechamentos internos e presença de ventiladores de teto. A Tabela 2-4 apresenta uma síntese dos requisitos do RTQ-R para envoltória e operação de aberturas. Esses requisitos devem ser aplicados apenas nos recintos considerados de "permanência prolongada" (salas e dormitórios).

Tabela 2-4 - Requisitos para envoltória e prescrições para operação de aberturas no RTQ-R.

PAREDES EXTERNAS				
ZB	**Tipo**	**Transmitância (W/m²K)**	**Absortância Solar**	**Capacidade Térmica (kJ/m²K)**
1 e 2	-	≤ 2,5	-	≥ 130
3 a 6	-	≤ 3,7	≤ 0,6	≥ 130
	-	≤ 2,5	> 0,6	≥ 130
7	-	≤ 3,7	≤ 0,6	≥ 130
	-	≤ 2,5	> 0,6	≥ 130
8	-	≤ 3,7	≤ 0,4	≥ 130
	-	≤ 2,5	> 0,4	≥ 130
COBERTURAS				
ZB	**Tipo**	**Transmitância (W/m²K)**	**Absortância Solar**	**Capacidade Térmica (kJ/m²K)**
1 e 2	-	≤ 2,3	-	-
3 a 6	-	≤ 2,3	≤ 0,6	-
	-	≤ 1,5	> 0,6	-
7	-	≤ 2,3	≤ 0,4	-
	-	≤ 1,5	> 0,4	-
8	-	≤ 2,3*	≤ 0,4	-
	-	≤ 1,5*	> 0,4	-
*FT: Fator de correção que admite transmitâncias mais altas em coberturas com ático ventilado (ABNT, 1998).				
ÁREA DE ABERTURA E OPERAÇÃO				
ZB	**Tipo**	**Área (% A.U.**)**	**Sombreamento**	**Ventilação**
1 a 6	**Média**	≥ 8%	-	Nenhuma no período frio (TBS < 20°C)
7	**Pequena**	≥ 5%	-	
8	**Grande**	≥ 10%	-	
** % A.U. Percentual da área útil do recinto, até o limite de 15m².				

Fonte: Adaptado de RTQ-R (INMETRO, 2012).

O Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações propôs a instrução normativa (CB3E, 2020) para melhorar o indicador de desempenho energético do RTQ-R, sugerindo que fosse considerado agora o consumo de energia primária. Essa proposição trouxe mudanças no processo de avaliação de eficiência energética, mas não alterou os requisitos para o desempenho da envoltória. Mas, como visto na seção 2.2.2, o CB3E (BAVARESCO et al, 2017) propôs também a substituição das oito zonas bioclimáticas da NBR 15220-3 pelos 24 grupos climáticos de Roriz (2014), no RTQ-R, devido às críticas recorrentes ao zoneamento vigente (BASTOS; KRAUSE; BECK, 2007; FERREIRA; SOUZA; ASSIS, 2014; BOGO, 2016).

2.3.4 Diretrizes construtivas da norma NBR 15575

A norma NBR 15575-4, Edifícios Habitacionais até Cinco Pavimentos-Desempenho foi publicada em 2010. Em seguida, foi revisada e publicada novamente em 2013, como NBR 15575-Edificações Habitacionais-Desempenho (ABNT, 2013). Essa norma voltou-se ao comportamento dos sistemas que compõem o edifício, para atender minimamente diferentes exigências. A Parte 4, Sistema de Vedações Verticais Internas e Externas, e a Parte 5,

Requisitos para Sistemas de Coberturas, estabeleceram em seu método normativo (prescritivo) requisitos mínimos da envoltória para desempenho térmico aceitável. Esses requisitos diferiam daqueles do RTQ-R apenas no tocante a áreas mínimas de abertura para ventilação, e estavam igualmente referenciados no zoneamento da NBR 15220-3, embora difenciasse o requisito de abertura entre a região Norte e as regiões Nordeste e Sudeste, mesmo quando contidas em uma mesma zona bioclimática. Ainda assim, os valores são relativamente próximos. Não haviam prescrições adicionais de operação do sombreamento e da ventilação, em relação as do RTQ-R. A Tabela 2-5 mostra os requisito de área de abertura na NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Tabela 2-5 - Requisitos de área de abertura na envoltória NBR 15575-4.

	Área mínima de abertura para ventilação (%A.U.*)	
	ZB's de 1 a 7	**ZB8**
	≥ 7%**	≥ 12% para região Norte
		≥ 8% para região Nordeste e Sudeste

* %A.U: Percentual da área útil do recinto, até o limite de 15m².

** Nas zonas de 1 a 6 as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período frio.

Fonte: Adaptado de NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

A NBR 15575 apresenta algumas limitações quanto ao seu método de avaliação (SORGATO et al, 2012; PEREIRA; FERREIRA, 2014; MARQUES; NEVES; MELLO, 2015; SANTOS; PORTO; SILVA, 2020). Por isso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) colocou em consulta pública projeto de emenda à NBR15575-Desempenho (ABNT, 2021). Essa proposta modifica o método de avaliação do desempenho térmico (VEIGA et al, 2020; KRELLING et al, 2020), mas mantém os requisitos da envoltória como na versão vigente, acrescentando apenas limites para a área de superfícies transparentes. Ela estipula um limite máximo de 20% da área útil do recinto como efetiva para iluminação natural, para recintos de até 20m². Há ainda exceções para fachada sul em latitudes menores que 15° e recomendações alternativas, para o caso de proteção solar horizontal e envidraçamento de melhor desempenho (PEREIRA et al, 2020). O projeto de revisão introduz o parâmetro de avaliação baseado em frequência de conforto dos usuários (KRELLING et al, 2020), atendendo a uma crítica recorrente ao método de avaliação do desempenho na NBR 15575-1 (PEREIRA; FERREIRA, 2014; SANTOS; PORTO; SILVA, 2020), que baseia-se em diferença de temperatura interna e externa, em dia típico de verão e inverno. O controle do sombreamento e da ventilação na proposta baseia-se em critério de temperatura, em vez do critério de estações (quente e fria), na NBR 15220-3 (ABNT, 2005). O Sombreamento deve

estar ativo para temperatura de bulbo-seco externa (TBS) a partir de 26°C, marcando a transição entre a estratégia de sombreamento e de aquecimento solar. A ventilação deve estar ativa quando a temperatura de bulbo seco interna for superior à externa e maior que 19°C, representando ventilação seletiva contínua. A Tabela 5-6 apresenta os requisitos de abertura propostos.

Tabela 5-6 - Novos requisitos de área e operação de aberturas, a partir do projeto de revisão da NBR 15575-4.

ÁREA DE ABERTURA E OPERAÇÃO			
ZB	**Área (% A.U.*)**	**Sombreamento**	**Ventilação**
De 1 a 7	≥ 7%*	$TBS_{ext} \geq 26°C$	$TBS_{int} > 19°C$
8	≥ 12% para região Norte		
	≥ 8% para região Nordeste e Sudeste		

* %A.U. Percentual da área útil do recinto, até o limite de 15m².

Fonte: Adaptado de Projeto de revisão da NBR 15575-4 (ABNT, 2021).

Essa nova forma de simular a operação das aberturas representa melhor a ação do usuário, adaptando-se as condições do ambiente. Zambonato et al. (2020) realizaram estudo em unidades de HIS em Santa Maria-RS, sobre ações mais frequentes do usuário para se adaptar ao desconforto térmico. Os resultados desse estudo mostraram que a ação de abrir as janelas é a terceira atitude mais citada pelos moradores, como reação ao desconforto por calor, ficando atrás do acionamento de ar condicionado e de ventilador. A ação de fechar a janela também foi a terceira mais citada, como reação ao desconforto por frio, após o acionamento de aquecedor e outros comportamentos, sem relação com a envoltória.

2.3.5 Desempenho e conforto térmico em HIS no Brasil

A principal referência no Brasil sobre adaptação do edifício ao clima para maior conforto permanece sendo o zoneamento da NBR 15220-3. Ele tem sido fonte de parâmetro de avaliação e de diretrizes construtivas. A NBR 15575 e o RTQ-R são posteriores e estão voltadas à garantia de desempenho mínimo, se referenciando no atual zoneamento. Mas as diretrizes da NBR 15220-3 variam mais entre zonas bioclimáticas, que as diretrizes do RTQ-R e NBR 15575. Estas se diferenciam mais em função da absortância solar e são mais compatíveis com os sistemas usados no padrão construtivo correntes em HIS no Brasil, já que não fazem as mesmas exigências quanto a atraso térmico e área de abertura.

Estudos no Brasil têm indicado que a avaliação de desempenho por meio dessas referências normativas concorda pouco, no tocante a eficácia das diretrizes construtivas. Isso

pode ocorrer devido em parte às diferenças nas diretrizes construtivas, mas provavelmente e majoritariamente devido aos diferentes métodos de avaliação do desempenho. Ferreira, Souza e Assis (2015) avaliaram o conforto térmico de um mesmo projeto, em um município pertencente a cada uma das oito zonas bioclimáticas do Brasil. O projeto de tipologia HIS multifamiliar foi adaptado ao clima seguindo as diretrizes de três referências: Método Mahoney (KOENIGSBERGER; MAHONEY; EVANS, 1970), NBR 15220-3 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013). Os resultados do estudo mostraram que o modelo mais eficaz em cada zona diferia quanto a sua referência, não ratificando as diretrizes de nenhuma das três referências, para as oito zonas. Isso ocorreu apesar de o Método Mahoney ter servido de referência para as diretrizes na NBR 15220-3. Santos, Porto e Silva (2020) compararam o desempenho térmico de modelos de HIS no estado do Mato Grosso do Sul, pelo critério da NBR 15575 e pelo critério de frequência de conforto, a partir da *ANSI-ASHRAE Standard* 55. Os resultados mostraram cenários onde a conclusão sobre qual o melhor desempenho divergia, em função do critério adotado. Loura, Assis e Bastos (2011) compararam a avaliação da envoltória de um edifício de HIS multifamiliar no município do Rio de Janeiro-RJ, pelo método prescritivo do RTQ-R e pelo método simplificado da NBR 15575-1. Os resultados mostraram edifício classificado como "B", pelo RTQ-R, não alcançando o nível de desempenho "mínimo", pela NBR 15575. Silva e Ghisi (2014) simularam o desempenho de HIS unifamiliar, para o município de Florianópolis-SC. Os resultados mostraram que o nível de eficiência "E" para resfriamento, pelo RTQ-R, coincidia com o nível de desempenho "Intermediário" no verão, pela NBR 15575-1. O nível "B" para consumo com aquecimento, pelo RTQ-R, coincidia com a avaliação "não atende" para o inverno, pela NBR 15575-1. Essa conclusão surgiu apesar de as diretrizes construtivas dos dois instrumentos serem consideravelmente similares.

Parâmetros de desempenho são necessários à avaliação e à comparação da eficácia de diretrizes construtivas. A diferença em parâmetro de avaliação gera divergências entre referências normativas, quanto ao julgamento da eficácia das diretrizes construtivas. A frequência de conforto e a intensidade do desconforto térmico em ambientes naturalmente ventilados são critérios mais afins com a avaliação do desempenho de unidades de HIS, pois a posse dessas unidades está concentrada nas menores faixas de renda familiar. Isto está associado à posse menos frequente de equipamentos eletromecânicos para conforto ou ao uso mais restrito de tais equipamentos, a fim de diminuir a pressão exercida pelo custo do seu consumo energético, no orçamento familiar. No entanto, as normas brasileiras vigentes ainda

não dispõem de critérios adaptativos para esse fim. O método da norma norte-americana *ANSI*/*ASHRAE Standard 55* vem sendo usado como alternativa em trabalhos científicos.

O potencial da adaptação climática para elevar o conforto no edifício e lograr os seus benefícios para o uso racional de energia é amplamente aceito, mas persistem questões sobre que prescrições induziriam o projeto a explorar mais efetivamente esse potencial, na escala do território brasileiro, para constituir um zoneamento baseado em desempenho do edifício. Apesar do debate a respeito, a revisão completa do atual zoneamento ainda não ocorreu e a reavaliação de suas diretrizes é ainda uma agenda de pesquisa. Esta não foi abordada pelas pioneiras propostas de Roriz (2012a, 2012b, 2014), nem pelas atuais propostas de revisão da ABNT (2019, 2021), apesar dos reconhecidos avanços promovidos quanto à classificação climática e a métodos de avaliação do conforto no edifício. Avaliar a eficácia de diretrizes construtivas estabelecidas em instrumentos normativos brasileiros, com base em conforto adaptativo e em critérios de velocidade e qualidade do ar, tem potencial para ratificar essas diretrizes ou expor questões novas, que contribuam para o aperfeiçoamento dos métodos prescritivos vigentes.

Há expectativas que o método de avaliação baseado em simulação computacional atenda às demandas de informação de projetistas e induzam a projetos de melhor desempenho. No entanto, as decisões tomadas nas primeiras etapas do processo de projeto arquitetônico são as mais impactantes no desempenho térmico (PEDRINI, 2003; WILDE, 2004; VENÂNCIO, 2012). Nessa etapa, ocorre a concepção de projeto e não há ainda definições sobre o mesmo, mas apenas opções e suposições. E é improvável que o teste das suposições ocorra nessa etapa por simulação (GRAÇA; KOWALTOSKI; PETRECHE, 2011). Estudos de caso mostram que arquitetos não têm aplicado tais ferramentas como suporte a decisões de projeto (MAHDAVI et al, 2003; WILDE, 2004; MACIEL, 2006; VENÂNCIO, 2012). A avaliação pós-concepção por meio de simulação computacional é um meio eficaz para testar suposições e promover o aperfeiçoamento da proposta, mas se as primeiras decisões não a orientaram ao alcance do desempenho pretendido, esta terá de passar por alterações repetidas e profundas, até alcançar seu objetivo. Isso compromete a integridade da proposta e significa geralmente transtornos para as partes envolvidas (HOPFE; STRUCK; HENSEN, 2006). Talvez por isso, o suporte de métodos prescritivos seja frequentemente aplicado por arquitetos na concepção de projeto (WILDE, 2004; VENÂNCIO, 2012). Assim, as diretrizes construtivas contidas em métodos prescritivos continuam tendo um papel relevante como suporte ao projeto.

3 MÉTODO

O objeto de estudo do presente trabalho é o conforto em HIS unifamiliar, a partir da abordagem do conforto adaptativo. Essas moradias foram representadas por modelos, derivados da adaptação de um modelo base a uma amostra de climas. Essa adaptação baseou-se em diretrizes construtivas de normas brasileiras: NBR 15220-3, NBR 15575 e RTQ-R. Simulações com as ferramentas computacionais *EnergyPlus* e *Ansys CFX* geraram dados de temperatura, umidade e ventilação nos modelos. A análise desses dados comparou percentual do ano em conforto, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio, percentual do ano com taxa de renovação insuficiente para manter a qualidade do ar, potencial de conforto por efeito da velocidade do ar e contribuição efetiva da ventilação natural para o percentual do ano em conforto. As seções seguintes detalham etapas e procedimentos que compõem a presente investigação: seleção de amostra de climas, definição de modelos, produção e análise de dados.

3.1 Amostra de climas

Um procedimento de amostragem aleatória estratificada selecionou 25 arquivos climáticos de municípios brasileiros, em meio a 847 arquivos contidos na base INMET 2018 (LABEEE, 2021). Essa base de dados disponibiliza arquivos climáticos em formato "*epw*", para simulações com a ferramenta *EnergyPlus* (U.S.DOE, 2016). A seleção dos municípios da amostra fez uso de dois arquivos disponibilizados no sítio do Programa Brasileiro de Etiquetagem, PBE Edifica, como anexos da instrução normativa Inmetro INI-C, da Portaria N° 42 (INMETRO, 2021). Entre os anexos, está disponível um arquivo que lista 411 municípios brasileiros, classificados nas oito zonas bioclimáticas definidas na NBR 15220-3. Também consta um arquivo que lista 5.564 municípios classificados nos 24 grupos climáticos de Roriz (2014), adotando ainda a distinção entre grupo G1a e G1b, como proposto pelo CB3E (BAVARESCO et al, 2017) e descrito na seção 2.2.2. O procedimento de amostragem buscou na base INMET 2018 municípios que constassem nas duas listas citadas, de modo que os grupos climáticos de Roriz (2014) e também as oito zonas bioclimáticas da NBR 15220-3 (ABNT, 2005) estivessem representados em uma amostra de 25 municípios, como aparece na Tabela 3.1. A opção por uma amostra de 25 municípios buscou a menor amostra onde os 25 grupos climáticos pudessem estar minimamente representados, para conter assim o número de simulações requerido e o volume de dados a ser analisado.

Tabela 3-1 – Amostra de climas usada no estudo.

São Joaquim-SC	ZB1	G1a	Gov. Valadares-MG	ZB5	G9	Belém-PA	ZB8	G17
Florianópolis-SC	ZB3	G1b	Campina Grande-PB	ZB8	G10	Natal-RN	ZB8	G18
Curitiba-PR	ZB1	G2	Triunfo-PE	ZB6	G11	S. João do Piauí-PI	ZB7	G19
S. José dos Campos-SP	ZB3	G3	Bauru-SP	ZB4	G12	Palmas-TO	ZB7	G20
Caldas-MG	ZB3	G4	Santos-SP	ZB5	G13	Maceió-AL	ZB8	G21
Novo Horizonte-SC	ZB2	G5	Euclides da Cunha-BA	ZB7	G14	Mossoró-RN	ZB7	G22
Canela-RS	ZB1	G6	Londrina-PR	ZB3	G15	Espinosa-MG	ZB6	G23
Chapecó-SC	ZB3	G7	Foz do Iguaçu-PR	ZB3	G16	Pão de Açúcar-AL	ZB8	G24
Santa Maria-RS	ZB2	G8	-	-	-	-	-	-

Fonte: O autor.

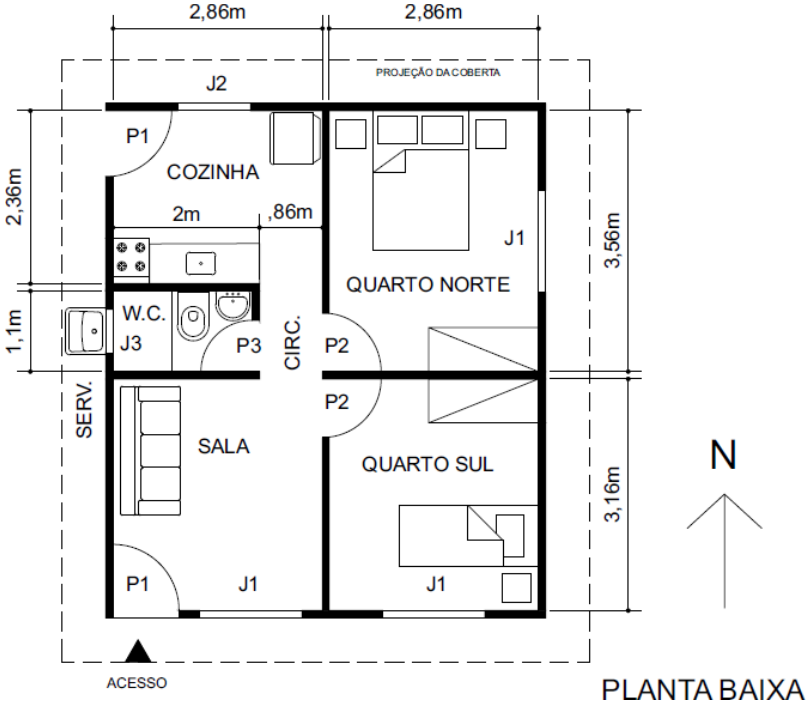
Os nove municípios que representaram os grupos climáticos de G1a a G8 estão situados na região Sul e Sudeste do Brasil e contidos nas zonas bioclimáticas Um, Dois e Três. Os oito municípios que representaram os grupos climáticos entre G9 e G16 estão situados nas regiões Sul, Sudeste, Nordeste e contidos nas zonas climáticas Três, Quatro, Cinco, Seis, Sete e Oito. Os oito municípios nos grupos de G17 a G24 pertencem às regiões Norte, Nordeste, Sudeste e situam-se apenas nas zonas Seis, Sete e Oito. Uma descrição mais detalhada dos climas da amostra pode ser vista no Apêndice A.

3.2 Definição de modelos

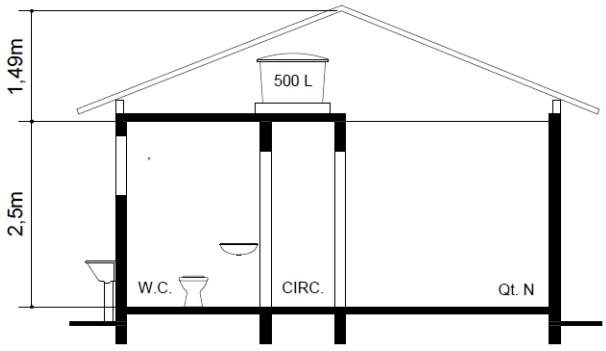
A definição da amostra de modelos iniciou pela adoção de uma tipologia de edifício. A tipologia adotada foi HIS unifamiliar no Brasil, a mesma abordada na norma NBR 15220 (ABNT, 2005). Como visto na seção 2.3, a maior parte (35%) de uma amostra de 68 projetos de HIS no Brasil, concluídos entre 2012 e 2014 (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015), eram moradias unifamiliares, com dois dormitórios, área construída variando entre 38 m² e 55 m², com paredes em bloco cerâmico rebocado e cobertura em telha cerâmica e forro de madeira. A área de abertura na zona social variava entre 12% e 29% da área útil. Nos dormitórios, variava entre 12% e 19%. Com base nesse padrão, foi escolhido como referência o projeto contido na publicação Cadernos Caixa: Projeto Padrão – Casas Populares – 42m² (CEF, 2007), adotado pela Caixa Econômica Federal (CEF), que é a principal fonte de crédito para HIS no país. Essa publicação sugere um projeto de HIS unifamiliar térrea, com dois dormitórios e área construída de 42 m², como mostra a Figura 3-1. O padrão construtivo desse projeto envolve paredes em alvenaria estrutural de blocos de concreto, rebocada e pintada de ambos os lados, com cobertura em telha cerâmica e forro em PVC. Há laje pré-moldada apenas sobre o banheiro e a circulação, e serve como apoio ao reservatório superior de água

da residência. A área de abertura na zona social e no quarto sul é representada por uma única janela, equivalendo a 22% da área útil. No quarto norte, essa mesma janela equivale a 19% da área útil.

Figura 3-1 - Projeto padrão de Habitação de Interesse Social da CEF.



PORTAS	
P1	0,8m x 2,1m
P2	0,7m x 2,1m
P3	0,6m x 2,1m
JANELAS	
J1	1,4m x1,4m / 1m
J2	1m x 1,2m / 1,2m
J3	0,6m x 0,8m / 1,6m



Fonte: Adaptado de Cadernos CAIXA: projeto padrão – casas populares – 42m² (CEF, 2007) .

3.2.1 Amostra de modelos

A definição dos modelos ocorreu por modificações no modelo base, que ocorreram em duas etapas. Na primeira, o modelo base foi adaptado aos climas da amostra selecionada, com base em diretrizes construtivas da norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Essas diretrizes estão descritas nas seções 2.3.1. Essa primeira etapa definiu oito modelos, cada modelo está adaptado a uma das oito zonas bioclimáticas. A estratégia de resfriamento evaporativo não

está representada entre esses modelos, por não estar relacionada diretamente às diretrizes construtivas da envoltória. A segunda etapa definiu quatro modelos, por combinação de opções de sistema construtivo de propriedades díspares, mas contidas nos limites recomendados na norma NBR 15575 (ABNT, 2013) e no regulamento RTQ-R (INMETRO, 2012), segundo as diretrizes descritas nas seções 2.2.2 e 2.2.3. A definição de modelos nessa segunda etapa balizou a escolha de sistemas construtivos ainda em critério de padrão construtivo. Isso foi feito optando por sistemas compatíveis com o padrão corrente em HIS unifamiliar no Brasil, tendo como referência o padrão construtivo do modelo base e o levantamento realizado por Triana, Lamberts e Sassi (2015).

Na primeira etapa de definição de modelos, foi preciso optar por uma parede "leve", uma parede "leve refletora" e uma parede "pesada". A definição dessas paredes adotou respectivamente os sistemas construtivos de número nove, 14 e 37, do Anexo Geral V do RAC, na Portaria n.º 50, de 01 de fevereiro de 2013: Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros (INMETRO, 2013). A parede "leve" (PL) corresponde a uma parede de 19 cm de espessura, composta por alvenaria de bloco cerâmico (nove furos), com dimensões 14 cm, 19 cm, 24 cm, revestida com argamassa e pintura de ambos os lados. A parede "leve e refletora" (PLR) corresponde a uma parede de 14 cm de espessura, composta por alvenaria de bloco cerâmico (seis furos), com dimensões 9 cm, 14 cm, 24 cm, revestida com argamassa e pintura de ambos os lados. A parede "pesada" (PP) corresponde a uma parede de 27 cm de espessura, composta por alvenaria dupla de bloco cerâmico (seis furos), com dimensões 9 cm, 14 cm, 24 cm, revestida com argamassa e pintura de ambos os lados, com camada intermediária de 4 cm de lã de rocha. As propriedades e as camadas constituintes dessas paredes podem ser vistas na Tabela 3.2. A absortância solar dessas paredes correspondeu à pintura com tinta acrílica fosca, na cor Terracota (n° 17, $\alpha = 0{,}65$) ou na cor Pérola (n° 14, $\alpha = 0{,}33$) (INMETRO, 2013). A deterioração das propriedades da pintura não foi avaliada, a fim de conter o número de variáveis a ser analisado. Também, foi preciso optar por uma cobertura "leve isolada" (CLI), uma "leve refletora" (CLR) e uma "pesada" (CP). A definição de cobertura CLR e CP fez uso respectivamente dos sistemas construtivos de número onze e 20 do Anexo Geral V do RAC, na Portaria n.º 50, de 01 de fevereiro de 2013: Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros (INMETRO, 2013). O sistema de número onze é composto por telhado de fibrocimento, com ático não ventilado (câmara de ar) e forro em PVC. No entanto, esta cobertura também atende aos requisitos para classificação "leve e isolada" (CLI). O sistema de número 20 é composto por telhado metálico

termoacústico, com camada intermediária de poliestireno (isopor), com ático não ventilado (câmara de ar) e laje de 10 cm de concreto maciço. Um segundo sistema de cobertura foi definido por meio da calculadora de propriedades da plataforma Projeteee (MMA; LABEEE, 2021), composto por telhado cerâmico, com ático não ventilado (câmara de ar) e forro em PVC, com camada de 2,5 cm de lã de rocha. Esse segundo sistema de cobertura atende também aos requisitos para a classificação "leve refletora" e "leve isolada" (CLR e CLI) e sua utilidade para as análises será esclarecida na descrição da segunda etapa de definição de modelos. As absortâncias solares dos telhados em fibrocimento, cerâmica e metal foram consideradas respectivamente 0,64, 0,48 e 0,16, correspondendo aos padrões TFC09, TCN06 e TCE01, na publicação de Dorneles (2021).

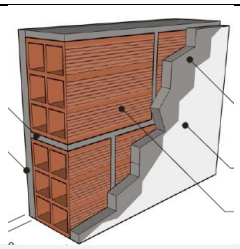
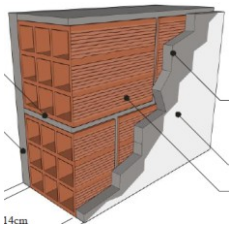
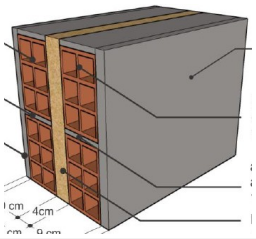
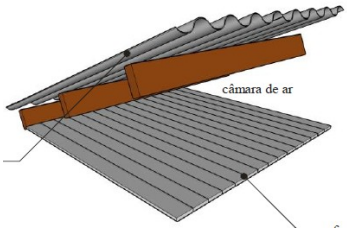
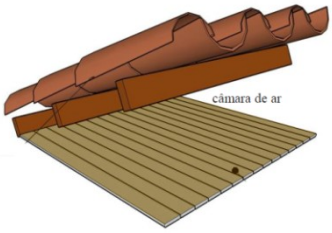
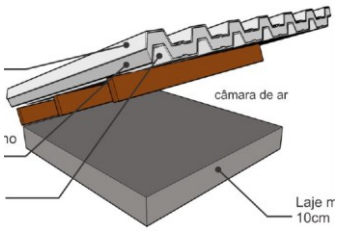
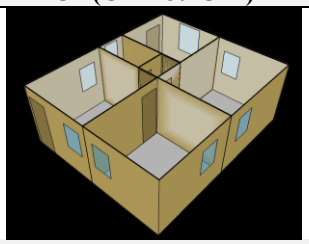
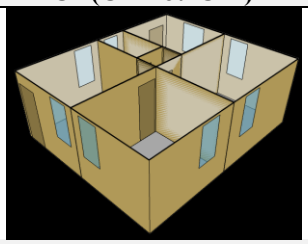
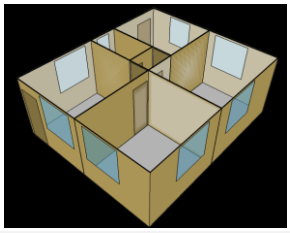
Tabela 3-2 - Propriedades e constituição dos sistemas de envoltória adotados.

PAREDES									
	PLR			**PL**			**PP**		
PROPRIEDADES									
	Efetiva		**Exigida**	**Efetiva**		**Exigida**	**Efetiva**		**Exigida**
U (W/m²K)	2,4		≤3,6	1,8		≤3,0	0,7		≤2,2
FatorSolar(%)	3,1		≤4	4,8		≤5	0,9		≤3,5
Atraso ϕ (h)	3,3		≤4,3	4,3		≤4,3	8,7		≥6,5
Ct (kJ/m²K)	150		≥130	161		≥130	183		≥130
α solar	0,33			0,65			0,33		
	Material	**e cm**	**Rt m²°C/W**	**Material**	**e cm**	**Rt m²°C/W**	**Material**	**e cm**	**Rt m² °C/W**
CAMADAS	argamassa	2,5	0,02	argamassa	2,5	0,02	argamassa	2,5	0,02
	cerâmica	1,3	0,01	cerâmica	1,6	0,02	cerâmica	1,3	0,01
	ar	6,3	0,17	ar	10,7	0,3	ar	6,3	0,17
	cerâmica	1,3	0,01	cerâmica	1,6	0,02	cerâmica	1,3	0,01
	argamassa	2,5	0,02	argamassa	2,5	0,02	lã rocha	4	0,89
	-	-	-	-	-	-	cerâmica	1,3	0,01
	-	-	-	-	-	-	ar	6,3	0,17
	-	-	-	-	-	-	cerâmica	1,3	0,01
	-	-	-	-	-	-	argamassa	2,5	0,02
COBERTURAS									
	C1 (CLR ou CLI)			**C2 (CLR ou CLI)**			**CP**		
PROPRIEDADES									
	Efetiva		**Exigida**	**Efetiva**		**Exigida**	**Efetiva**		**Exigida**
U (W/m²K)	1,8		≤2	0,9		≤2	0,68		≤2
FatorSolar(%)	4,5		≤6,5	1,7		≤6,5	0,4		≤6,5
Atraso ϕ (h)	0,8		≤3,3	1,2		≤3,3	11,2		≥6,5
Ct (kJ/m²K)	16		-	23		-	229		-
α solar	0,64			0,48			0,16		
	Material	**e cm**	**Rt m²°C/W**	**Material**	**e cm**	**Rt m²°C/W**	**Material**	**e cm**	**Rt m²°C/W**
CAMADAS	fibrocimento	0,8	0,01	cerâmica	1	0,9	aço + pe	4,2	1
	ar > 5 cm	25	0,2	ar > 5 cm	25	0,2	ar > 5 cm	25	0,2
	PVC	1	0,1	lã rocha	2,5	0,5	concreto	10	0,6
	-	-	-	PVC	1	0,1	-	-	-

Fonte: O autor.

A deterioração das propriedades de absortância das coberturas não foi avaliada, a fim de reduzir o número de variáveis na análise. As propriedades e as camadas constituintes dessas coberturas podem ser vistas na Tabela 3.2. As definições nessa tabela basearam-se também em informações do Anexo A, da biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no programa *EnergyPlus* (WEBER et al, 2017). A Tabela 3.3 sintetiza as opções e apresenta seu padrão de combinação, para a formação dos oito modelos da primeira etapa.

Tabela 3-3 - Opções de parede, cobertura e abertura, nos modelos da primeira etapa de definição.

PAREDES			
	PLR	**PL**	**PP**
COBERTURA			
	C1 (CLR ou CLI)	**C2 (CLR ou CLI)**	**CP**
ABERTURAS (Largura x Altura / peitoril)			
	P (0,7m x 1m/1m) 15% A.U.*	**M** (0,7m x 1,4m/1m) 22% A.U.*	**G** (1,4m x 1,4m/1m) 42% A.U.*

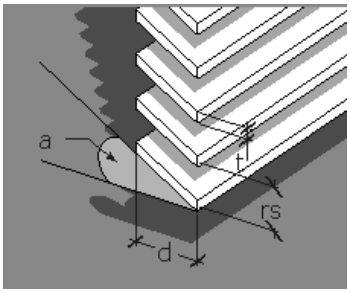
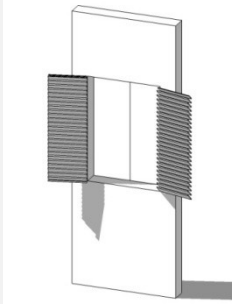
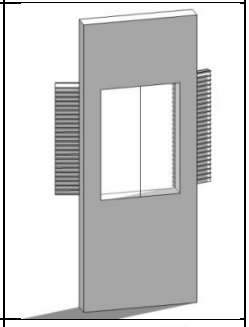
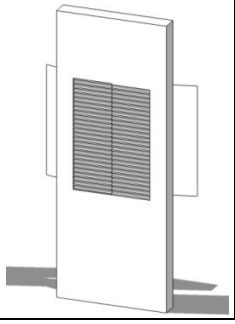
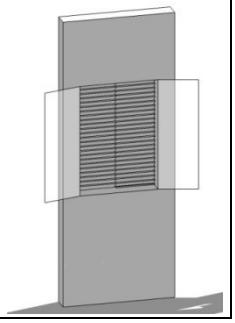
	PAREDES	COBERTURA	ABERTURAS	SOMBREAMENTO	VENTILAÇÃO
ZB1	PL	C1	M	Nunca	Nenhuma
ZB2	PL	C1	M	Apenas Verão	Permanente Verão
ZB3	PLR	C1	M	Apenas Verão	Permanente Verão
ZB4	PP	C1	M	Apenas Verão	Seletiva Verão
ZB5	PLR	C1	M	Sempre	Permanente Verão
ZB6	PP	C1	M	Sempre	Seletiva Verão
ZB7	PP	CP	P	Sempre	Seletiva
ZB8	PLR	C1	G	Sempre	Permanente

* A.U. (Areá útil do recinto).

Fonte: O autor. Imagens adaptadas do Anexo Geral V do RAC, na Portaria n.º 50, de 01 de fevereiro de 2013: Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros (INMETRO, 2020).

A envoltória dos modelos nessa primeira etapa foi definida a partir dos três tipos de parede e cobertura, a fim de adaptá-la a uma das oito zonas bioclimáticas da NBR 15220-3 (ABNT, 2005), conforme as diretrizes da Tabela 2.4, na seção 2.3.1. A definição da área e operação das aberturas seguiu a mesma tabela. Os cômodos de permanência prolongada (sala e dormitórios) dos modelos tinham aberturas de mesmo tamanho em duas fachadas, para promover ventilação cruzada, como recomendado pela NBR 15220-3 e aceito com bonificação pelo RTQ-R. Foi necessário definir área de abertura "pequena" (P), "média" (M) e "grande" (G), para completar o conjunto de opções que atendesse aos requisitos da NBR 15220-3. Estas são também apresentadas na Tabela 3.3, e segue diretrizes contidas na Tabela 2.4, na seção 2.3.1. Essas aberturas foram modeladas como um sistema de janela de giro, formado por duas camadas independentes: uma camada externa de venezianas e uma camada interna envidraçada, operando como mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3-4 - Sistema de janela com camada de fechamento interna e externa e opções de operação.

VENEZIANA		**Exterior**	**Interior**
 **t = 1 cm** **rs = 5 cm** **d = 5 cm** **a = 45°**	**VENEZIANA ABERTA E VIDRO FECHADO** **Insolação sem ventilação** (estratégia de aquecimento solar)		
	VENEZIANA FECHADA E VIDRO ABERTO **Ventilação com sombreamento** (estratégia ventilação de resfriamento)		

Fonte: O autor.

O termo "verão" é usado na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005), mas, no presente trabalho, esse termo correspondeu ao período primavera / verão. O período oposto do ano, ou estação fria, correspondeu às estações outono/inverno.

Aquecimento solar e inércia térmica (das paredes internas) são estratégias prescritas para todo o ano na Zona Bioclimática Um e para o período frio do ano nas zonas Dois, Três e

Quatro. As paredes internas nos modelos correspondentes a essas zonas foram representadas pela parede “PP”.

O fechamento da camada de venezianas permite o sombreamento contínuo da janela e o fechamento da camada interna de vidro suspende a ventilação natural. O envidraçamento usou vidro incolor de 3 mm, sem esquadria. As venezianas foram modeladas como alumínio natural e suas dimensões podem ser vistas na Tabela 3.4. Esse sistema permitiu o atendimento aos requisitos de operação das aberturas na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Suas opções permitiram ventilação natural combinada ou não com sobreamento da abertura, para corresponder respectivamente às estratégias de ventilação para resfriamento ou de aquecimento solar. Essa solução permitiu ainda o sombreamento abertura sem ventilação, para ventilação seletiva em momentos de temperatura externa desfavorável. O uso de venezianas consta entre as bonificações para moradia unifamiliar no RTQ-R (INMETRO, 2012). O efeito das venezianas na redução da velocidade do ar e da iluminação natural não foi considerado nas análises. Também não foram consideradas questões sobre privacidade e isolamento acústico dos recintos. Essas limitações foram assumidas a fim de conter o número de variáveis a serem analisadas e assim manter o foco nos objetivos do trabalho.

Na segunda etapa de definição de modelos, o modelo base foi adaptado para representar opções compatíveis com as diretrizes construtivas da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) e do regulamento RTQ-R (INMETRO, 2012). As referidas diretrizes estão descritas nas subseções 2.3.2, 2.3.3. A definição se baseou na combinação de duas opções de sistemas construtivos de parede e cobertura, com propriedades díspares, mas ainda contidas nos limites recomendados pelos dois instrumentos normativos. Os sistemas adotados correspondem aos dois tipos de parede (PLR e PL) e de cobertura (C1 e C2), definidos na etapa anterior, pois estes atendem às diretrizes e aos objetivos nessa segunda etapa. A combinação dos sistemas construtivos seguiu o esquema descrito na Tabela 3.5, gerando quatro tipos de envoltória.

Tabela 3-5 - Opções de envoltória, formadas pela combinação de dois tipos de parede e dois de cobertura.

	C1	**C2**
PLR	E1	E2
PL	E3	E4

Fonte: O autor.

A seleção de sistemas construtivos para a envoltória dos modelos balizou-se também no padrão construtivo corrente em HIS unifamiliar no Brasil. O padrão mais frequente em

HIS no Brasil corresponde a paredes de alvenaria simples, com cobertura em telhado e forro (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015), similar ao padrão do modelo base (GIDUR-VT-CEF, 2007). A Tabela 3.3 mostra que os sistemas construtivos "pesados" (PP e CP) envolveram paredes de alvenaria dupla, cobertura composta por laje de concreto maciço e telha termoacústica. Como comentado na subseção 2.3.1, esse tipo de composição atende ao requisito de atraso térmico da NBR 15220-3 (ABNT, 2005) para sistema "pesado", mas não são sistemas aplicados correntemente em HIS no Brasil, devido ao seu custo mais elevado. Por isso, apenas os referidos sistemas "leves" foram selecionadas nesta segunda etapa de definição de modelos: PLR, PL, C1 e C2.

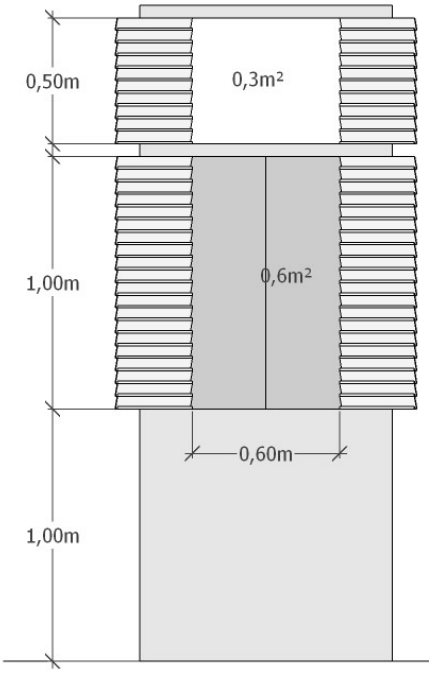
A norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e o regulamento RTQ-R (INMETRO, 2012) exigem apenas valores mínimos para área de abertura. Então, os valores máximos considerados na definição dos modelos nessa segunda etapa foram os da NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Esses limites mínimos e máximos serviram como referenciais para definir dois valores díspares dessa variável. A menor área de abertura definida nos modelos foi 0,6 m², representando de 6% e 7% da área útil dos ambientes de permanência prolongada. Esse valor aproxima-se do mínimo recomendado pela norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e pelo regulamento RTQ-R (INMETRO, 2012), e está abaixo do mínimo recomendado na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005) para a Zona Bioclimática Sete: 10%. O maior valor de abertura adotada nos modelos foi 1,8 m², representando de 18% e 20% da área útil dos espaços de permanência prolongada. Esse valor está contido no intervalo para abertura "média", da NBR 15220-3 (ABNT, 2005) e está bem acima do mínimo recomendado para a Zona Bioclimática Oito, na norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013) e no regulamento RTQ-R (INMETRO, 2012). A área de abertura de 1,8 m² está abaixo da área de abertura nos ambientes de permanência prolongada do modelo base, que é de 1,96 m². Este foi adotado como referência de limite máximo na definição dos modelos dessa segunda etapa, considerando o critério de adequação ao padrão construtivo de HIS unifamiliar no Brasil. Devido a esse critério, áreas contidas no intervalo de abertura "grande" (≥ 40% A.U.) da NBR 15220-3 (ABNT, 2005) não foram selecionadas nessa segunda etapa.

A operação das aberturas adotou o padrão proposto pelo projeto de emenda à NBR15575 (ABNT, 2021), onde o controle do sombreamento e da ventilação obedece a critério de temperatura, como descrito anteriormente na seção 2.3.3 e como apresentado na Tabela 3.6, que sintetiza as opções de operação e mostra as dimensões das aberturas. O Sombreamento deve estar ativo para temperatura externa a partir de 26°C e a ventilação deve

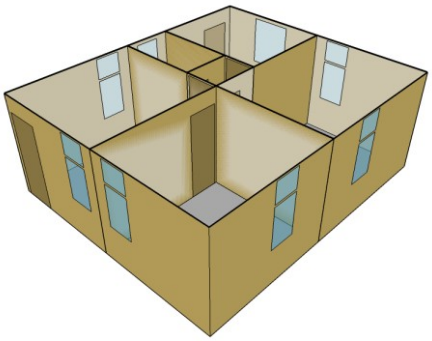
estar ativa quando a temperatura interna for superior à externa (ventilação seletiva) e também estiver acima de 19°C.

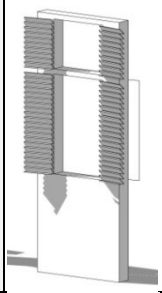
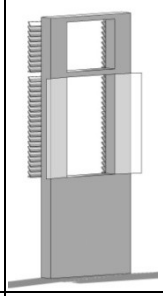
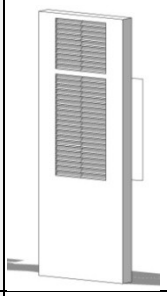
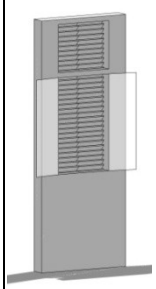
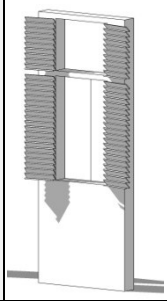
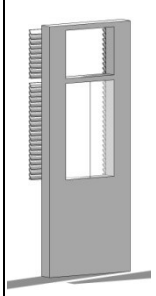
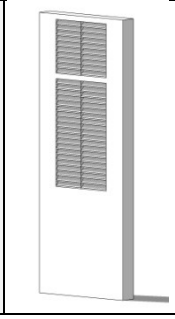
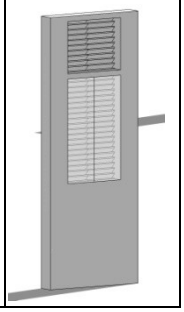
Tabela 3-6 - Sistema de janela composto, com camada de fechamento interna e externa.

DIMENSÕES DA ABERTURA



INTERIOR DOS MODELOS



Opções de Operação	Exterior	Interior
VENEZIANA ABERTA **VIDRO ABERTO** **Ventilação de resfriamento sem sombreamento** Temperatura externa < 26°C Temperatura interna > 19°C e maior que a temperatura externa		
VENEZIANA FECHADA **VIDRO ABERTO** **Ventilação de resfriamento com sombreamento** Temperatura externa ≥ 26°C Temperatura interna > 19°C e maior que a temperatura externa		
VENEZIANA ABERTA **VIDRO FECHADO** **Ventilação higiênica com aquecimento solar** Temperatura externa < 26°C Temperatura interna ≤ 19°C		
VENEZIANA FECHADA **VIDRO FECHADO** **Ventilação higiênica com sombreamento** Temperatura externa ≥ 26°C Temperatura interna ≤ 19°C		

Fonte: O autor.

Diferente do que ocorre no modelo base, a área de abertura nos cômodos dos modelos foi dividida em duas aberturas iguais e localizadas em fachadas diferentes, para promover ventilação cruzada. A operação das aberturas ocorreu por meio do mesmo sistema de janela aplicado na etapa anterior, formado por duas camadas de fechamento independentes, sendo uma camada externa de venezianas e uma camada interna envidraçada. Mas nessa segunda etapa, as aberturas foram ainda representadas por uma solução envolvendo duas aberturas

sobrepostas e independentes. Cada cômodo de permanência prolongada nos modelos possuía duas aberturas compostas assim, em fachadas diferentes. As aberturas superiores somando área total de 0,6 m² e correspondendo a 6% e 7% da área útil do recinto. A área total de abertura nas duas fachadas (superior e inferior) correspondendo a 1,8 m² e a 18% e 20% da área útil do recinto. As aberturas inferiores possuíam fechamento interno em vidro que, quando aberto, produzia uma ventilação cruzada para resfriamento e, quando fechado, interrompia a ventilação, que permanecia apenas pelas aberturas superiores, que não possuíam esse fechamento. Esse sistema dotou os modelos de uma ventilação natural higiênica permanente, pelas aberturas superiores, e uma ventilação de resfriamento seletiva e contínua, pelas aberturas inferiores. O objetivo dessa definição de abertura foi permitir a comparação com opções recomendadas na norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que suspendem a ventilação natural em estações frias, sem fazer considerações sobre qualidade do ar.

O piso em todos os modelos foi modelado como uma camada de 9,8 cm de concreto, seguido de uma camada de 2 cm de contrapiso em argamassa e uma camada superior de piso cerâmico, com 0,75 cm. Essa opção foi criada a partir da adaptação de opção de piso contida no Anexo A, da biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no programa *EnergyPlus* (WEBER et al, 2017). A laje sobre o banheiro e a circulação usou a opção de cobertura número dois, do Anexo Geral V do RAC, na Portaria n.º 50, de 01 de fevereiro de 2013: Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros (INMETRO, 2020). As portas foram modeladas com madeira de 3 cm e as esquadrias como uma moldura de alumínio natural, sem montantes, tendo como referência as propriedades desses materiais como descritas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005). O envidraçamento das janelas foi modelado como simples, em vidro incolor de 3 mm, com transmitância visível de 0,89, fator solar de 75% e transmitância térmica de 5,67 W/m²K.

No total, foram 12 modelos, oito modelos definidos na primeira etapa (os modelos ZB: ZB1, ZB2... ZB8) e quatro modelos definidos na segunda etapa (os modelos E: E1, E2, E3 e E4). Os modelos ZB estão adaptados às respectivas zonas bioclimáticas da NBR 15220-3 e os modelos E representam quatro envoltórias distintas que atendem aos requisitos da NBR 15575 e do RTQ-R. O modelo E1 tem a mesma envoltória que os modelos ZB3, ZB5 e ZB8. O Modelo E3 tem a mesma envoltória que ZB1 e ZB2, A diferença entre esses modelos surge apenas na inércia térmica das paredes internas e na operação das aberturas.

3.3 Produção e análise de dados

Os dados necessários ao estudo foram calculados em planilha eletrônica, a partir de dados gerados por simulação computacional das amostras de climas e modelos. Os quatro modelos “E” e um dos modelos “ZB” foram simulados em cada um dos climas da amostra, totalizando cinco modelos simulados em cada município. O modelo “ZB” simulado em cada município é o modelo correspondente à zona bioclimática do mesmo.

Simulações com a ferramenta *EnergyPlus* v. 8.7 (USDOE, 2016), com suporte do *plugin Euclid* 0.9.3 (NREL; BIG LADDER, 2020), geraram os dados de temperatura operativa interna, umidade relativa do ar interno e taxa de renovação, a partir dos arquivos climáticos em formato “*epw”*, da base de dados INMET 2018 (LABEEE, 2020). Esses dados foram necessários para quantificar frequências de conforto, graus-hora ao ano de desconforto e frequência anual com taxa de renovação insuficiente para manutenção da qualidade do ar interno. O *EnergyPlus* é uma ferramenta gratuita, recomendada para simulações pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) e pelo regulamento RTQ-R, com base em critérios da norma norte-americana *ASHRAE Standard* 140 *-2004: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.* (INMETRO, 2012).

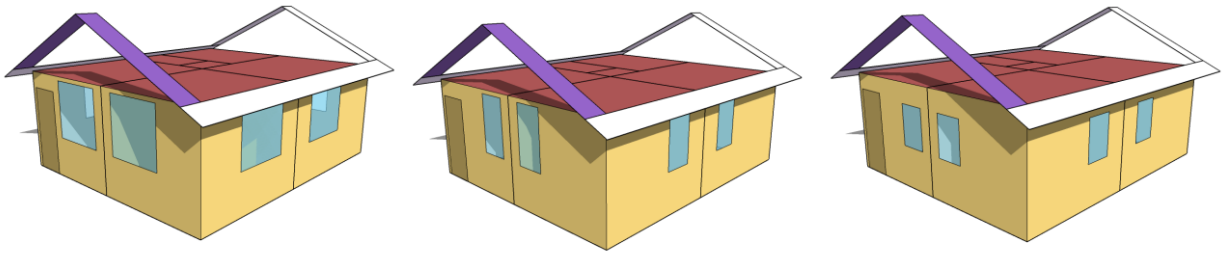
Simulações computacionais com a ferramenta *Ansys CFX,* integrante do *Workbench* 2021 R1 (KOHNKE, 1999; ANSYS, 2019), geraram dados de velocidade do ar no interior. Essa ferramenta está baseada em Dinâmica dos Fluídos Computacional, oferece licença gratuita para uso em pesquisas e vem sendo usada em estudos de ventilação no Brasil, como em Cóstola (2006), Leite (2008), Leite (2010), Sales (2012), Andrade (2013), Morais (2013), Sacht, Lukiantchuki, Caram (2017).

3.3.1 Simulação de temperatura, umidade e taxa de renovação

As simulações com o *EnergyPlus* (U.S.DOE, 2016) usaram padrões de ocupação, taxa metabólica dos usuários, rotina de uso de iluminação elétrica, cargas internas, taxa de infiltração de ar e operação de portas, conforme o método de simulação do projeto de emenda à NBR15575-Desempenho (ABNT, 2021). Assim, de acordo com essa referência, o modelo seria ocupado por duas pessoas em cada dormitório, num total de quatro moradores. As portas externas deveriam ser mantidas permanentemente fechadas e as postas internas permanentemente abertas, com exceção da porta do banheiro. Em situações cotidianas, essas portas internas podem estar fechadas, mas precisam manter uma área permeável para ventilação. As venezianas foram modeladas com os objetos *WindowMaterial:Blind* e

WindowProperty:ShadingControl (USDOE, 2018). As trocas de calor entre o modelo e o solo foram modeladas com o objeto *Ground Domain: Slab* (MAZZAFERRO; MELO; LAMBERTS, 2015). O número de trocas de ar por hora foi simulado com o objeto *AirflowNetwork* (PEREIRA et al, 2013). Os coeficientes de pressão foram calculados no modo *Surface Average Calculation*, que foi validado a partir de dados medidos pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL) e pelo Centro de Energia Solar da Flórida (FSEC) (GU, 2007). No entanto, os modelos precisaram limitar-se a forma de paralelepípedo, como mostrado na Figura 3.2. Essa exigência visa garantir nível de confiança aceitável nos resultados, como recomendado por Pereira *et al* (2013) e demonstrado por Gu (2007). A geometria da câmara de ar na coberta não aparece nos modelos, mas o efeito de sua resistência térmica foi simulado como uma propriedade do sistema construtivo da cobertura. Mesmo assim, o sombreamento produzido pelos beirais do telhado foi mantido. Apenas o efeito dessa geometria da coberta sobre os coeficientes de pressão nas fachadas não foi avaliado.

Figura 3-2 - Modelos usados nas simulações: aberturas grandes, médias e pequenas.



Fonte: O autor.

3.3.2 Avaliação de conforto

O desempenho nos cômodos de permanência prolongada (sala e dormitórios) dos modelos foi avaliado com base nos parâmetros: percentual do ano em conforto e graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. A análise dos dados dos três ambientes permitiu avaliar o efeito da orientação sobre o desempenho. O critério de conforto da avaliação foi a zona de conforto adaptativo da norma *ANSY/ASHRAE Standard* 55 (ANSY; ASHRAE, 2017), para 80% de aceitabilidade térmica. Devido a limitações nesse método, já discutidas nas seções 2.1.3. e 2.1.4, a análise adotou correções propostas por DeVecchi *et al* (2014) e por Nicol (2004). Ambas já discutidas nas seções citadas.

3.3.3 Avaliação da ventilação higiênica

A avaliação da ventilação higiênica nos modelos baseou-se na percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada para garantir qualidade aceitável do ar interno. A determinação desse valor mínimo baseou-se em recomendações da norma norte-americana *ANSY*/*ASHRAE Standard* 62-2 (ASHRAE, 2016), como apresentado na seção 2.1.5. De acordo com essa norma, a vazão mínima deve ser de 18 L/s para três habitantes, acrescida de 3,5 L/s para um habitante adicional. Então, a vazão mínima de 21,5 L/s foi adotada para avaliar os modelos da pesquisa, já que estes têm ocupação prevista de quatro moradores. Essa vazão mínima de 21,5 L/s corresponde a 77.400 L/h. A sala e o quarto sul dos modelos têm 23,6 m³ de volume, correspondendo a 23.600 L de ar. O quarto norte tem 25,45 m³, correspondendo a 25.450 L de ar. Então, a taxa de renovação mínima recomendada para manter a qualidade do ar aceitável equivale a 3,3 renovações por hora, na sala e quarto sul, e a três renovações por hora, no quarto norte. O número de renovações horárias depende da velocidade média do ar no recinto, que por sua vez depende do vento, que é uma variável inconstante em velocidade e direção, podendo chegar à condição de calmaria. Por isso, a avaliação de ventilação higiênica nos modelos adotou como indicador o percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nessas horas do ano, seria necessário usar suplemento de ventilação mecânica para elevar a vazão até a mínima e assim manter a qualidade do ar interno em nível aceitável.

3.3.4 Avaliação da ventilação de resfriamento

A velocidade do ar no interior do edifício é uma variável inconstante, que depende da geometria do edifício, da velocidade e direção do vento. A zona de conforto da norma *ANSY/ASHRAE Standard* 55 (ANSY; ASHRAE, 2017) considera a influência no conforto de três intervalos de velocidade média do ar. Isso permite estimar melhor a contribuição efetiva da velocidade do ar na frequência de conforto térmico, apesar de suas inevitáveis variações.

A estimativa da frequência anual de conforto no interior dos modelos dependia de dados de temperatura e velocidade do ar nas 8760 horas do ano. A ferramenta *EnergyPlus* (U.S.DOE, 2016) pode simular as variações horárias de temperatura em um único processamento. Mas a ferramenta *Ansys CFX* (KOHNKE, 1999; ANSYS, 2019) pode apenas simular as velocidades do ar para uma combinação de direção e velocidade do vento, por processamento, como ocorre em outras ferramentas *CFD*. O vento é inconstante em velocidade e direção. Então, a ferramenta precisa realizar um processamento para cada

combinação de velocidade e direção horária do arquivo climático de referência. Isso torna o procedimento extenso demais, devido ao tempo necessário para completar as simulações requeridas.

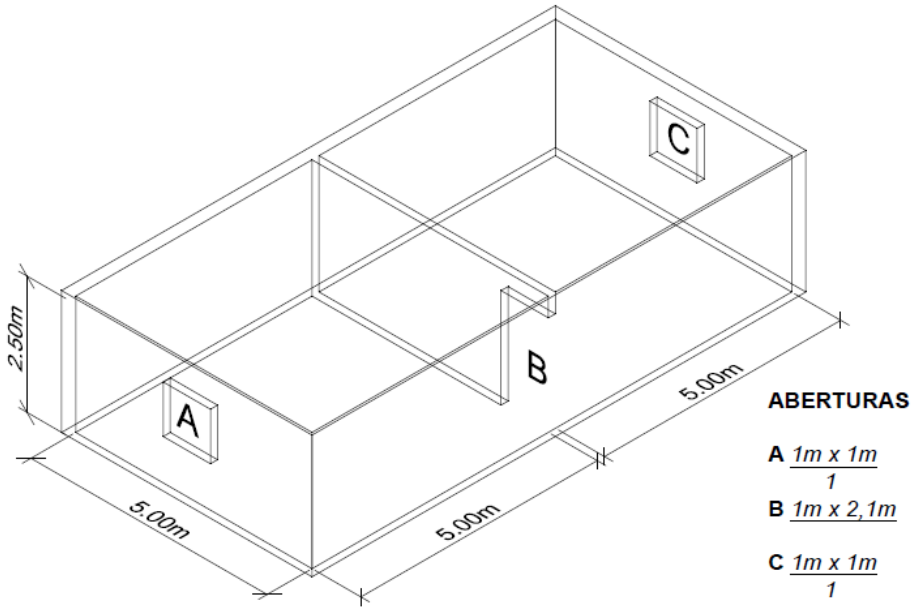
Uma possível solução para essa dificuldade é o uso de coeficientes de ventilação, para estimar velocidade do ar nos recintos, a partir de dados de velocidade e direção do vento no arquivo climático. Coeficiente de ventilação é definido como a razão entre a velocidade do ar no interior do recinto e a velocidade simultânea do vento na altura das aberturas, para uma combinação específica de direção do vento, geometria de edifício e malha de pontos. Coeficientes de ventilação médios são usados para representar o efeito da geometria e da direção do vento nas velocidades do ar em espaços internos (GIVONI, 1998).

A eficácia dessa proposta de solução depende da magnitude da variação dos coeficientes de ventilação em função da velocidade do vento, considerando um intervalo significativo de velocidades. Se essa variação fosse desprezível para fins de avaliação de conforto térmico, então esses coeficientes poderiam ser usados para estimar as velocidades do ar no interior, de modo mais ágil. Assim, antes de prosseguir com a simulação dos modelos, foi necessário testar a hipótese de que o coeficiente de ventilação médio tem variação desprezível, em função da velocidade do vento. O teste consistiu em uma análise paramétrica, do efeito de diferentes combinações de direção e velocidade do vento, na velocidade do ar no interior de um modelo. Esses dados de velocidade do ar foram usados para calcular coeficientes de ventilação médios. Em seguida, a variação dos coeficientes em função da velocidade do vento foi dimensionada e comparada.

3.3.5 Teste de incerteza na estimativa de velocidade do ar

O teste da referida hipótese foi feito com base em simulações computacionais das velocidades do ar. Essas simulações usaram um modelo de planta retangular, com dimensões 10,45 m por 5,3 m e 2,6 m de altura. O modelo era formado por paredes de espessura 0,15 m e a laje de 0,1 m. Uma parede interna dividia a planta em dois recintos de 5 m por 5 m e havia uma porta de 2,1 m², no canto da parede interna, que fazia a ligação dos dois ambientes. O modelo contava com duas aberturas de 1 m² e 1 m de peitoril, estando uma em cada recinto, nos extremos do eixo longitudinal do modelo. Esse modelo é mostrado na Figura 3.3.

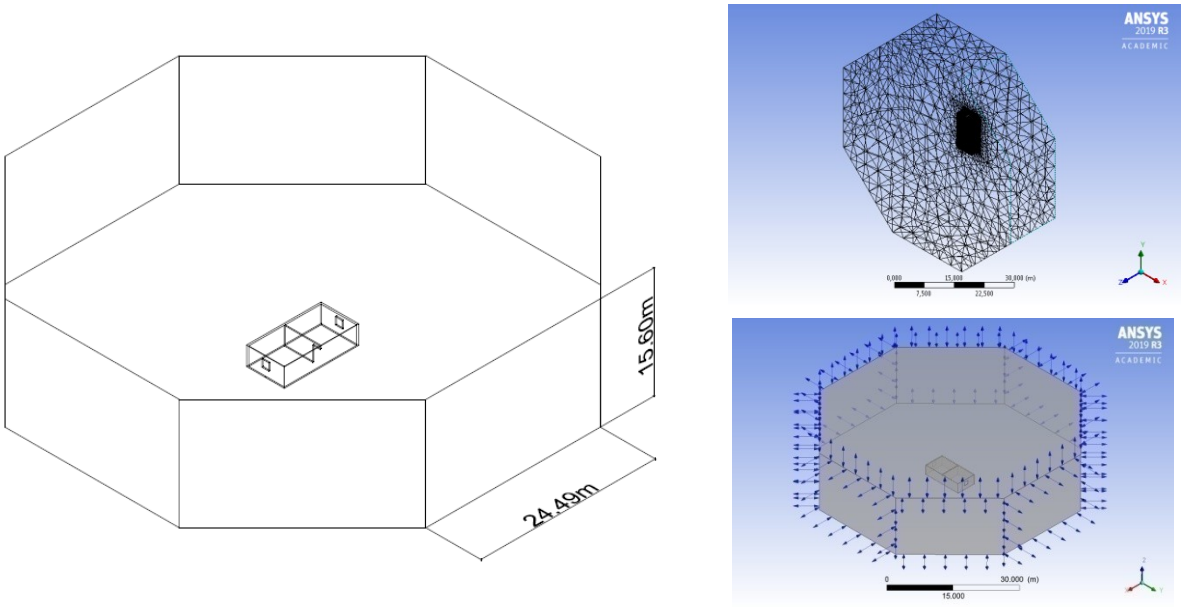
Figura 3-3 - Modelo-base da análise paramétrica.



Fonte: O autor.

As dimensões do domínio fluido foram definidas como múltiplos da altura do modelo (H=2,6 m). O domínio tem forma prismática de base octogonal, com 24,49 m de lado e 15,6m de altura (6H). A base do prisma é proporcional a um círculo circunscrito de 32 m de raio, mantendo uma distância mínima de 26 m (10H) entre as extremidades do modelo no centro e os limites do domínio. O domínio foi preenchido com uma malha tetraédrica gerada pelo método *Patch Independent*, respeitando o número máximo de nós permitido pela versão acadêmica do programa, que é de 512.000 nós. Foram usadas *inflations* (refinamento) de cinco camadas em todas as superfícies da malha. Os limites do domínio foram configurados como *Opening* (espaço aberto, onde o ar pode entrar e sair), com exceção das faces que representam o terreno e as superfícies do modelo. Estas foram configuradas como *Wall, no slip* (sólida, com atrito). A opção por manter os limites do domínio como *Opening* impede que as dimensões do mesmo afetem a circulação do ar em torno do modelo, pois permite a entrada e saída do ar, em qualquer direção. O domínio é mostrado na Figura 3.4. O número de interações máximo nas simulações foi sempre definido como igual ou maior que 100, conforme a necessidade da convergência para massa e momento. O critério de convergência foi *RMS* (da sigla em inglês para valor quadrático médio), de tamanho máximo 10^{-4}. As demais opções usaram o padrão do programa.

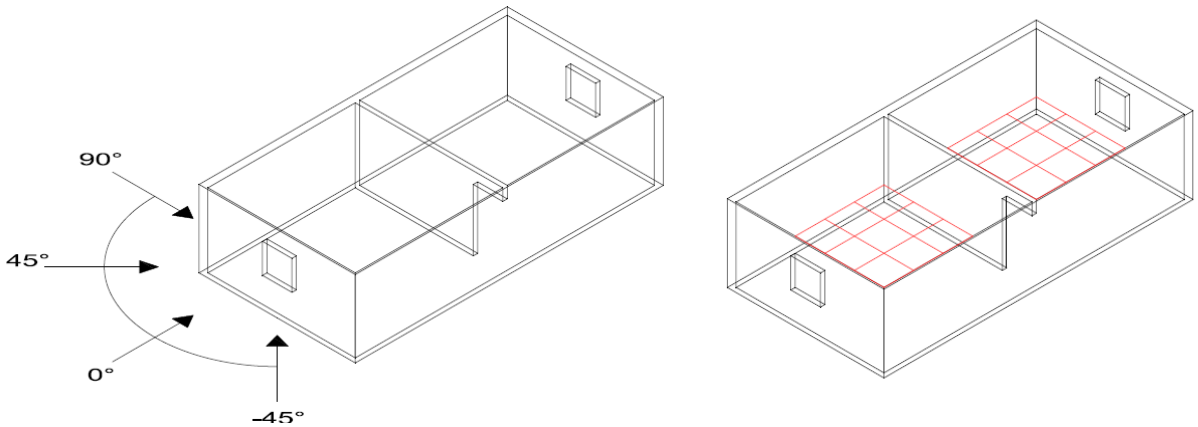
Figura 3-4 - Dimensões do domínio fluido da simulação computacional, à esquerda. Malha do domínio fluido, à direita e acima. Configuração dos limites do domínio fluido, à direita e abaixo.



Fonte: O autor, a partir de imagens geradas *Ansys CFX* (ANSYS, 2019).

As simulações usaram quatro direções do vento, representadas pelos ângulos de incidência: 0°, 45°, 90° e -45°. As simulações também usaram três velocidades do vento: 1m/s, 2 m/s e 5 m/s. Esses valores aproximam-se da média anual brasileira e da menor e maior média anual municipal no Brasil (INMET, 2018). As velocidades internas foram simuladas em duas malhas regulares de 16 pontos cada (4 m x 4 m), sendo uma em cada recinto do modelo. As malhas estavam na altura de 1,5 m do piso, que é a altura do centro das aberturas. Os pontos da malha mantinham distância de 1 m das paredes e um espaçamento entre si de 1 m, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 3-5 - À esquerda, direções do vento simuladas, incidências: -45°, 0°, 45°, 90°. À direita, Malhas de pontos, dimensões 4 m x 4 m (16 pontos), sendo uma em cada ambiente.



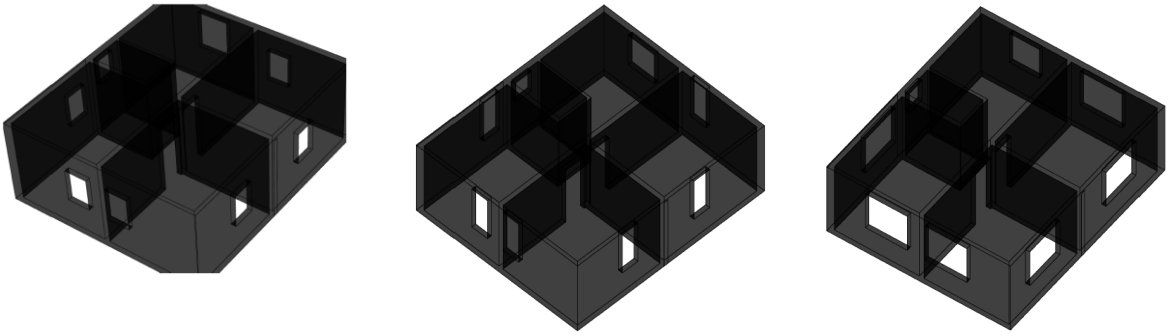
Fonte: O autor.

As velocidades simuladas permitiram o cálculo da velocidade média em cada recinto. Posteriormente, a razão entre a velocidade média e a velocidade do vento definiu o coeficiente de ventilação médio do cômodo, para a direção do vento adotada na simulação. Os coeficientes de ventilação médios para as quatro direções e três velocidades geraram a amostra de dados usada no teste da hipótese. A análise dos dados avaliou as variações do coeficiente de ventilação médio, mínimo, máximo e desvio padrão. A comparação dos valores ocorreu na precisão de um centésimo (0,01) e de um décimo (0,1). A *ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2017) adota esta última, para considerar a velocidade do ar em seu método adaptativo.

3.3.6 Simulação da velocidade do ar

Após a conclusão do teste anterior, as simulações de velocidade do ar nos modelos da amostra foram feitas, seguindo os procedimentos descritos a seguir. As simulações usaram os modelos com abertura "pequena" (P), "média" (M) e "grande" (G), descritos na seção 3.2.1 e mostrados na Figura 3.6.

Figura 3-6 - Modelos usados nas simulações de velocidade do ar: modelo com abertura pequena, à esquerda, modelo com abertura média, ao centro, modelo com abertura grande, à direita.



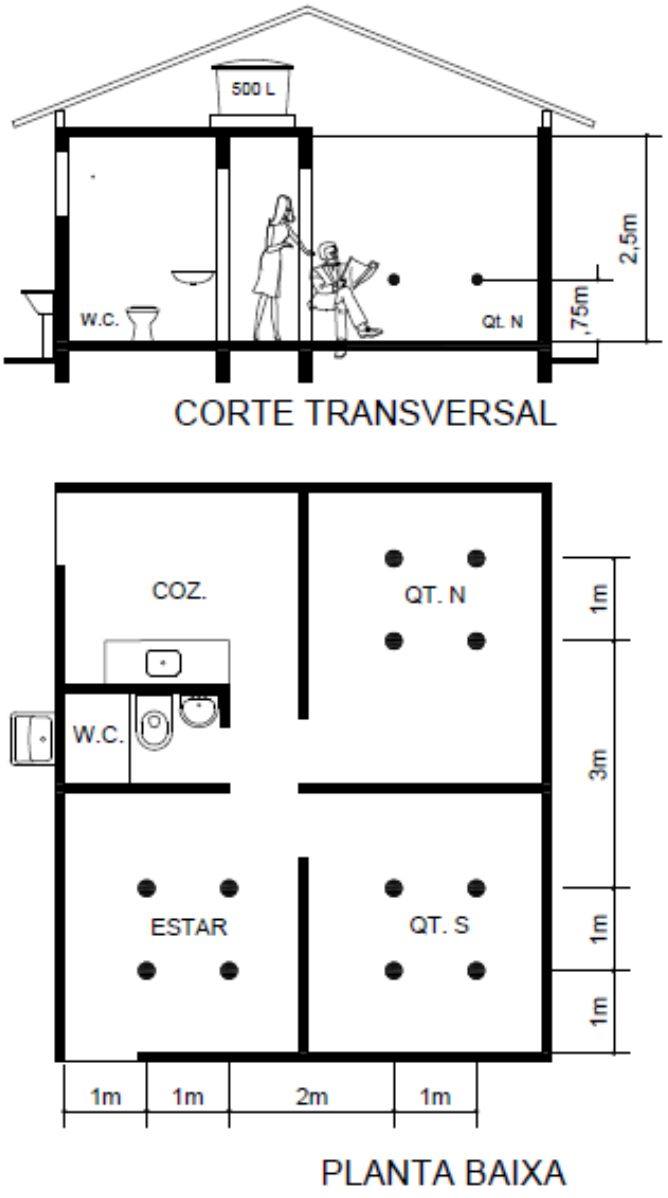
Fonte: O autor.

O cenário correspondente à ventilação higiênica apenas pelas aberturas superiores dos modelos "E" não foi simulado, uma vez que havia expectativa de que seu efeito sobre as velocidades do ar e o resfriamento fisiológico dos ocupantes fosse desprezível, apesar do esperado efeito positivo sobre as taxas de renovação.

As velocidades internas foram simuladas em uma malha de quatro pontos em cada cômodo de permanência prolongada (sala e dormitórios). Os pontos foram espaçados como pode ser visto na Figura 3.7. A malha de pontos foi localizada a 0,75 m do piso, para

representar a corrente de ar incidindo sobre ocupantes sentados ou deitados, como está previstos para ambientes de sala de estar e dormitório.

Figura 3-7 - Dimensões da malha de pontos usada nas simulações de velocidade do ar, em todos os modelos simulados.

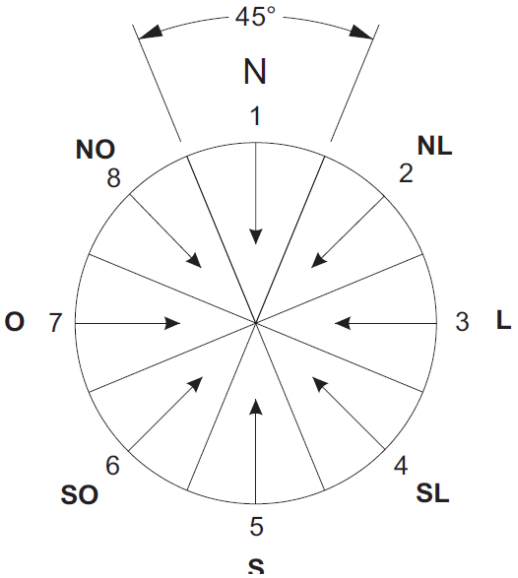


Fonte: O autor.

O vento foi simulado em oito direções, a fim de identificar o efeito dessas direções nas velocidades do ar interno. Cada direção representa o agrupamento de direções contidas em setores de 45° e é representada pela bissetriz desse ângulo. As oito direções do vento coincidem com os pontos cardeais e colaterais, como mostrado na Figura 3.8. Com base no resultado do teste anterior, os coeficientes de ventilação médios foram considerados

invariáveis em função da velocidade do vento, na precisão de um décimo. Então, as simulações adotaram apenas a velocidade do vento de 1 m/s.

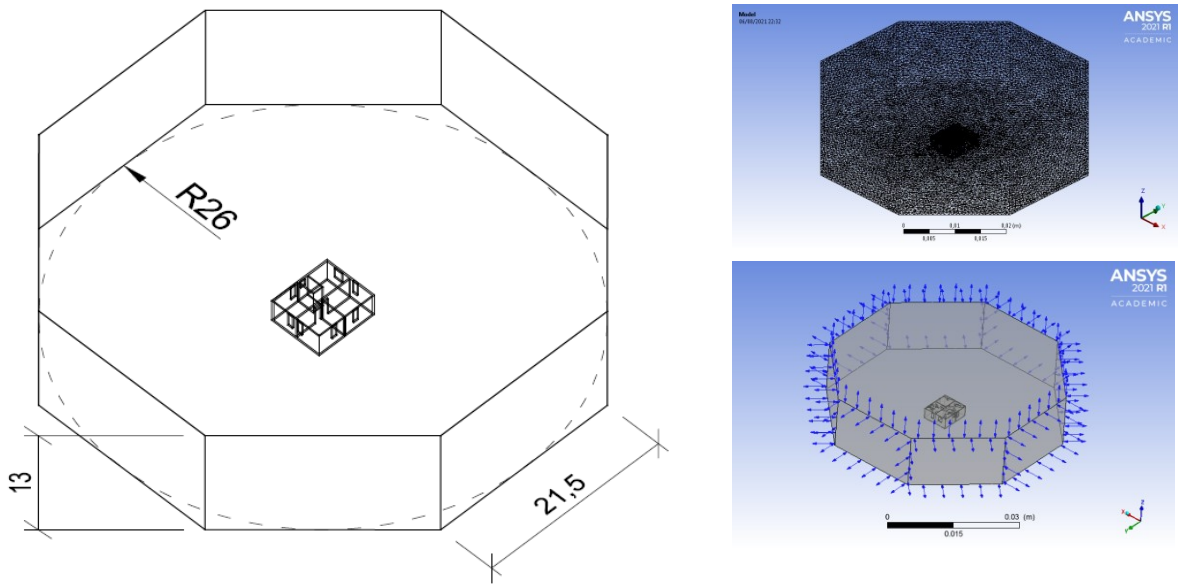
Figura 3-8 - Direções usadas nas simulações do vento.



Fonte: Os autores.

A Figura 3.9 apresenta diferentes aspectos do domínio fluido nas simulações. O domínio tinha forma prismática de base octogonal, proporcional a um círculo inscrito de 26 m de raio (10x a altura do modelo) e com 13 m de altura (5x a altura do modelo).

Figura 3-9 - Formato e dimensões do domínio fluido, à esquerda. Malha no domínio à direita e acima. Limites do domínio, à direita e abaixo.



Fonte: O autor a partir de imagens geradas *Ansys CFX* (ANSYS, 2019).

As configurações das simulações foram iguais as do teste anterior. Os limites do domínio foram configurados como *Opening* (espaço aberto), com exceção das faces que representam o terreno e as superfícies do modelo. Estas foram configuradas como *Wall*, *no slip* (sólida, com atrito). O domínio foi preenchido com uma malha tetraédrica gerada pelo método *Patch Conforming*, com no máximo 512.000 nós. O número de interações máximo nas simulações foi sempre definido como igual ou maior que 100, conforme a necessidade da convergência. O critério de convergência foi resíduo de tamanho máximo 10^{-4}. As demais opções usaram o padrão do programa *Ansys CFX* (ANSYS, 2019).

Essas simulações geraram dados de velocidade do ar, que permitiram o cálculo dos coeficientes médios de ventilação, para as oito direções, nos três cômodos dos três modelos simulados. Esses coeficientes permitiram estimar a velocidade média do ar nos recintos, a partir de dados horários de direção e velocidade do vento, contidos nos arquivos da amostra.

As velocidades no arquivo climático são medidas em estações meteorológicas a 10 m de altura do solo. O atrito devido à rugosidade do terreno provoca redução gradual dessas velocidades, em função da altura. Assim, as velocidades contidas no arquivo climático precisaram ser corrigidas para a altura das aberturas nos modelos (1,5 m do solo), usando a Equação 3.1 (BRE, 1978).

$$V/V_m = k * z^a \qquad \text{Equação 3.1}$$

"V" é a velocidade média do vento em m/s, na altura da abertura de entrada do ar. "Vm" é a velocidade média do vento em m/s, medida em estação meteorológica. A variável "z" é a altura da abertura de entrada do vento. As variáveis "k" e "a" são coeficientes que variam de acordo com a rugosidade do terreno, segundo a Tabela 3.7 (BRE, 1978). A rugosidade do terreno foi considerada urbana central, como recomendado no método de simulação do projeto de emenda à NBR15575-Desempenho (ABNT, 2021).

Tabela 3-7 - Coeficientes para cálculo de gradiente de vento.

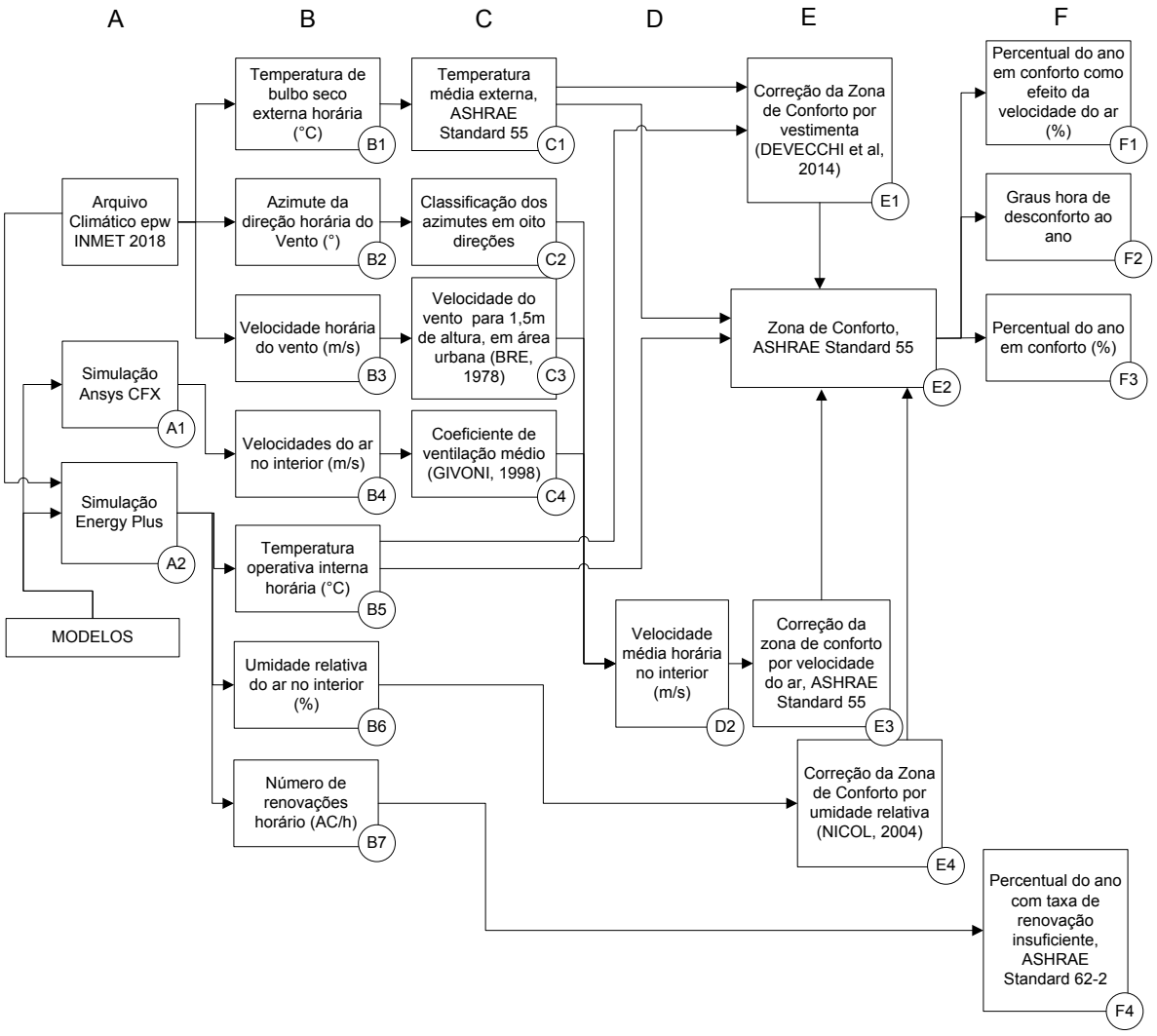
Tipo de terreno	k	a
Área plana (água)	0,68	0,17
Campo com obstáculos esparsos	0,52	0,2
Área suburbana	0,35	0,25
Centro urbano	0,21	0,33

Fonte: Adaptado de BRE (1978).

3.3.7 Análise dos dados gerados nas simulações

O conjunto dos procedimentos descritos no presente capítulo produziram os dados usados na análise de desempenho dos modelos. Os fluxos de informação entre esses procedimentos estão representados no diagrama da Figura 3.10.

Figura 3-10 - Diagrama do fluxo de informação entre os procedimentos que geraram os dados usados nas análises.



Fonte: O autor.

Esses procedimentos foram agrupados em seis etapas (de "A" a "F"), no diagrama da figura. Essas etapas foram executadas em planilha eletrônica, a partir da etapa "B". Os percentuais anuais eram calculados pela planilha a partir da avaliação de cada hora do ano. Essa etapa finaliza a geração dos dados que foram usados nas análises de resultado descritas no capítulo seguinte. A análise dos resultados visa comparar o desempenho dos modelos nos

climas da amostra, a fim de avaliar a eficácia das diretrizes construtivas representadas pelos mesmos, quanto a diferentes indicadores.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados encontrados a partir dos procedimentos descritos no capítulo anterior e discute as implicações dos mesmos, para as questões abordadas no presente trabalho. O capítulo está dividido em duas partes principais. A primeira parte apresenta os resultados obtidos com os dados de percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com potencial para conforto por velocidade do ar, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada, para manutenção da qualidade do ar interno. A segunda parte apresenta o resultado do teste do procedimento proposto para estimativa das velocidades do ar interno, também mostra os dados obtidos com esse procedimento e com a amostra de climas e modelos, discutindo a contribuição efetiva da ventilação natural no percentual do ano em conforto.

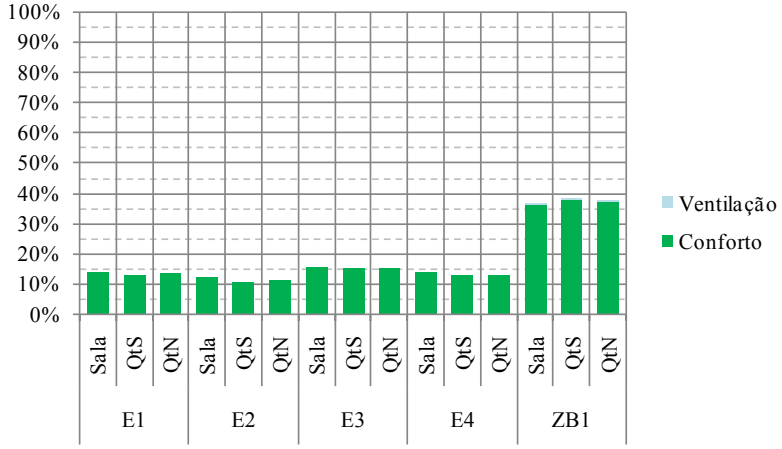
4.1 Análise de conforto e qualidade do ar

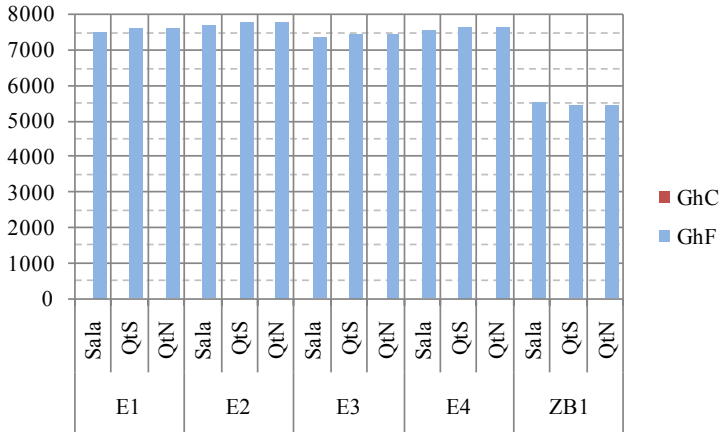
Os resultados sobre percentuais do ano em conforto, frequência e intensidade de desconforto e percentual do ano com taxa de renovação insuficiente, estão apresentados em sequência e agrupados por zona bioclimática. Esse conjunto de resultados é discutido ao final desta primeira parte.

4.1.1 Zona Bioclimática Um e Dois

Os municípios de São Joaquim-SC, Curitiba-PR e Canela-RS, representaram na amostra de climas a Zona Bioclimática Um e também os grupos climáticos G1a, G2 e G6, respectivamente. Os municípios de Novo Horizonte-SC e Santa Maria-RS representaram a Zona Bioclimática Dois e os grupos climáticos G5 e G8, respectivamente. As figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 mostram dados de desempenho desses cinco municípios. Em cada uma dessas figuras, o primeiro gráfico mostra o percentual do ano em conforto, acrescido do percentual anual com potencial para conforto por ventilação. O segundo gráfico nas figuras mostra o desconforto por calor e frio em graus-hora-ano. O terceiro e último gráfico em cada figura mostra o percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Os dados são relativos aos três recintos de permanência prolongada (sala de estar e dormitórios), nos quatro modelos ”E” e no modelo “ZB” correspondente à zona bioclimática do município.

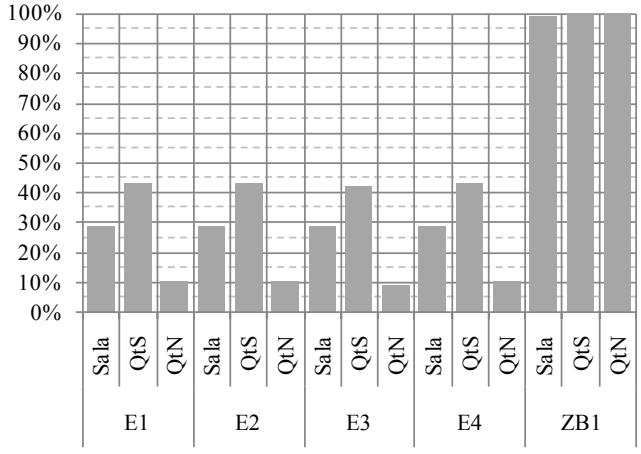
Figura 4-1 - Dados de desempenho no município de São Joaquim-SC (ZB1 e G1a), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

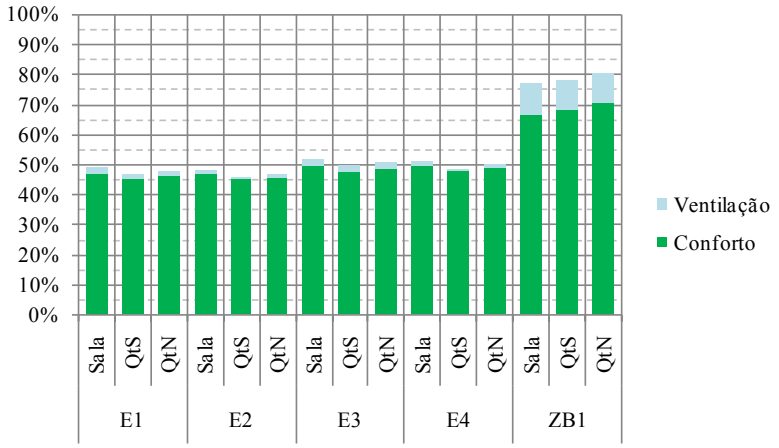


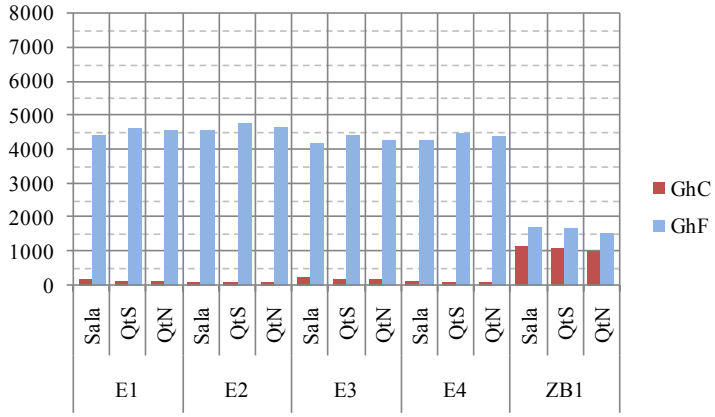
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB1	PL	C1	M	Nunca	Nenhuma
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

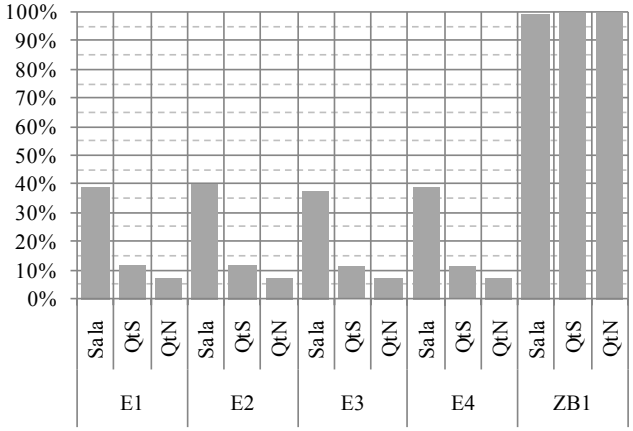
Figura 4-2 - Dados de desempenho no município de Curitiba-PR (ZB1 e G2), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

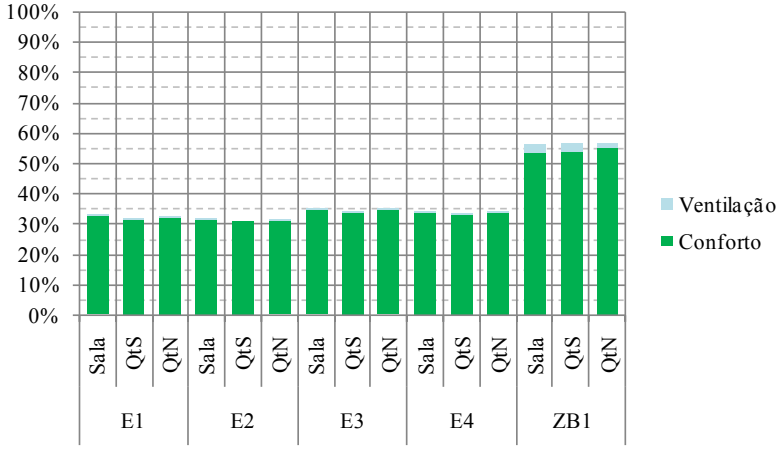


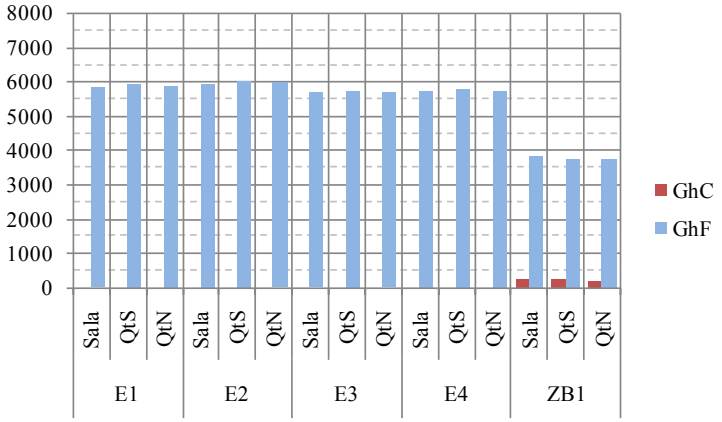
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB1	PL	C1	M	Nunca	Nenhuma
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

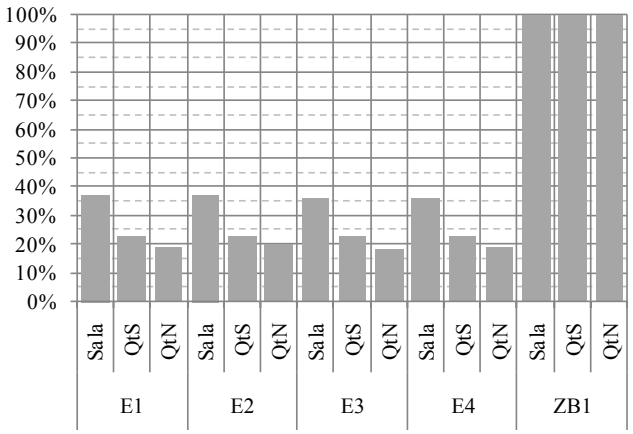
Figura 4-3 - Dados de desempenho no município de Canela-RS (ZB1 e G6), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

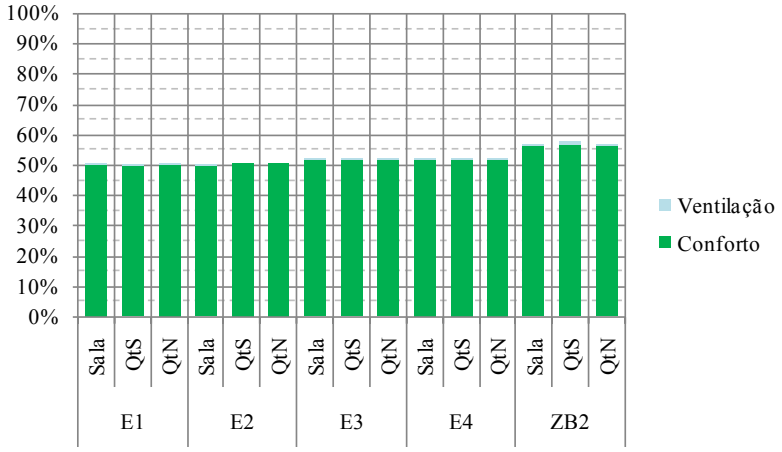


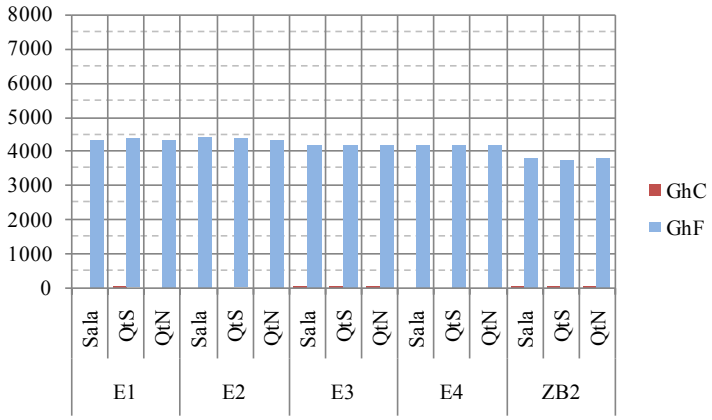
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB1	PL	C1	M	Nunca	Nenhuma
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

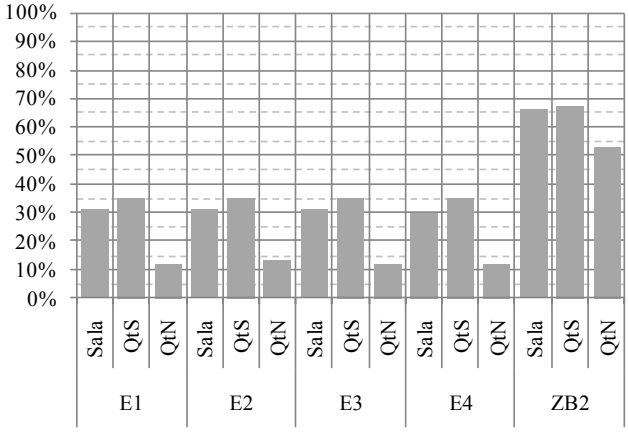
Figura 4-4 - Dados de desempenho no município de Novo Horizonte-SC (ZB2 e G5), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB2. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

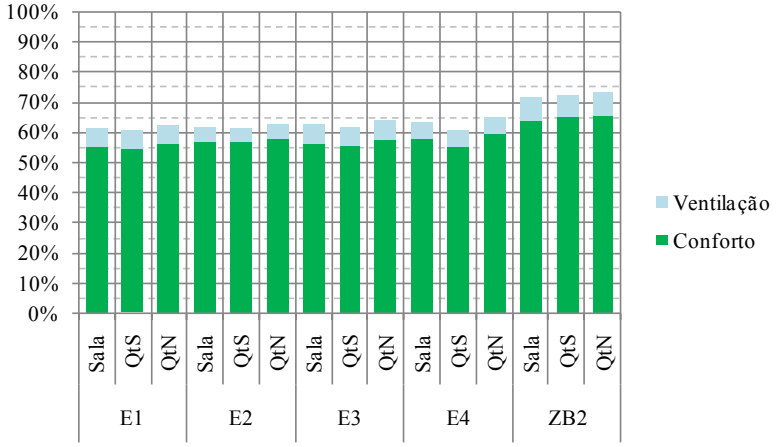


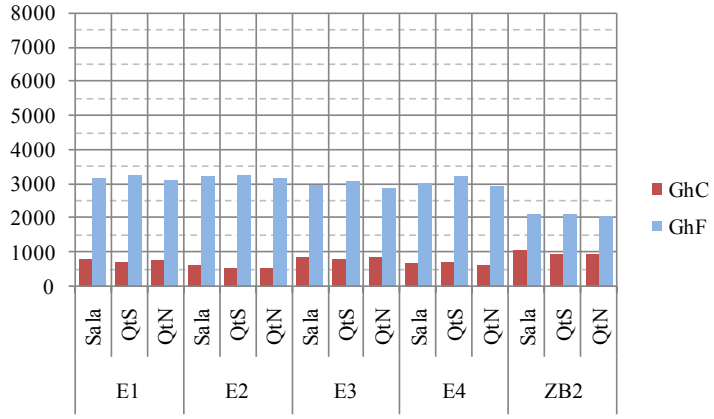
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB2	PL	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

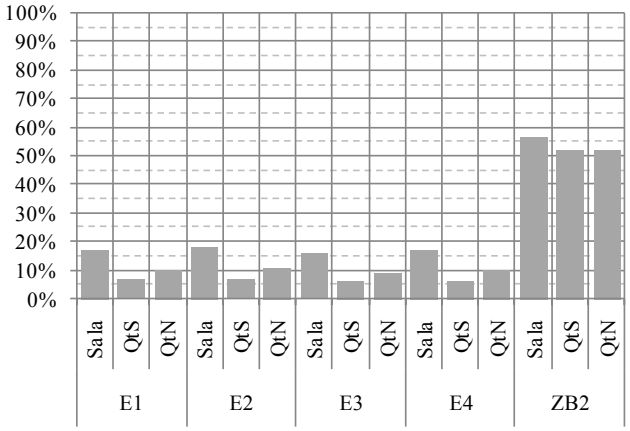
Figura 4-5 - Dados de desempenho no município de Santa Maria-RS (ZB2 e G8), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB2. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil



	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB2	PL	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

O percentual anual em conforto entre esses cinco municípios foi maior em Curitiba-PR (ZB1 e G2), com o quarto norte do modelo ZB1 chegando a 71% do ano em conforto. O menor percentual anual em conforto ocorreu em São Joaquim-SC (ZB1 e G1a), com os dormitórios do modelo E2 alcançando apenas 11% do ano. Este foi o menor percentual em toda amostra de climas. O modelo ZB1 teve percentual anual em conforto maior que os modelos "E" em todos os climas, ficando cerca de 20 pontos percentuais acima deles, cujas diferenças entre si foram cerca de cinco pontos percentuais apenas. O modelo ZB2 foi também superior aos modelos "E", mas a diferença em relação a eles foi menor, variando de cinco a dez pontos percentuais a mais. Enquanto as diferenças entre os modelos "E" foram de aproximadamente três pontos percentuais. A diferença de percentual anual em conforto entre os três recintos de um mesmo modelo foi consideravelmente reduzida, apesar das diferenças de orientação. O maior desvio padrão da média de desempenho dos três recintos foi de dois pontos percentuais, e ocorreu no modelo ZB1 em Curitiba-PR. O percentual do ano com potencial para conforto por ventilação foi proporcional à frequência e intensidade do desconforto por calor. O maior potencial de incremento do conforto por ventilação ocorreu na sala do modelo ZB1 em Curitiba-PR e foi de dez pontos percentuais. O valor desse potencial para os três cômodos de uma mesmo modelo variou pouco, apesar das diferentes orientações destes. O maior desvio padrão da média dos três recintos foi de menos de um ponto percentual e ocorreu no modelo ZB1, em Santa Maria-RS (ZB2 e G8).

O desconforto por frio foi predominante nos cinco municípios e variou entre 1.535 e 7.808 graus-hora-ano, no quarto norte do modelo ZB1 em Curitiba-PR (ZB1 e G2) e no quarto sul do modelo E2 em São Joaquim-SC, respectivamente. O valor alcançado em São Joaquim-SC (ZB1 e G1a) foi o maior em toda a amostra. A diferença de valor Entre os modelos "E"chegou a um máximo de 500 graus-hora-ano. A diferença de valor entre os três recintos de um mesmo modelo foi consideravelmente reduzida, apesar das diferenças de orientação. O maior desvio padrão da média dos três recintos, em um mesmo cenário, foi de apenas 151 graus-hora-ano de frio e ocorreu no modelo E4, em Santa Maria-RS (ZB2 e G8). O desconforto por calor foi notável apenas em Santa Maria-RS e em Curitiba-PR, mas apenas no modelo ZB1. Na sala deste modelo, ocorreu o valor mais alto entre os cinco municípios: 1.169 graus-hora-ano de calor.

As taxas de renovação no modelo ZB1 não alcançaram o mínimo recomendado para manter a qualidade do ar em mais de 99% do ano, nos três recintos do modelo e nos três municípios da Zona Bioclimática Um. As médias anuais de taxa de renovação no modelo ZB1

foram de menos de uma renovação por hora, nos três municípios. Já as taxas de renovação no modelo ZB2 não alcançaram o mínimo recomendado entre de 50% e 70% do ano e suas médias anuais de taxa de renovação variaram entre 30 e 50 renovações por hora. As taxas de renovação dos modelos "E" ficaram abaixo da mínima recomendada entre 6% e 43% do ano, no quarto sul do modelo E4 em Santa Maria-RS (ZB2 e G8) e dos modelos E1, E2 e E4, em São Joaquim-SC (ZB1 e G1a). Suas médias anuais de taxa de renovação variaram entre 28 e 56 renovações por hora.

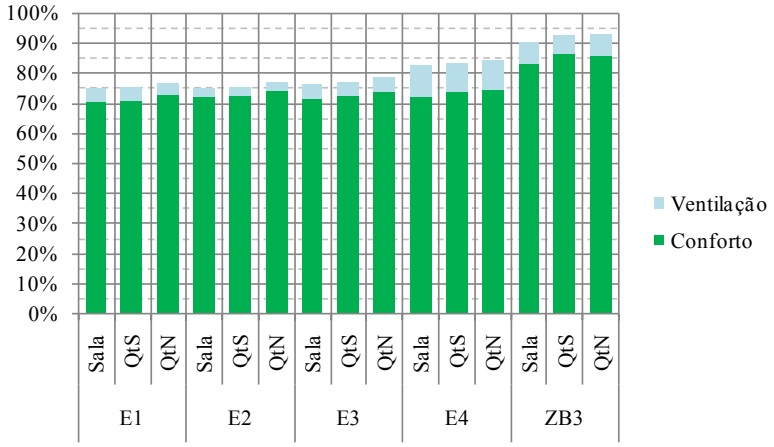
Os modelos ZB1, ZB2 e os modelos "E" tinham a mesma área de abertura (Abertura "Média", 22% da A. U.) e diferiam apenas quanto ao padrão de operação das aberturas e aos sistemas construtivos. Mas o modelo E3 e os modelos ZB1 e ZB2 tinham a mesma envoltória, diferindo apenas quanto à operação das aberturas e à inércia das paredes internas. O modelo ZB1 não tinha sombreamento, nem ventilação, contando apenas com a infiltração de ar pelas aberturas fechadas. O modelo ZB2 tinha sombreamento e ventilação permanente apenas na estação quente (primavera e verão), como mostrado na seção 3.2.1. Já o modelo E3 tinha sombreamento e ventilação seletiva contínua, associada com ventilação higiênica permanente, assim como os demais modelos "E". Estes contavam com duas aberturas sobrepostas, onde a área total de abertura é de 22% da área útil e a área apenas das aberturas superiores é de 6% ou 7% da área útil, como apresentado na subseção 3.2.1. As diferenças de percentual do ano em conforto foram maiores entre E3 e ZB1 que entre E3 e ZB2. Esse resultado sugere que os padrões de operação de aberturas definiram o percentual anual de conforto, apesar das diferentes envoltórias. O padrão dos modelos "E" foi o mais bem sucedido, no tocante a maior autonomia da ventilação natural para manter a qualidade do ar ao longo do ano. As diferenças observadas entre os percentuais do ano com taxa de renovação insuficiente nos ambientes de um mesmo modelo resultaram das diferenças de direção e velocidade do vento entre municípios. Mas as diferenças entre modelos em um mesmo município corresponderam mais às diferenças em padrões de operação das aberturas. Por outro lado, maiores percentuais do ano em conforto coincidiram com maiores percentuais do ano com taxa de renovação insuficiente à manutenção da qualidade do ar, sugerindo uma associação entre esses dois indicadores. Portanto, é provável que o aumento artificial das vazões de ar fresco, a fim de manter a qualidade do ar, afetaria negativamente o percentual do ano em conforto.

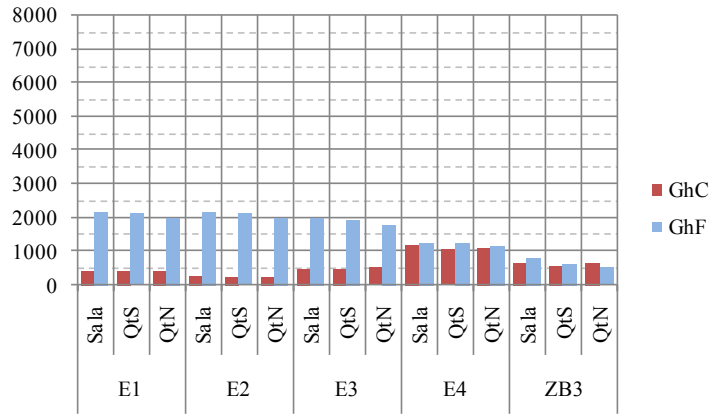
4.1.2 Zona Bioclimática Três

Os municípios de Florianópolis-SC, São José dos Campos-SP, Caldas-MG, Chapecó-SC, Londrina-PR e Foz do Iguaçu-PR representaram na amostra de climas a Zona Bioclimática Três e os grupos climáticos G1b, G3, G4, G7, G15 e G16, respectivamente. As Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, mostram dados de desempenho relativos aos três recintos de permanência prolongada (sala de estar e dormitórios) dos quatro modelos ”E” e do modelo ZB3, nos seis municípios. Em cada uma das figuras, o primeiro gráfico mostra o percentual do ano em conforto, acrescido do percentual anual com potencial para conforto por ventilação. O segundo gráfico nas figuras mostra o desconforto por calor e frio em graus-hora-ano. O terceiro e último gráfico em cada figura mostra o percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada.

Entre os seis municípios da Zona Bioclimática Três, os percentuais anuais em conforto foram maiores, o desconforto por frio foi menos intenso e o desconforto por calor foi mais frequente, na maioria dos cenários e com relação às zonas Um e Dois. A exceção ocorreu no município de Caldas-MG (ZB3 e G4), que apresentou os menores percentuais anuais em conforto e os maiores valores em graus-hora-ano de frio, com padrão de desempenho similar ao de Novo Horizonte-SC (ZB2 e G5). O gráfico 5a do Apêndice “A” mostra que Caldas-MG está entre os municípios da amostra que apresentam temperaturas mais baixas. O maior percentual do ano em conforto ocorreu no quarto sul do modelo ZB3, em Florianópolis-SC (ZB3 e G1b), e foi de 86%. Embora, tenha ficado próximo ao valor em São José dos Campos-SP (ZB3 e G3), que foi de 84%. Esses valores ficaram cerca de 14 pontos percentuais acima dos modelos “E”, que variam entre si cerca de dois pontos percentuais apenas. O modelo ZB3 apresentou os maiores percentuais anuais em conforto, entre os cinco modelos simulados, em cinco dos seis municípios. A exceção foi Londrina-PR (ZB3 e G15), que apresentou um padrão significativamente diferente dos demais, com predomínio do desconforto por calor nos cinco modelos, com o modelo E2 apresentando o maior percentual do ano em conforto e ficando até 24 pontos percentuais acima do modelo ZB3, que apresentou o menor. O percentual anual com potencial de acréscimo do conforto por ventilação chegou a 25 pontos percentuais, no quarto norte do modelo ZB3 em Londrina-PR, que teve também o maior valor em graus-hora-ano de calor: 4570°C. O desconforto por calor chegou a igualar o desconforto por frio nos modelos E4 e ZB3, em Florianópolis-SC (ZB3 e G1b), e até a superá-lo no modelo ZB3, em São José dos Campos-SP (ZB3 e G3), Londrina-PR (ZB3 e G15) e Foz do Iguaçu-PR (ZB3 e G16).

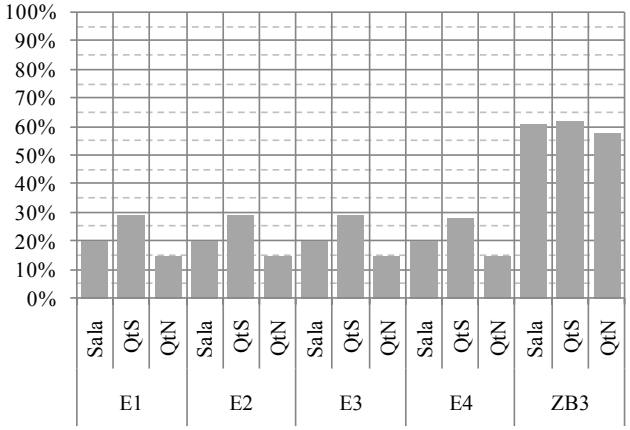
Figura 4-6 - Dados de desempenho no município de Florianópolis-SC (ZB3 e G1b), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

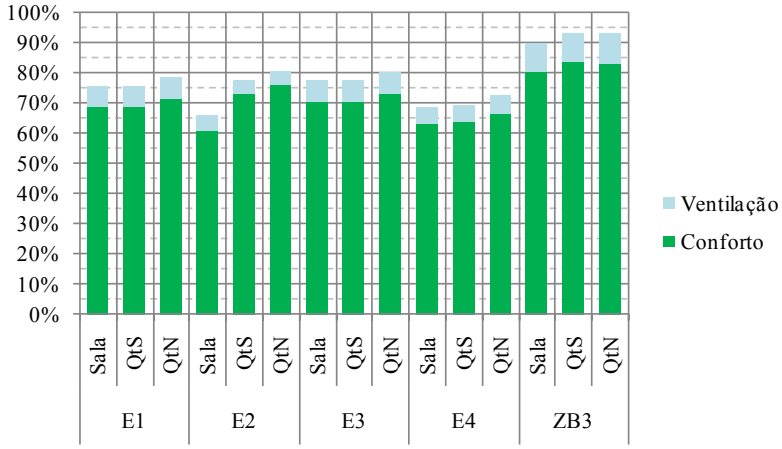


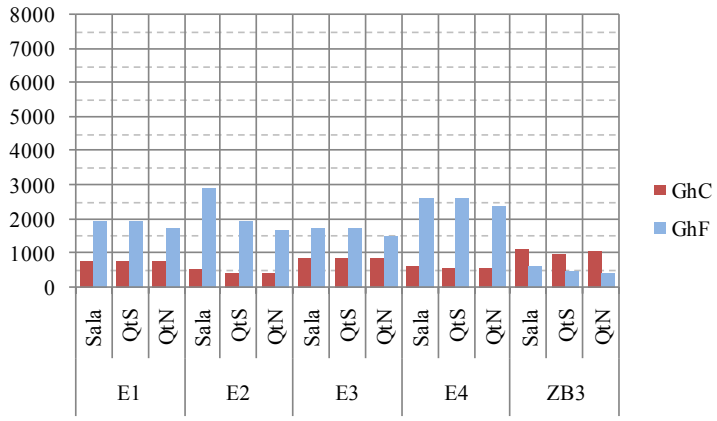
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB3	PLR	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

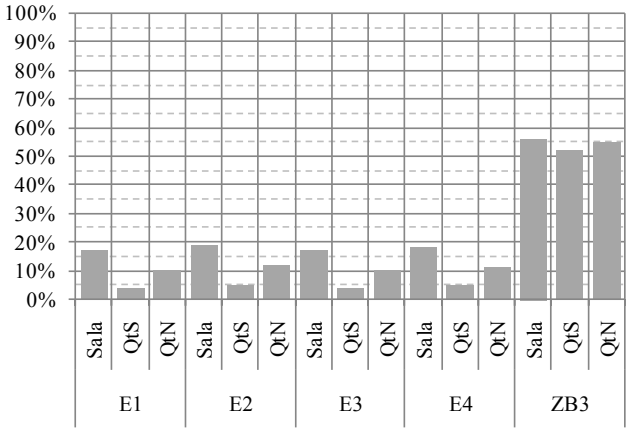
Figura 4-7 - Dados de desempenho no município de São José dos Campos-SP (ZB3 e G3), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB1. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

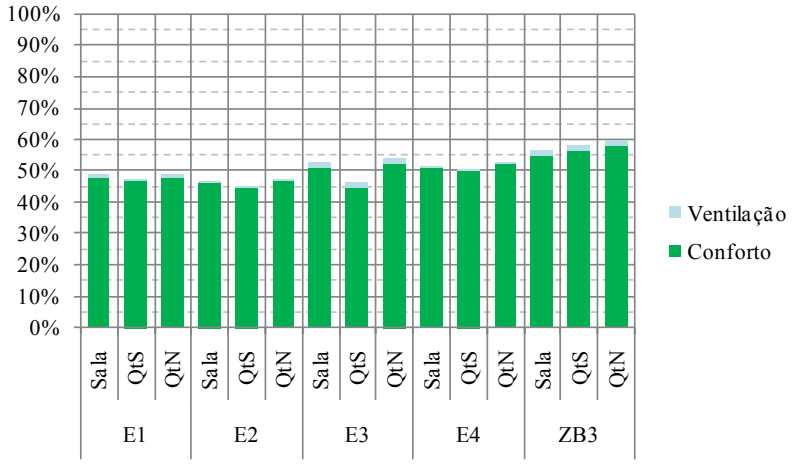


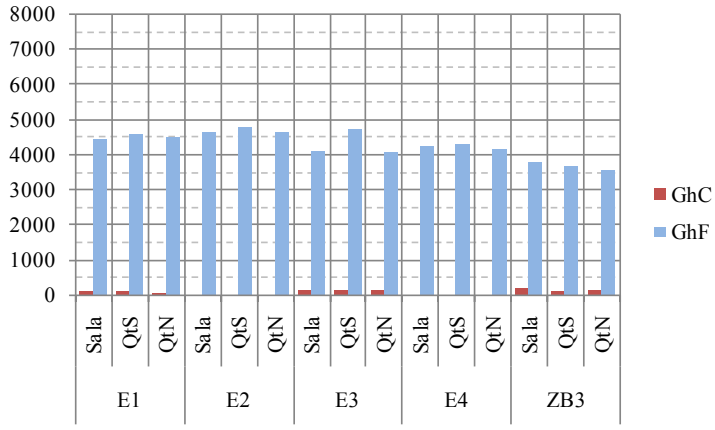
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB3	PLR	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

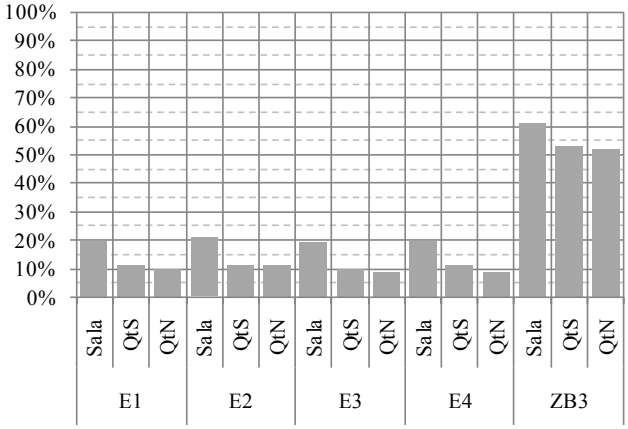
Figura 4-8 - Dados de desempenho no município de Caldas-MG (ZB3 e G4), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

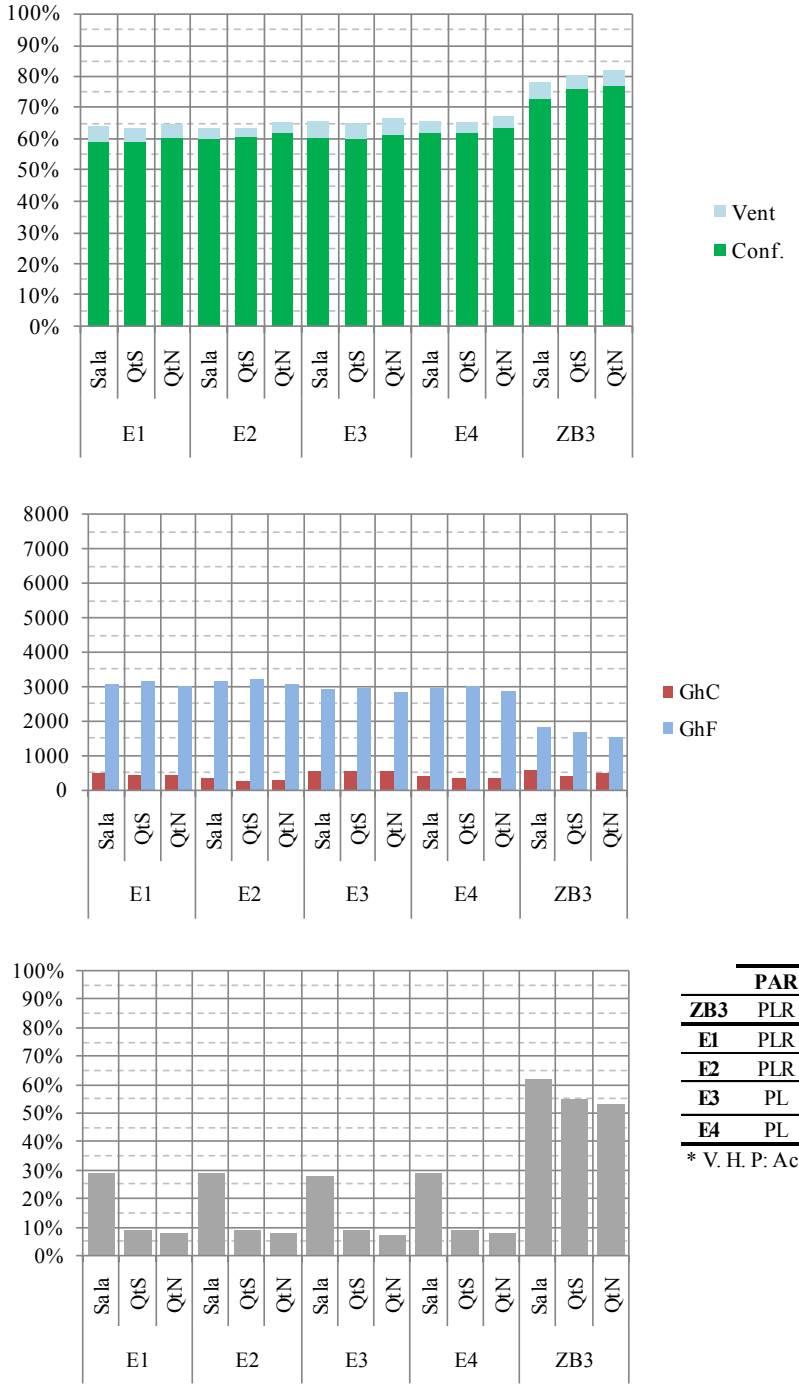


	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB3	PLR	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

Figura 4-9 - Dados de desempenho no município de Chapecó-SC (ZB3 e G7), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.



		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

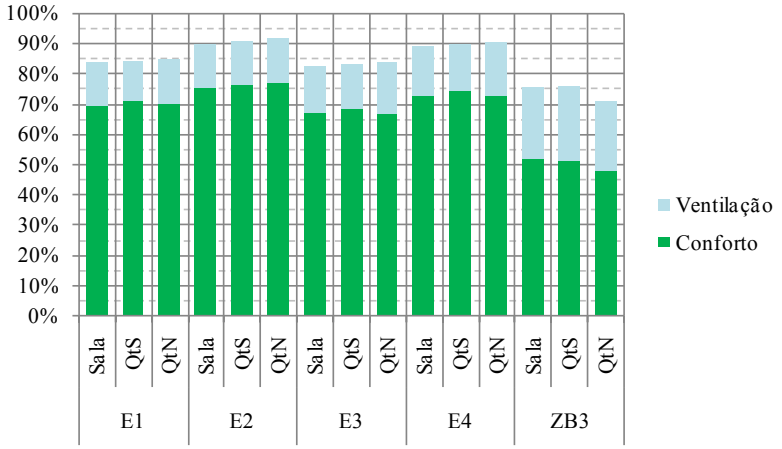
* % A.U: Percentual da área útil

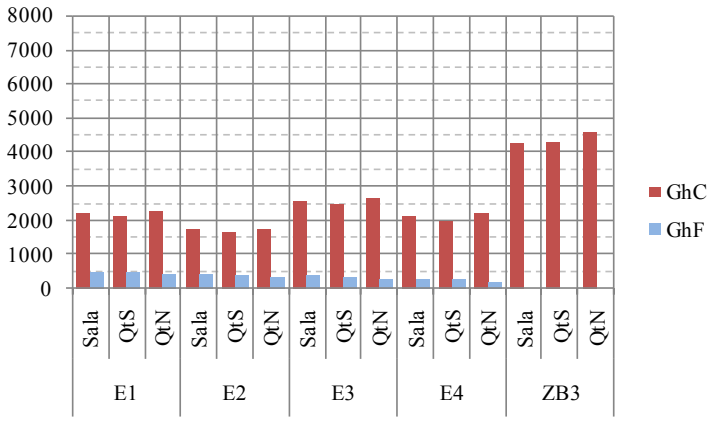
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB3	PLR	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

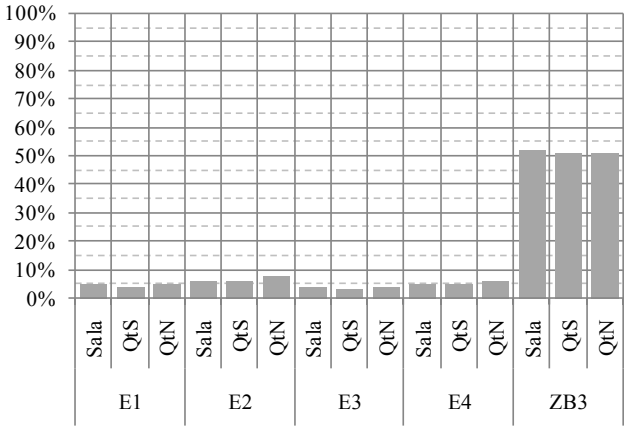
Figura 4-10 - Dados de desempenho no município de Londrina-PR (ZB3 e G15), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

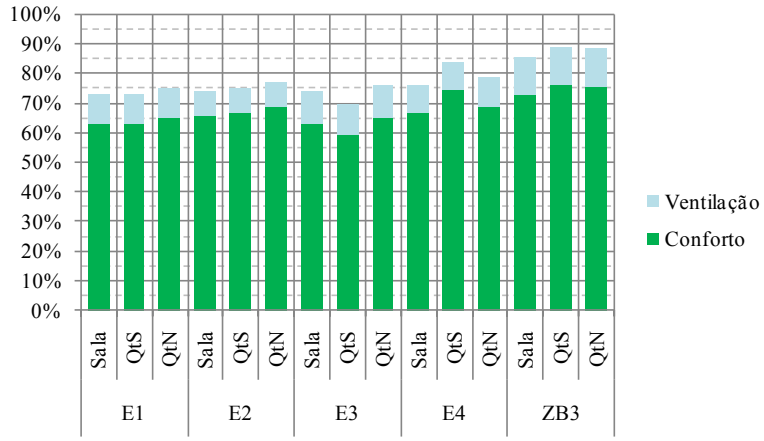


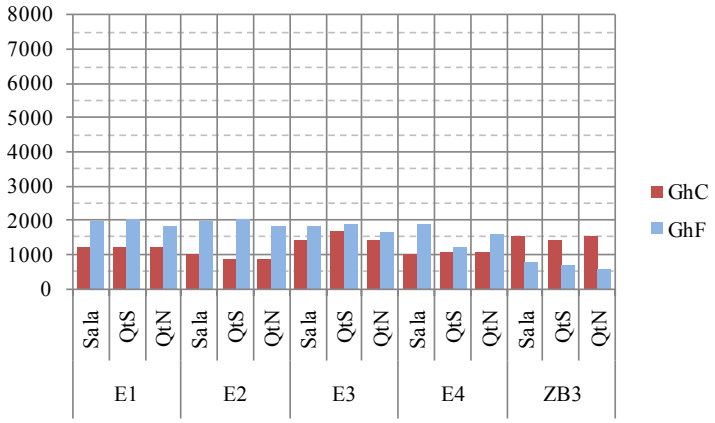
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB3	PLR	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

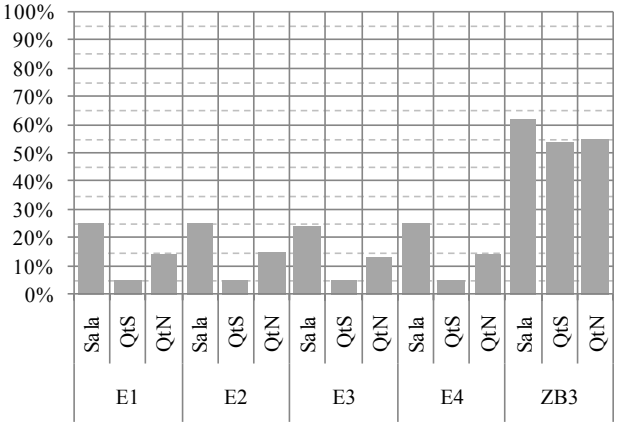
Figura 4-11 - Dados de desempenho no município de Foz do Iguaçu (ZB3 e G16), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB3. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil



	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB3	PLR	C1	M	Verão	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

As diferenças de desempenho apresentadas entre os modelos “E” para São Joaquim-SC (ZB1 e G1a) e Florianópolis-SC (ZB3 e G1b) indicam que é justificada a subdivisão proposta pelo CB3E (2017) para o Grupo Climático 1, dividindo-o em “G1a” e “G1b”.

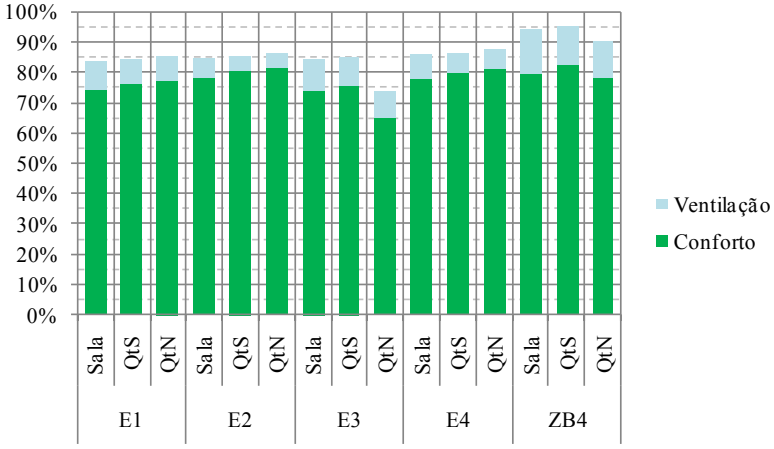
O modelo ZB3 não conseguiu manter a taxa de renovação do ar acima da mínima recomendada entre 50% e 60% do ano, assim como ocorreu com o modelo ZB2. Enquanto nos modelos “E”, o mesmo ocorreu em no máximo 29% do ano, no quarto sul e na sala, em Florianópolis-SC (ZB3 e G1b) e Chapecó-SC (ZB3 e G7). O percentual do ano com taxa de renovação insuficiente chegou a um mínimo de 3% do ano, no quarto sul do modelo E3, em Londrina-PR (ZB3 e G15).

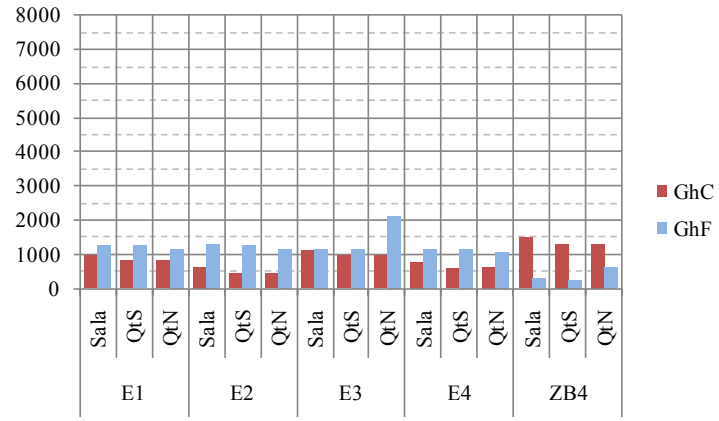
4.1.3 Zona Bioclimática Quatro, Cinco e Seis

Os municípios de Bauru-SP, Governador Valadares-MG, Santos-SP, Triunfo-PE e Espinosa-MG, representaram na amostra as zonas bioclimáticas Quatro, Cinco e Seis. Esses municípios representaram também e respectivamente os grupos climáticos: G9, G11, G12, G13, G23. A Figura 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 mostram dados de desempenho relativos aos três recintos de permanência prolongada (sala de estar e dormitórios) dos quatro modelos ”E” e do modelo “ZB” correspondente a cada um dos seis municípios. Em cada uma das seis figuras, o primeiro gráfico mostra o percentual do ano em conforto, acrescido do percentual anual com potencial para conforto por ventilação. O segundo gráfico nas figuras mostra desconforto por calor e frio em graus-hora-ano. O terceiro e último gráfico em cada figura mostra o percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada.

Nos municípios das zonas Quatro, Cinco e Seis, as médias de conforto foram ainda mais altas que nas zonas anteriores. O desconforto por frio foi mais equilibrado ao desconforto por calor que nas zonas anteriores. Mas foi sutil em Governador Valadares-MG (ZB5 e G9) e Espinosa-MG (ZB6 e G23). O maior valor foi 90% do ano em conforto e ocorreu no quarto sul do modelo E2, em Governador Valadares-MG. O menor valor foi 65% do ano em conforto e ocorreu no quarto norte do modelo E3, em Bauru-SP (ZB4 e G12). Os maiores percentuais do ano em conforto ocorreram com os modelos “ZB” apenas em Santos-SP (ZB5-G13) e Triunfo-PE (ZB6-G11). Nos demais grupos, o modelo E2 alcançou os melhores resultados. No entanto, a maior diferença nos percentuais de conforto, em um mesmo município, foi de 17 pontos percentuais.

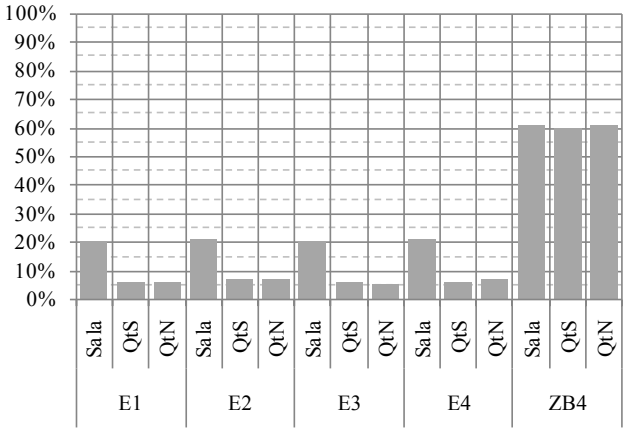
Figura 4-12 - Dados de desempenho no município de Bauru-SP (ZB4 e G12), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB4. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

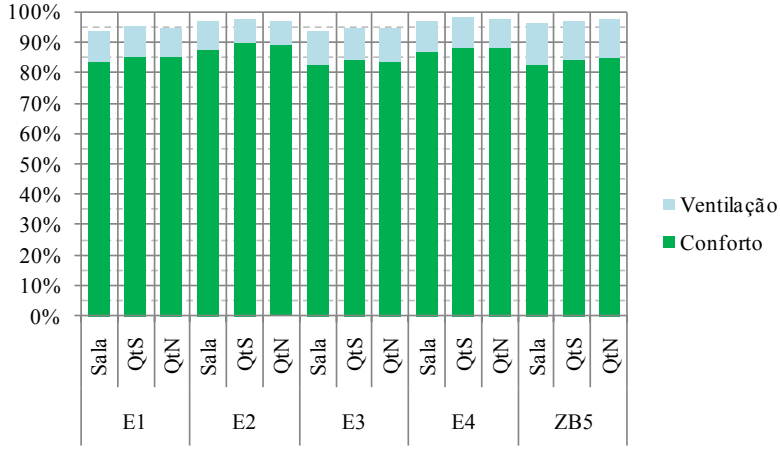


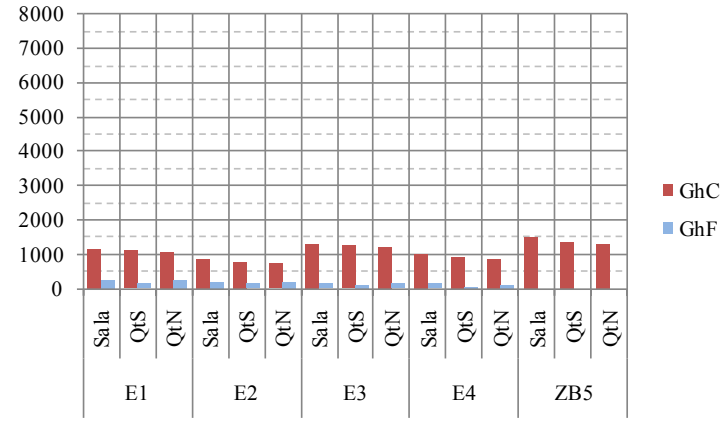
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB4	PP	C1	M	Verão	S. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

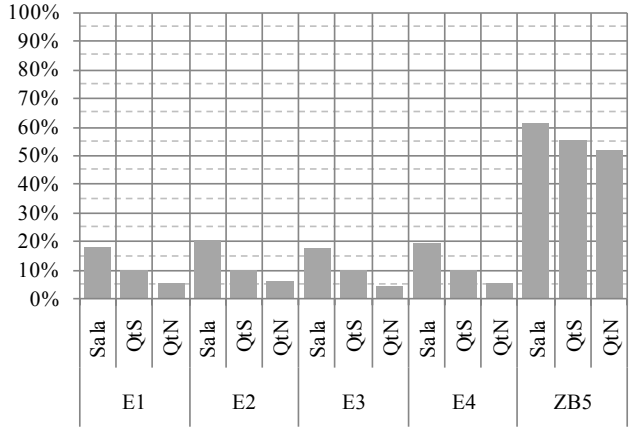
Figura 4-13 - Dados de desempenho no município de Governador Valadares-MG (ZB5 e G9), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB5. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

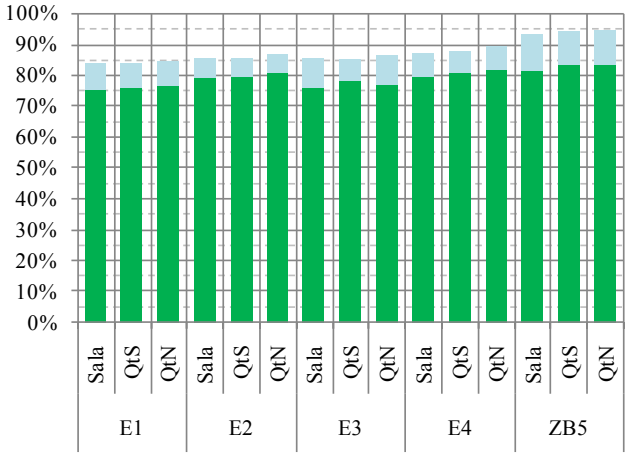


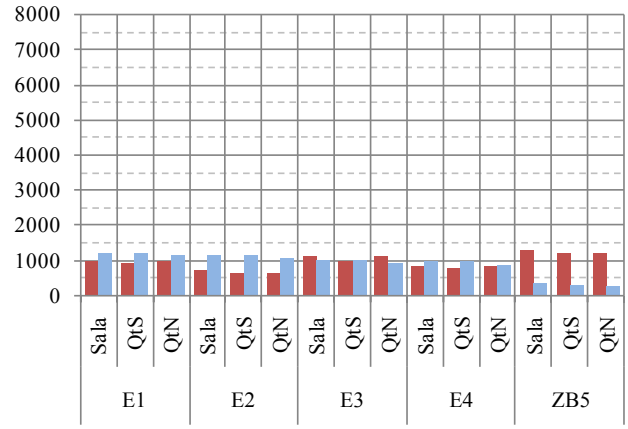
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB5	PLR	C1	M	Sempre	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

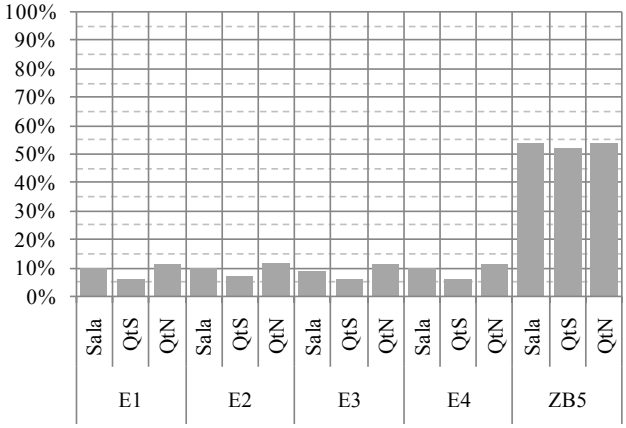
Figura 4-14 - Dados de desempenho no município de Santos-SP (ZB5 e G13), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB5. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

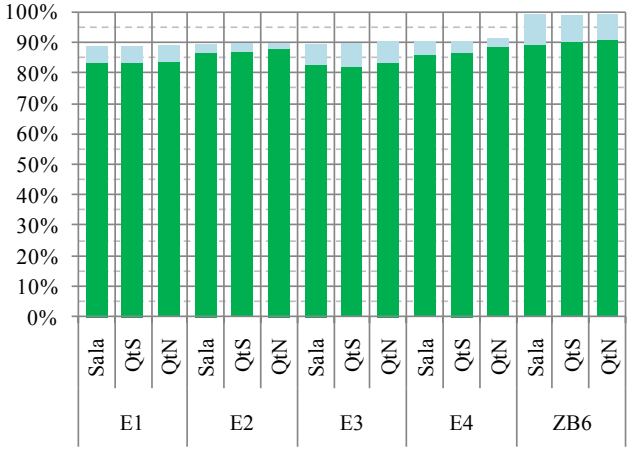


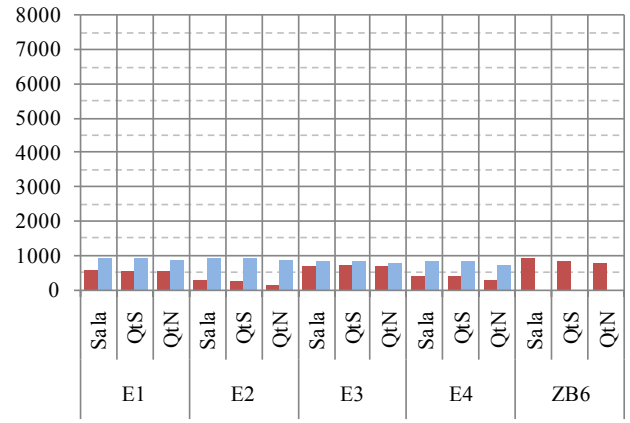
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB5	PLR	C1	M	Sempre	P. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

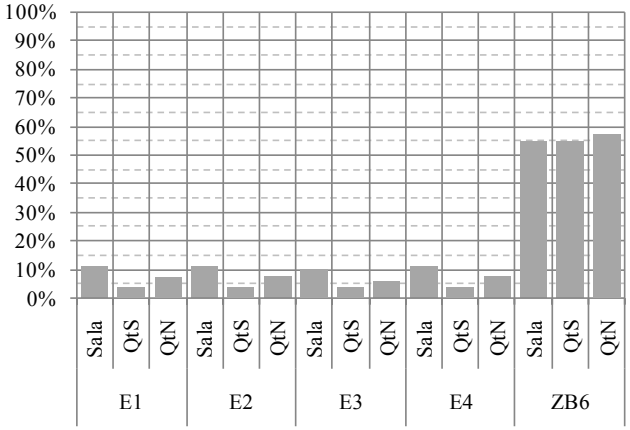
Figura 4-15 - Dados de desempenho no município de Triunfo-PE (ZB6 e G11), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB6. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

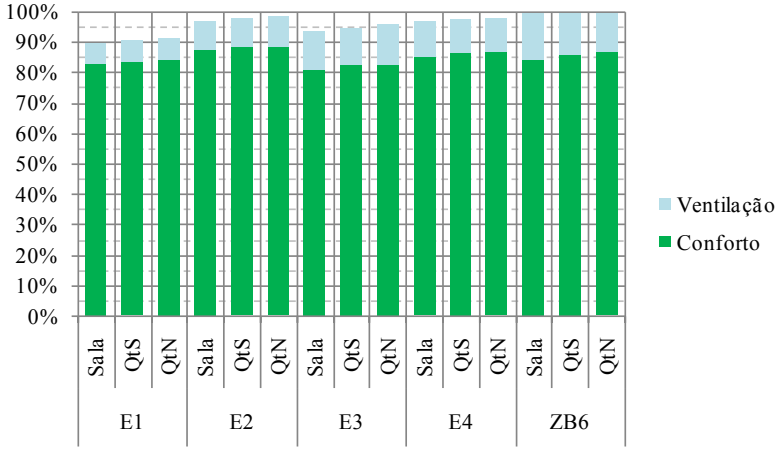


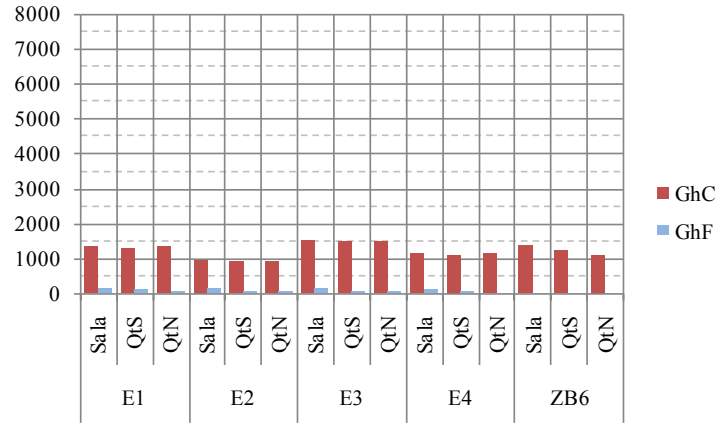
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB6	PP	C1	M	Sempre	S. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

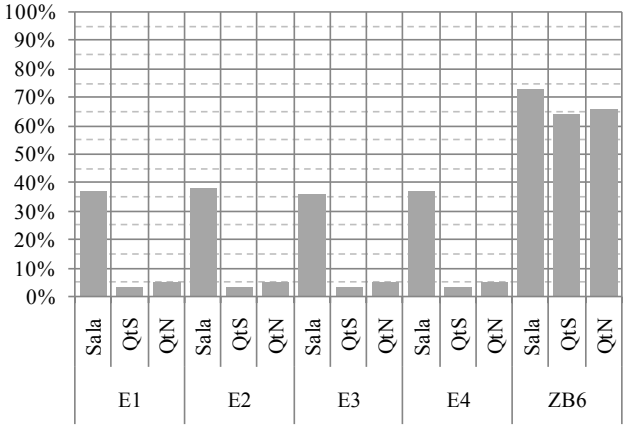
Figura 4-16 - Dados de desempenho no município de Espinosa-MG (ZB6 e G23), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB6. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil



	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB6	PP	C1	M	Sempre	S. Verão
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

Todos os valores de desconforto ficaram abaixo de 1.500 graus-hora-ano, com uma única exceção para o desconforto por frio, no quarto norte do modelo E3, em Bauru-SP (ZB4 e G12). O percentual anual com potencial para conforto por velocidade do ar variou entre cinco e 16 pontos percentuais a mais, em Bauru-SP (ZB4 e G12) e Espinosa-MG (ZB6 e G23), respectivamente.

O percentual de conforto dos modelos "ZB" diferiram em dez pontos percentuais no máximo, apesar das diferenças de envoltória entre os mesmos. O modelo ZB4 tem paredes externas e internas "pesadas". O modelo ZB5 tem envoltória "leve e refletora". Já o modelo ZB6 tem paredes externas "pesadas". Esses modelos têm a mesma área de abertura (Abertura Média, 22% da A. U.), diferindo apenas quanto a sua operação, como apresentado na seção 3.2.1. O modelo ZB4 tem ventilação seletiva e sombreamento apenas na estação quente (primavera e verão). Os modelos ZB5 e ZB6 têm sombreamento sempre, mas ZB5 tem ventilação permanente e ZB6 tem ventilação seletiva, ambos apenas na estação quente (primavera e verão). Esses modelos operam com o fechamento das aberturas durante a estação fria (outono e inverno) e não conseguiram manter taxa de renovação acima da mínima recomendada entre 50% e 70% do ano, similar aos modelos ZB2 e ZB3. Os modelos "E" não conseguiram o mesmo em no máximo 38% do ano, que ocorreu na sala do modelo E2 em Espinosa-MG. Mas nesse mesmo município, no quarto sul do modelo E1, a taxa de renovação mínima não foi alcançada em apenas 3% do ano. Isso indica que o padrão de operação das aberturas foi mas determinante para as diferenças em percentual anual com taxa de renovação insuficiente, que as áreas de abertura.

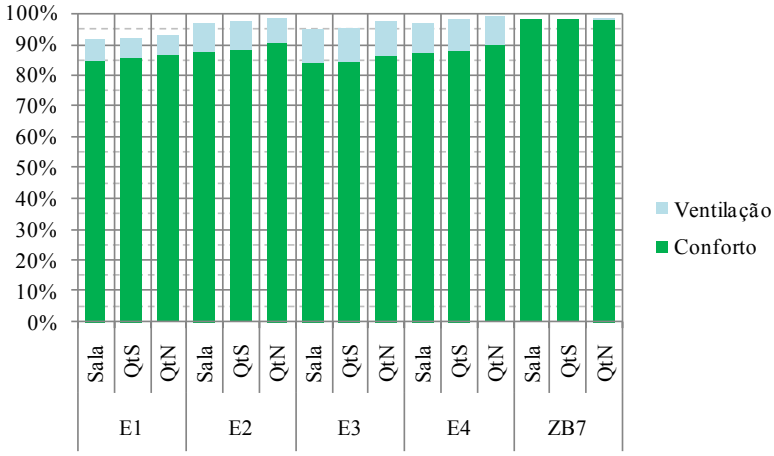
4.1.4 Zona Bioclimática Sete

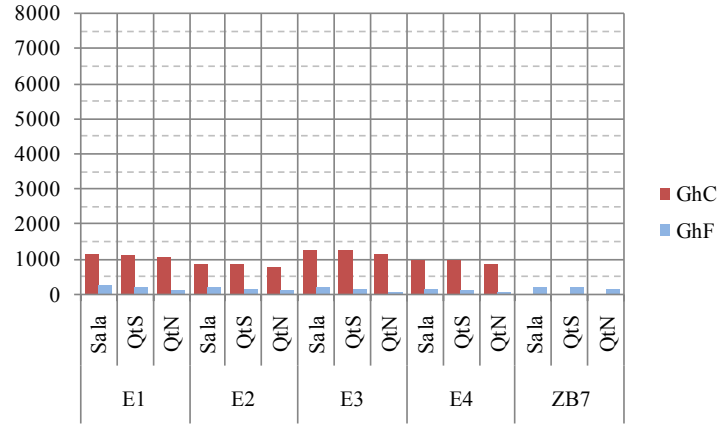
Os municípios Euclides da Cunha-BA, São João do Piauí-PI, Palmas-TO e Mossoró-RN, representaram a Zona Bioclimática Sete na amostra de climas. Esses municípios representaram também e respectivamente os grupos climáticos: G14, G19, G20 e G22. As Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 mostram dados de desempenho relativos aos três recintos de permanência prolongada (sala de estar e dormitórios) dos quatro modelos "E" e do modelo ZB7, nos quatro municípios. Em cada uma das quatro figuras, o primeiro gráfico mostra o percentual do ano em conforto, acrescido do percentual anual com potencial para conforto por ventilação. O segundo gráfico nas figuras mostra o desconforto por calor e frio, em graus-hora-ano. O terceiro e último gráfico em cada figura mostra o percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada.

O modelo ZB7 apresentou o maior percentual do ano em conforto, entre os cinco modelos, nos quatro municípios da Zona Bioclimática Sete. Os percentuais do ano em conforto no município de Euclides da Cunha-BA (ZB7, G14) ficaram acima de 80%, com o modelo ZB7 alcançando 100% do ano em conforto, nos três cômodos de permanência prolongada. A diferença no percentual anual de conforto entre o modelo ZB7 e os demais modelos foi notável em Palmas-TO (ZB7 e G20) e Mossoró-RN (ZB7 e G22), ficando até 30 pontos percentuais acima do segundo maior, que ocorreu sempre no modelo E2. Essa diferença foi de no máximo nove pontos percentuais entre os demais modelos. A máxima diferença entre os cinco modelos foi de 14 e 15 pontos percentuais, nos municípios de Euclides da Cunha-BA (ZB7, G14) e São João do Piauí-PI (ZB7 e G19). Essa variação pequena é notável, uma vez que o modelo ZB7 tem envoltória "pesada", com capacidade térmica consideravelmente superior a dos modelos "E". O desconforto por calor predominou nos cinco municípios e o desconforto por frio foi perceptível apenas em Euclides da Cunha-BA (ZB7, G14) e Mossoró-RN (ZB7 e G22). O potencial para incremento do conforto por velocidade do ar foi notadamente maior nos climas mais quentes: São João do Piauí-PI (ZB7 e G19), Palmas-TO (ZB7 e G20) e Mossoró-RN (ZB7 e G22). O modelo E3 mostrou, no município de São João do Piauí-PI (ZB7 e G19), o maior desconforto por calor em toda a amostra, que foi de 5.141 graus-hora-ano. Nesse município e no modelo ZB7, também ocorreu o mais alto percentual do ano com potencial para conforto por ventilação em toda a amostra, representando um incremento de 41 pontos percentuais.

A taxa de renovação no modelo ZB7 não alcançou a mínima recomendada entre 24% e 53% do ano, valores extremos ocorridos em São João do Piauí-PI e Mossoró-RN, respectivamente. Enquanto os modelos "E" não alcançaram essa taxa mínima entre 1% e 23% do ano. O modelo ZB7 contava com área de abertura de 15% da área útil, operando em ventilação seletiva o ano inteiro, como apresentado na seção 3.2.1. Os modelos "E" tinham área de abertura 22% da área útil, subdividida em aberturas inferiores (de 15% a 16% da área útil), operando em ventilação seletiva, e aberturas superiores (de 6% a 7% da área útil), permanentemente abertas, como apresentado na subseção 3.2.1. O melhor ocorreu com os modelos "E". Isso demonstra a magnitude da contribuição da ventilação higiênica permanente, ainda que por aberturas mínimas. Ainda assim, o modelo ZB7 alcançou melhor resultado que os modelos "ZB" anteriores. Isso demonstra o impacto positivo da ventilação permanente nas taxas de renovação, mesmo sendo seletiva.

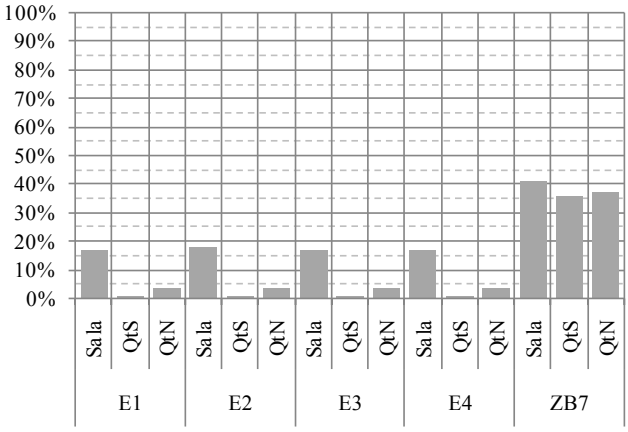
Figura 4-17 - Dados de desempenho no município de Euclides da Cunha-BA (ZB7 e G14), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

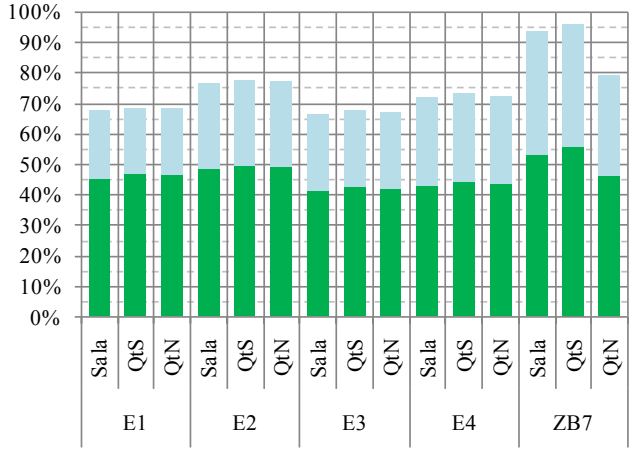


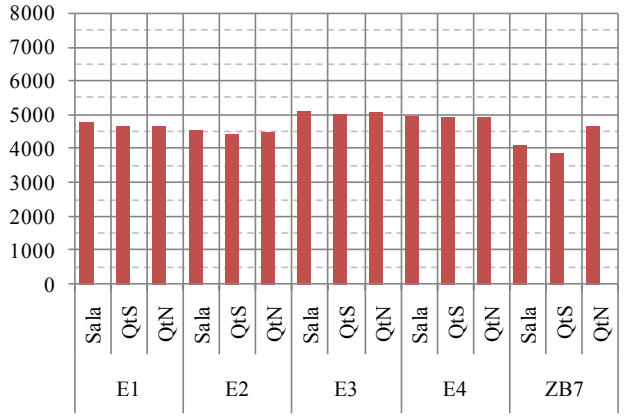
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB7	PP	C2	P	Sempre	Seletiva
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

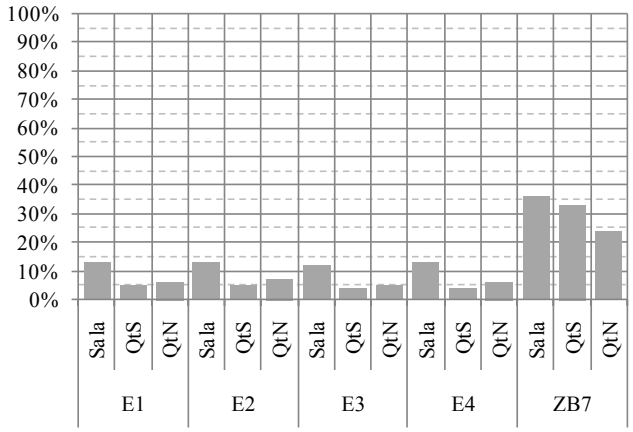
Figura 4-18 - Dados de desempenho no município de São João do Piauí-PI (ZB7 e G19), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

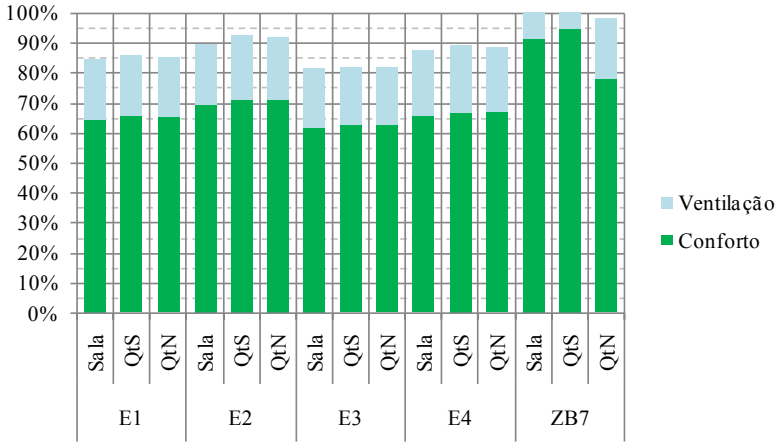


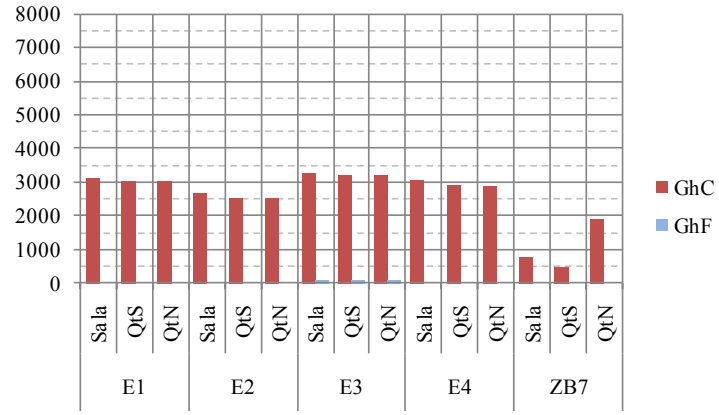
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB7	PP	C2	P	Sempre	Seletiva
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

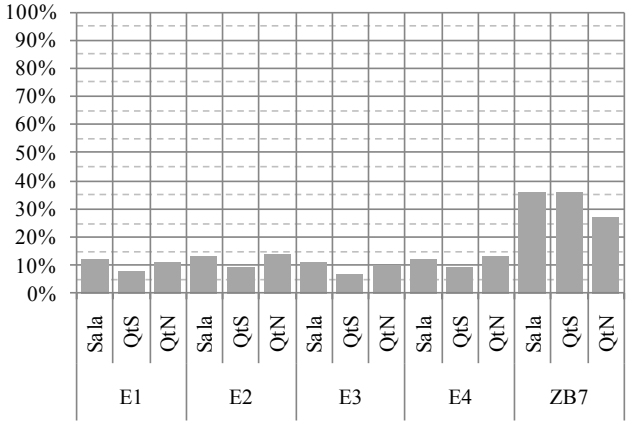
Figura 4-19 - Dados de desempenho no município de Palmas-TO (ZB7 e G20), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

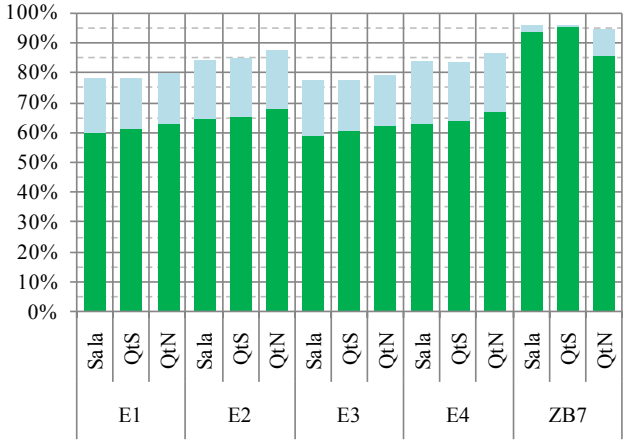


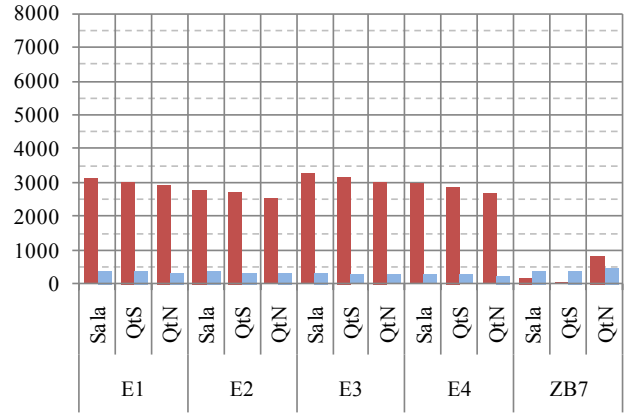
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB7	PP	C2	P	Sempre	Seletiva
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

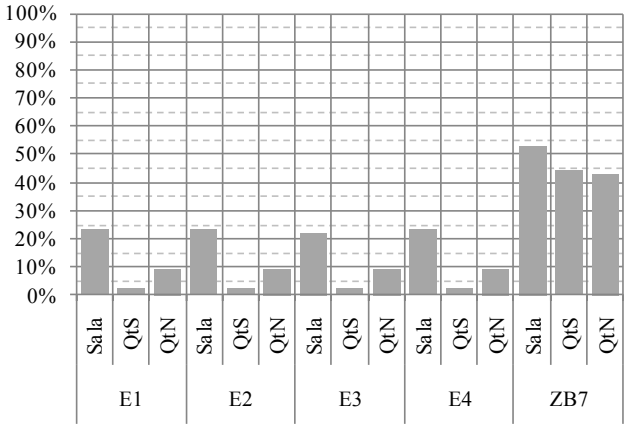
Figura 4-20 - Dados de desempenho no município de Mossoró-RN (ZB7 e G22), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB7. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil



	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB7	PP	C2	P	Sempre	Seletiva
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

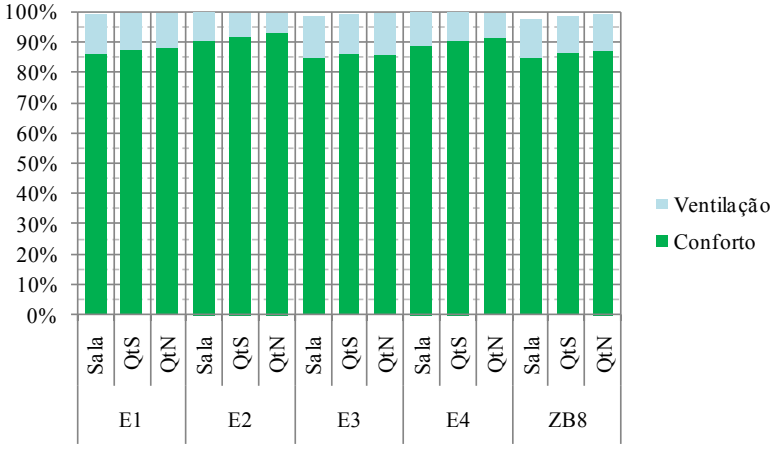
Fonte: O autor.

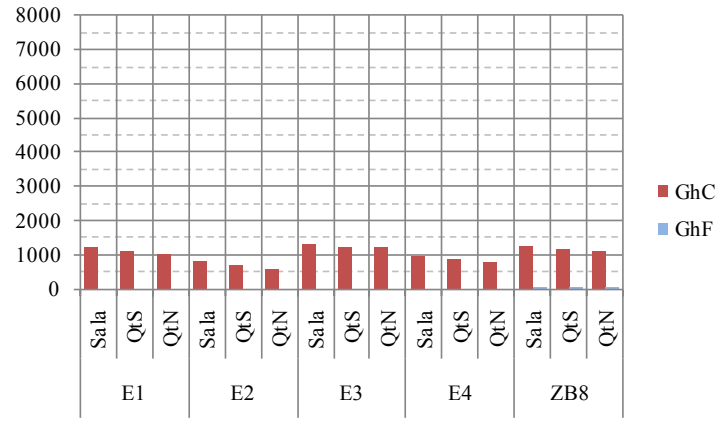
4.1.5 Zona Bioclimática Oito

Os municípios de Campina Grande-PB, Belém-PA, Natal-RN, Maceió-AL, Pão de Açúcar-AL, representaram a Zona Bioclimática Oito na amostra de climas. Esses municípios representaram também e respectivamente os grupos climáticos: G10, G17, G18, G21 e G24. As Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 mostram dados de desempenho relativos aos três recintos de permanência prolongada (sala de estar e dormitórios) dos quatro modelos ”E” e do modelo ZB8, nos quatro municípios. Em cada uma das cinco figuras, o primeiro gráfico mostra o percentual do ano em conforto, acrescido do percentual anual com potencial para conforto por ventilação. O segundo gráfico nas figuras mostra o desconforto por calor e frio, em graus-hora-ano. O terceiro e último gráfico mostra o percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada.

O modelo E2 apresentou o mais alto percentual do ano em conforto, entre os cinco modelos e nos cinco municípios da Zona Bioclimática Oito. O maior percentual em conforto ocorreu no quarto norte do modelo E2, em Campina Grande-PB (ZB8 e G10), e foi de 93% do ano. Mas a maior diferença entre os percentuais anuais em conforto, para um mesmo município, foi de quatorze pontos percentuais. O menor percentual do ano em conforto, o maior desconforto por calor e o maior percentual do ano com potencial para conforto por ventilação ocorreram em Belém-PA (ZB8 e G17) e foi de 57%, 3755 graus-hora-ano e 34 pontos percentuais a mais. O percentual anual em conforto alcançou 100% do ano em alguns cenários de quatro dos cinco municípios, com exceção de Pão de Açúcar-AL, mas desde que acrescido do percentual anual em conforto por ventilação. É notável que o modelo ZB8 não tenha tido o melhor desempenho em nenhum dos municípios integrantes da Zona Bioclimática Oito. Pois o modelo ZB8 tem os mesmos sistemas construtivos de envoltória que o modelo E1, diferindo apenas quanto à área e operação das aberturas. O padrão de conforto foi similar entre esses dois modelos, com diferença máxima de um ponto percentual. Isso ocorreu a despeito da área de abertura no modelo ZB8 ser de 42% da área útil (Abertura “grande”) e ser de 22% da área útil (abertura “média”) no modelo E1. Também, a ventilação é permanente no modelo ZB8 e seletiva combinada com higiênica permanente, no modelo E1, como apresentado na seção 3.2.1. Houve similaridade considerável entre eles também na ventilação higiênica, apesar das diferenças. Algo que não ocorreu nas zonas anteriores. A taxa de renovação chegou a ser suficiente em 100% do ano, para alguns cenários da Zona Bioclimática Oito, mesmo com abertura média (22% de A. U.).

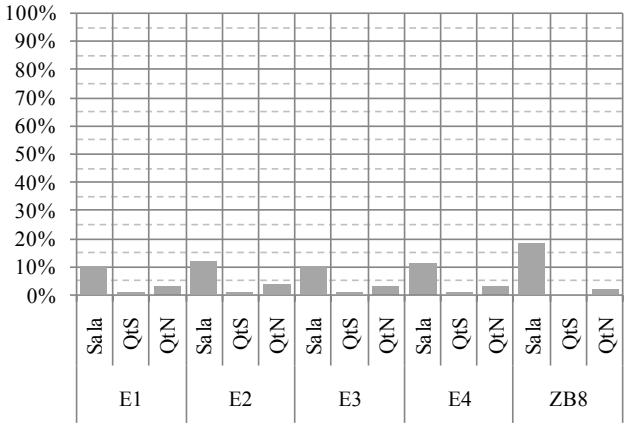
Figura 4-21 - Dados de desempenho no município de Campina Grande-PB (ZB8 e G10), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

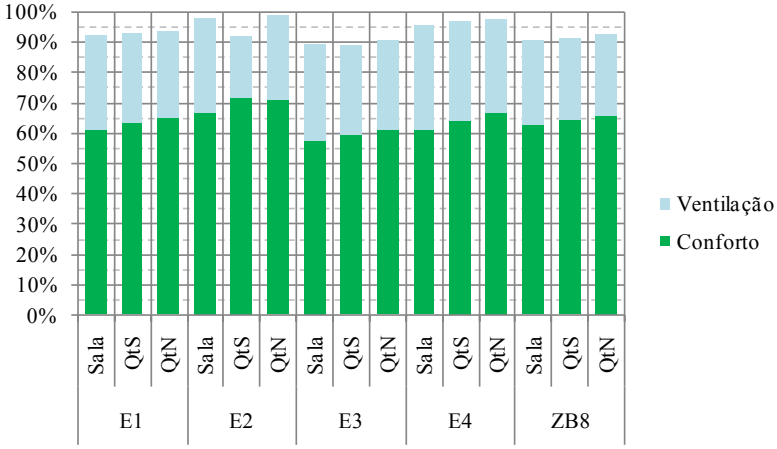


	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB8	PLR	C1	G	Sempre	Permanente
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

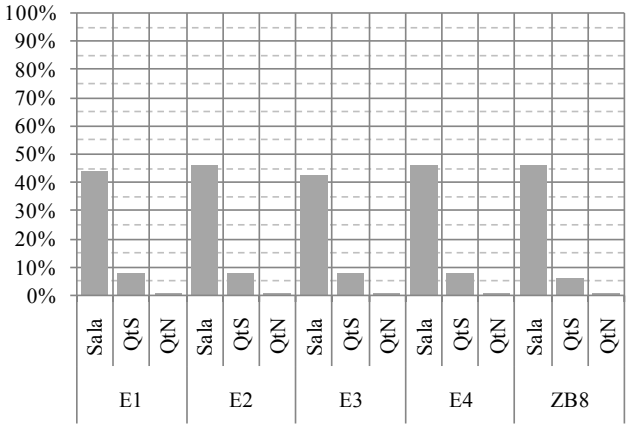
Fonte: O autor.

Figura 4-22 - Dados de desempenho no município de Belém-PA (ZB8 e G17), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.



		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

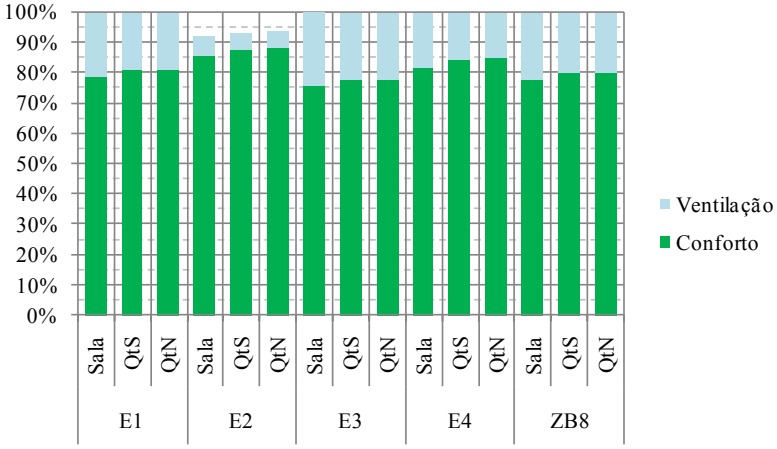


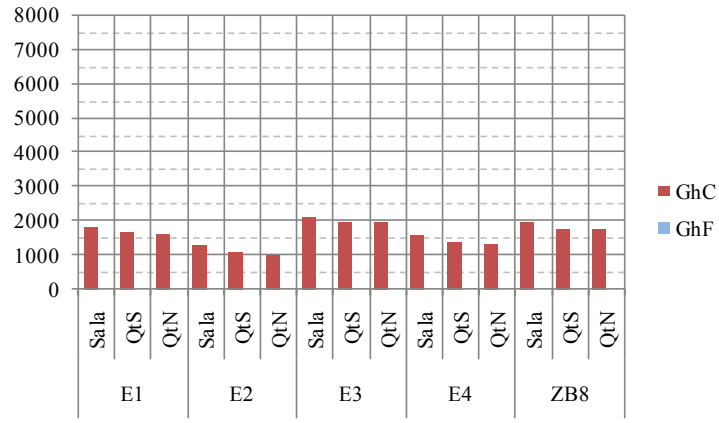
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB8	PLR	C1	G	Sempre	Permanente
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

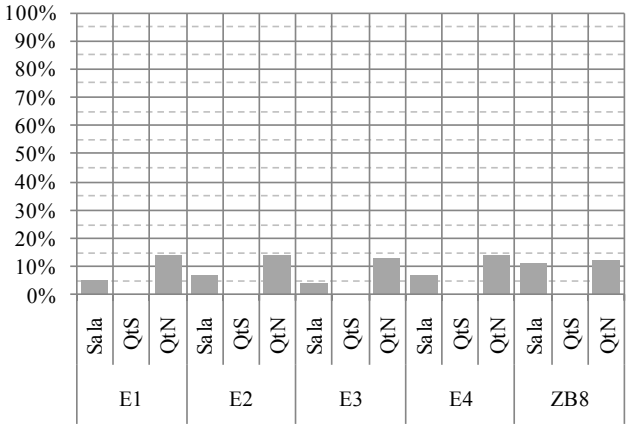
Figura 4-23 - Dados de desempenho no município de Natal-RN (ZB8 e G18), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

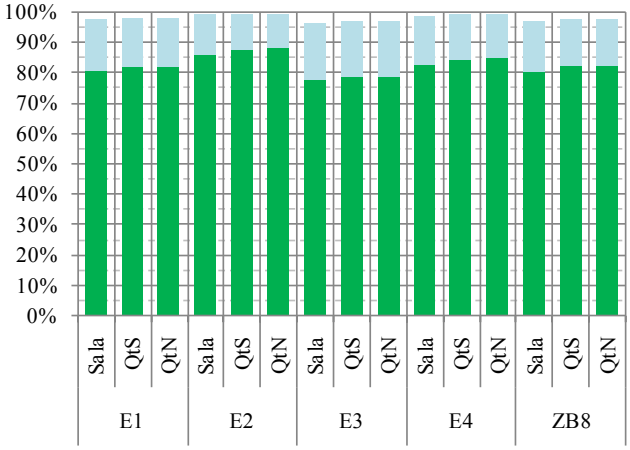


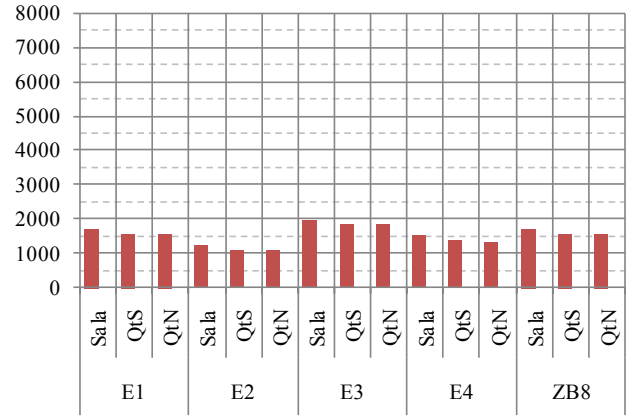
	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB8	PLR	C1	G	Sempre	Permanente
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

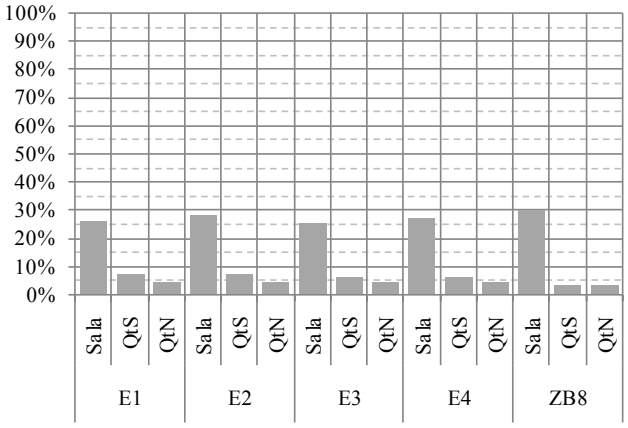
Figura 4-24 Dados de desempenho no município de Maceió-AL (ZB8 e G21), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.





		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

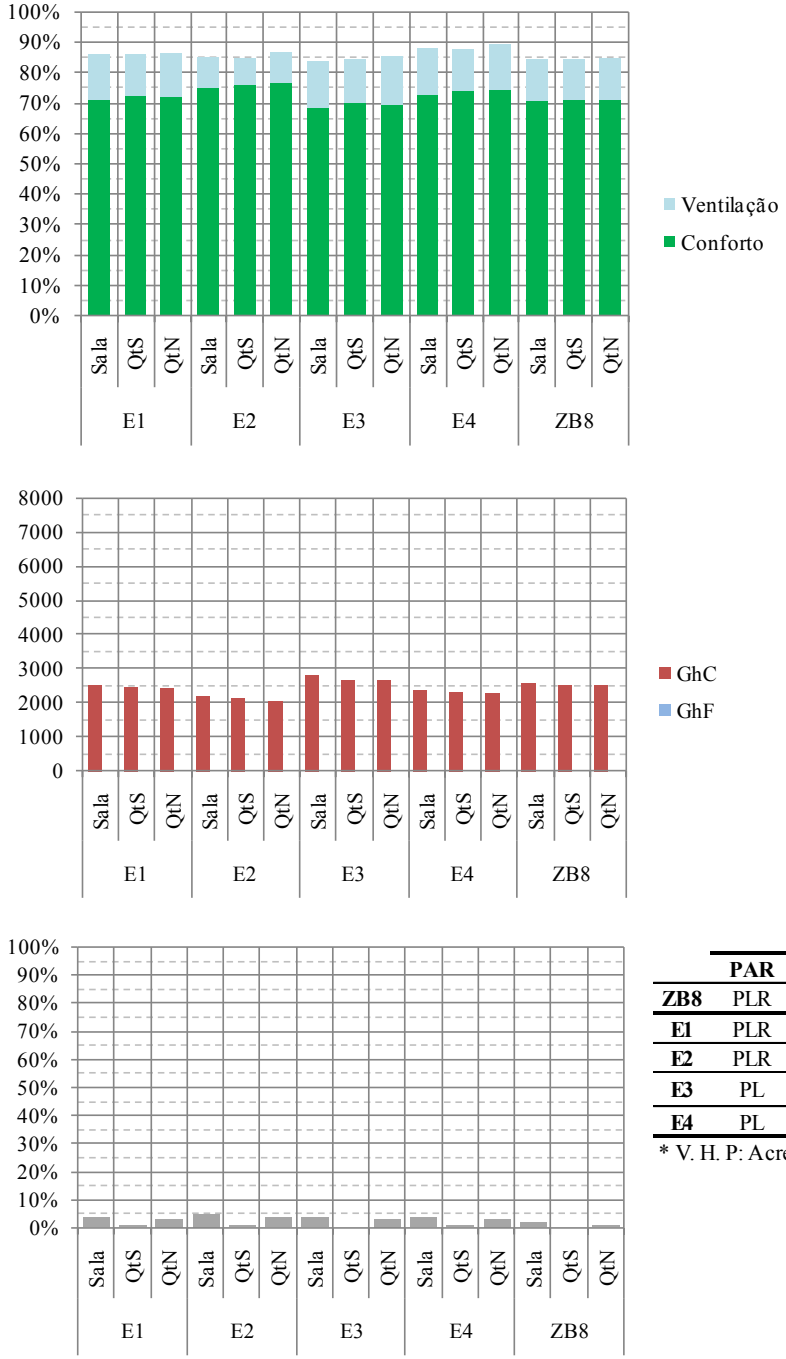


	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB8	PLR	C1	G	Sempre	Permanente
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

Figura 4-25 Dados de desempenho no município de Pão de Açúcar (ZB8 e G24), para os três recintos de permanência prolongada dos modelos: E1, E2, E3, E4 e ZB8. No primeiro gráfico à esquerda, percentual do ano em conforto, acrescido do percentual do ano com possibilidade de conforto por velocidade do ar. No gráfico seguinte, graus-hora-ano de desconforto por calor e frio. No terceiro e último gráfico, percentual do ano com taxa de renovação abaixo da mínima recomendada. Nas tabelas abaixo e à direita, síntese da configuração dos modelos.



		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB8	PLR	C1	G	Sempre	Permanente
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se $T_{ext} \geq 26°$	Seletiva se $T_{int} > 19°$
E3	PL	C1	M		
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

Fonte: O autor.

4.1.6 Análise de eficácia de diretrizes construtivas

O maior percentual do ano em conforto em toda a amostra ocorreu no modelo ZB7, em Euclides da Cunha-BA (ZB7-G14), e foi de 100% do ano em conforto, nos três cômodos. Esse percentual anual em conforto ocorreu apenas nesse cenário e em alguns da Zona Bioclimática Oito, mas apenas se houvesse o aproveitamento total do potencial para conforto por ventilação. Os dormitórios do modelo E2, em São Joaquim-SC (ZB1-G1a), apresentaram o menor percentual, com apenas 11% do ano em conforto. O quarto sul do modelo E2, em São Joaquim-SC, alcançou o maior desconforto por frio em toda a amostra, que foi de 7.808 graus-hora-ano. A sala de estar do modelo E3, em São João do Piauí-PI (ZB7-G19), alcançou o maior desconforto por calor, que foi de 5.141 graus-hora-ano. O maior potencial para incremento da frequência de conforto por velocidade do ar foi de 41 pontos percentuais e ocorreu na sala de estar do modelo ZB7, em São João do Piauí-PI.

Os grupos climáticos de G1 a G8 têm temperatura média anual igual ou menor que 21°C e se concentram na região Sul e em parte da região Sudeste do Brasil, como foi exposto na seção 2.2.2. Os municípios da amostra classificados nesses grupos pertencem às zonas bioclimáticas Um, Dois e Três. O padrão de desempenho apresentado pelos cinco modelos no município de Chapecó-SC (ZB3-G7) foi mais similar ao padrão no município de Santa Maria-RS (ZB2-G8), que ao de outros municípios da Zona Bioclimática Três. Esse tipo de similaridade ocorreu também entre o padrão em Caldas-MG (ZB3-G4) e em Novo Horizonte-SC (ZB2-G5). No entanto, o padrão em São Joaquim-SC (ZB1-G1a) foi bem diferente do padrão em Florianópolis (ZB3-G1b), mesmo com esses municípios pertencendo a grupos climáticos consecutivos, como nos cenários anteriores. Dissimilaridades como essas também foram observadas entre o padrão de desempenho de Curitiba-PR (ZB1-G2) e de São José dos Campos-SP (ZB3-G3) ou entre o de Novo Horizonte-SC (ZB2-G5) e o de Canela-RS (ZB1-G6), como pôde ser visto nas figuras anteriores, da 4.1 a 4.9.

Os grupos climáticos de G9 a G16 têm temperatura média anual entre 21°C e 25°C e se concentram em parte da região Nordeste, na porção mais ao sul da região Centro-Oeste, na porção oeste e litorânea da região Sudeste. Os municípios da amostra nesses grupos climáticos situam-se nas zonas bioclimáticas Três, Quatro, Cinco, Seis, Sete e Oito. O padrão de conforto nos cinco modelos em Bauru-SP (ZB4-G12) foi consideravelmente similar ao de Santos-SP (ZB5-G13). Assim como ocorreu com Governador Valadares-MG (ZB5-G9) e Campina Grande-PB (ZB8-G10). Algumas similaridades foram observadas ainda entre o padrão em Triunfo-PE (ZB6-G11) e Euclides da Cunha-BA (ZB7-G14), como pôde ser visto

nas figuras anteriores, da 4.12 a 4.21. Mas os padrões em Londrina-PR (ZB3-G15) e Foz do Iguaçu-PR (ZB3-G16) foram bem distintos, apesar de estarem na Zona Bioclimática Três e em grupos climáticos sucessivos, como nos cenários anteriores.

Os grupos climáticos entre G17 e G24 têm temperatura média anual acima de 25°C e concentram-se na região Norte do Brasil, na porção norte da região Centro-Oeste, na porção oeste e litorânea da região Nordeste. Os municípios representando esses grupos na amostra pertencem às zonas bioclimáticas Sete e Oito, com exceção apenas para Espinosa-MG (ZB6 e G23), que é parte da Zona Bioclimática Seis. Nesses grupos, as similaridades mais notáveis ocorreram entre Natal-RN (ZB8-G18) e Maceió-AL (ZB8-G21). Os padrões em Palmas-TO (ZB7-G20) e Mossoró-RN (ZB7-G22) foram também notadamente similares. Mas surgiram ainda similaridades com grupos extras, como entre Espinosa-MG (ZB6-G23), Governador Valadares-MG (ZB5-G9) e Campina Grande-PB (ZB8-G10). Isso pôde ser visto nas figuras anteriores, entre 4.16 e 4.24. No entanto, os dados nessa perspectiva não indicam porque tais similaridades ou dissimilaridades ocorreram apenas entre alguns municípios da amostra. Os resultados mostraram que estar na mesma zona bioclimática ou em grupos climáticos sucessivos não determinou que o padrão de desempenho dos modelos fosse similar.

A Tabela 4.1 indica alguns padrões perceptíveis na amostra. Nos grupos de G1a a G8, os melhores desempenhos ocorreram sempre com os modelos "ZB", que representam a adaptação prescrita pela NBR 15220-3 em cada zona bioclimática. O segundo melhor desempenho ocorreu sempre com E3 ou E4. Os piores desempenhos ocorreram com os modelos E1 ou E2, com uma única exceção no município de São José dos Campos-SP (ZB3-G3). No entanto, o modelo E3 tem envoltória equivalente aos modelos ZB1 e ZB2, diferindo apenas quanto à operação das aberturas e inércia das paredes internas. Mas ZB1 e ZB2 apresentaram os melhores desempenhos em suas respectivas zonas, enquanto E3 apresentou o segundo melhor desempenho apenas em São Joaquim-SC (ZB1-G1a) e Canela-RS (ZB1-G6), o terceiro melhor em Novo Horizonte-SC (ZB2-G5) e quarto melhor em Santa Maria-RS (ZB2-G8). Também, o modelo E1 tinha a envoltória equivalente ao modelo ZB3, diferindo deste apenas na operação das aberturas e na inércia das paredes internas. Apesar disso, modelo ZB3 teve o melhor desempenho e o modelo E1 teve o pior, em Florianópolis-SC (ZB3-G1b) e Chapecó-SC (ZB3-G7). É provável que a diferença na operação das aberturas tenha provocado esses resultados, mostrando ter tido maior impacto no desempenho que as diferenças de envoltória testadas. Nos grupos de G9 a G16, os melhores desempenhos ocorreram com os modelos "ZB" ou com o modelo E2. Houve ainda um empate entre os

modelos E2, E4 e ZB4, no município de Bauru-SP (ZB4-G12). O segundo melhor desempenho ocorreu com o modelo E4, com uma única exceção para o município de Euclides da Cunha (ZB7-G14). Os piores desempenhos ocorreram com o modelo E3, com exceções apenas em Santos-SP (ZB5-G13) e Londrina-PR (ZB3-G15). Nos grupos entre G17 e G24, os melhores resultados ocorreram também com os modelos "ZB" ou E2. O segundo melhor desempenho surgiu sempre com o modelo E2 ou E4. Os piores desempenhos ocorreram sempre com o modelo E3.

Tabela 4-1 - Classificação do desempenho dos modelos em cada município da amostra.

	E1	E2	E3	E4	ZB
ZB1-G1a	★★★	★	★★★★	★★	★★★★★
ZB3-G1b	★	★★★★	★★★★	★★★★	★★★★★
ZB1-G2	★	★	★★★★	★★★★	★★★★★
ZB3-G3	★★★	★★★	★★★★	★	★★★★★
ZB3-G4	★★	★	★★★	★★★★	★★★★★
ZB2-G5	★	★★★	★★★	★★★★	★★★★★
ZB1-G6	★★	★	★★★★	★★★	★★★★★
ZB3-G7	★	★★★	★★★	★★★★	★★★★★
ZB2-G8	★	★★★	★★	★★★★	★★★★★
ZB5-G9	★★★	★★★★★	★	★★★★	★
ZB8-G10	★★★	★★★★★	★	★★★★	★
ZB6-G11	★★★	★★★★	★	★★★★	★★★★★
ZB4-G12	★★★★	★★★★★	★	★★★★★	★★★★★
ZB5-G13	★	★★★	★★	★★★★	★★★★★
ZB7-G14	★	★★★★	★	★★★	★★★★★
ZB3-G15	★★★	★★★★★	★★	★★★★	★
ZB3-G16	★★	★★★	★	★★★★	★★★★★
ZB8-G17	★★★	★★★★★	★	★★★★	★★★★
ZB8-G18	★★★	★★★★★	★	★★★★	★★
ZB7-G19	★★★	★★★★	★	★★	★★★★★
ZB7-G20	★★	★★★★	★	★★★	★★★★★
ZB8-G21	★★★	★★★★★	★	★★★★	★★★
ZB7-G22	★	★★★★	★	★★★	★★★★★
ZB6-G23	★	★★★★★	★	★★★★	★★★★
ZB8-G24	★★★	★★★★★	★	★★★★	★★

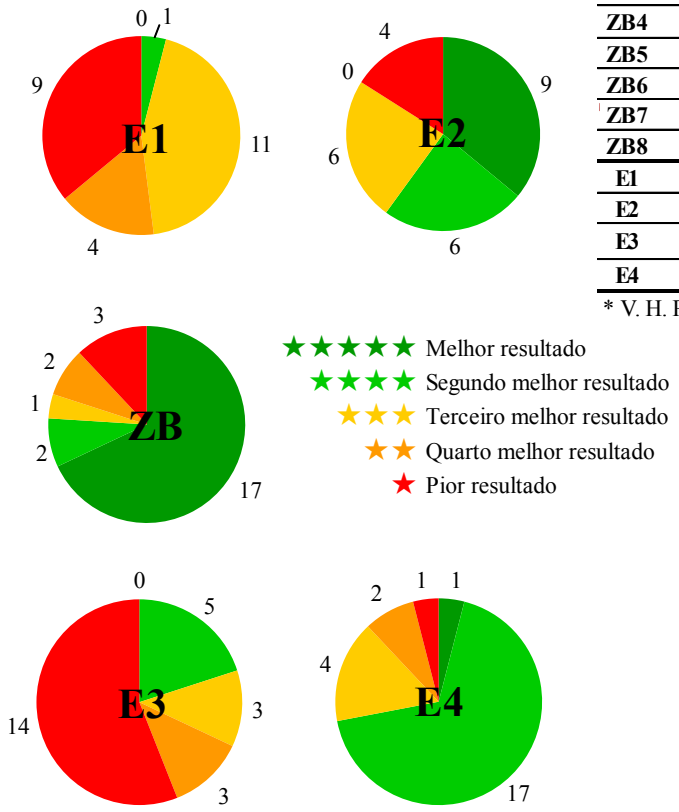
★★★★★ Melhor resultado
★★★★ Segundo melhor resultado
★★★ Terceiro melhor resultado
★★ Quarto melhor resultado
★ Pior resultado

Fonte: O autor.

A Figura 4.26 apresenta uma síntese do resultado dos modelos para a amostra de climas. Os modelos "ZB" tiveram o melhor ou o segundo melhor desempenho em 19 municípios, entre os 25 da amostra. Ainda assim, esses modelos tiveram o pior ou segundo pior resultado em cinco municípios. O modelo E3 foi o mais mal sucedido, apresentando o pior ou o segundo pior desempenho em 17 municípios da amostra. Ainda assim, ele teve o segundo melhor desempenho em cinco municípios. O modelo E4 foi o mais regular, apresentando o melhor ou o segundo melhor desempenho em 18 municípios. E o pior ou

segundo pior desempenho em apenas três municípios. Os modelos E1 e E3 não apresentaram o melhor desempenho em nenhum município. Os modelos E2 e E4 juntos alcançaram o melhor desempenho em dez municípios e o segundo melhor resultado em 23 municípios. Os modelos E1 e E3 juntos alcançaram o pior desempenho em 23 municípios. Embora, nos grupos entre G1a e G8, o segundo melhor desempenho tenha ocorrido sempre com os modelos E3 ou E4.

Figura 4-26 - Síntese da classificação do desempenho dos modelos nos 25 municípios da amostra, à direita. Síntese da configuração dos modelos, à direita.



	PAR	COB	ABER	SOMB	VENT
ZB1	PL	C1	M	Nunca	Nenhuma
ZB2	PL	C1	M	Verão	P. Verão
ZB3	PLR	C1	M	Verão	P. Verão
ZB4	PP	C1	M	Verão	S. Verão
ZB5	PLR	C1	M	Sempre	P. Verão
ZB6	PP	C1	M	Sempre	S. Verão
ZB7	PP	C2	P	Sempre	Seletiva
ZB8	PLR	C1	G	Sempre	Permanente
E1	PLR	C1	M		
E2	PLR	C2	M	Se	Seletiva se
E3	PL	C1	M	$T_{ext} \geq 26°$	$T_{int} > 19°$
E4	PL	C2	M		V. H. P.

* V. H. P: Acrescida de Ventilação Higiênica Permanente

		U	Ct
PAR	**PL**	1.8	161
	PLR	2.4	150
	PP	0.7	183
COB	**C1**	1.8	16
	C2	0.9	23
	CP	0.7	229
		% A.U.	
ABER	**P**	15	
	M	22	
	G	42	

* % A.U: Percentual da área útil

Fonte: O autor.

Ainda assim, a maior diferença no percentual anual em conforto entre os modelos "E" foi de dezessete pontos percentuais, em toda a amostra, e ocorreu entre o quarto norte dos modelos E2 e E3, em Bauru-SP (ZB4 e G12). A diferença entre os modelos "ZB" e o modelo que apresentou o segundo melhor desempenho chegou a um máximo de 27 pontos percentuais, entre o quarto sul do modelo E2 e o do modelo ZB7, em Mossoró-RN (ZB7 e G22). No total de cenários onde o modelo ZB teve o melhor desempenho, a diferença entre

ele e o segundo melhor foi de mais de dez pontos percentuais apenas nos municípios de São Joaquim-SC (ZB1 e G1a), Florianópolis-SC (ZB3 e G1b), Curitiba-PR (ZB1 e G2), São José dos Campos-SP (ZB3 e G3), Canela-RS (ZB1 e G6), Chapecó-SC (ZB3 e G7), Palmas-TO (ZB7 e G20) e Mossoró-RN (ZB7 e G22). Mas os resultados não esclarecem porque essas diferenças mais notáveis ocorreram apenas nesses nove municípios. O par de modelos E2 e E4 se diferenciavam do par E1 e E3, por sua cobertura de maior resistência e capacidade térmica. Enquanto o modelo E3 se diferencia do modelo E1 por suas paredes externas de maior resistência e capacidade térmicas. Como visto anteriormente, o par de modelos E2 e E4 foram os mais regulares quanto ao desempenho nos diferentes climas da amostra. O modelo E4 tem paredes e cobertura de maior resistência e capacidade térmicas. Ele foi individualmente o modelo com desempenho mais regular. Enquanto o modelo E1 foi isoladamente o mais mal sucedido. Isso indica que, entre os sistemas construtivos comparados, os de maior resistência e capacidade térmicas demonstraram maior potencial para alcançar melhores resultados, na maior parte dos grupos climáticos, mesmo respeitando os limites contidos nas diretrizes construtivas do RTQ-R (INMETRO, 2012), da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) e no padrão construtivo corrente em HIS no Brasil.

A eficácia superior apresentada pelos modelos “ZB” pode indicar o potencial da adaptação prescrita na NBR 15220-3 para incrementar as frequências de conforto. No entanto, algumas opções de sistemas construtivos entraram em conflito com o critério de padrão construtivo para HIS. Como exemplo, apenas o modelo ZB5 se enquadrou totalmente no padrão construtivo referencial adotado. Os demais modelos “ZB” fizeram uso de sistemas que envolviam soluções como alvenaria dupla, laje maciça de concreto, telhas termoacústicas ou área de abertura acima de 40% da área útil. Essas soluções não fazem parte do repertório usado no padrão construtivo corrente em HIS no Brasil, segundo as referências adotadas na presente análise. Portanto, esses resultados sugerem que o alcance de frequências médias de conforto mais elevadas em HIS por meios passivos seria estimulado pela revisão do critério de padrão construtivo. Os limites de custo adotados nesse caso poderiam tomar como base o custo de operação da unidade e a satisfação dos usuários em longo prazo, além do já utilizado: custo de produção da unidade.

4.1.7 Análise da ventilação higiênica

Os resultados da comparação entre a taxa de renovação dos modelos "ZB" e dos modelos "E" podem ser agrupados em quatro padrões. O primeiro padrão corresponde aos cenários envolvendo os modelos ZB1, adaptado aos climas segundo a NBR 15220-3, que recomenda não ventilar os edifícios durante todo o ano. Isso fez com que a taxa de renovação ficasse abaixo da mínima recomendada em 99% do ano ou mais. A média anual da taxa de renovação foi de menos de uma renovação por hora. Os modelos "E", que têm ventilação seletiva contínua combinada com ventilação higiênica permanente, não conseguiram manter a taxa de ventilação acima da mínima entre 7% e 42% do ano, nas mesmas condições.

O segundo padrão corresponde aos cenários envolvendo os modelos de ZB2 a ZB6, que têm ventilação seletiva ou permanente apenas na estação quente (primavera e verão). Essa única mudança em relação ao modelo ZB1 fez com que as médias anuais de taxa de renovação subissem para valores entre 30 e 50 renovações por hora, ficando agora com taxas abaixo da mínima entre 51% e 73% do ano. Já os modelos "E" não conseguiram manter sua taxa de renovação acima da mínima entre 0% e 42% do ano, nas mesmas condições.

O terceiro padrão envolve os modelos ZB7, que têm "ventilação seletiva" contínua ao longo do ano, por aberturas "pequenas" (15% da A. U.). Esse modelo não conseguiu manter a taxa de renovação acima da mínima entre 24% e 53% do ano, tendo melhor resultado que os modelos "ZB" anteriores, mesmo com área de abertura menor. Os modelos "E" não conseguiram alcançar taxa suficiente entre 1% e 23% do ano, nas mesmas condições.

O quarto padrão corresponde aos cenários envolvendo o modelo ZB8, que tem "ventilação permanente" por aberturas "grandes" (42% da A. U.). Tanto esse modelo quanto os modelos "E" não conseguiram manter a taxa de renovação acima da mínima entre 0% e 46% do ano. Isso ocorreu mesmo com a média anual de taxa de renovação variando entre 36 e 282 renovações por hora, em ZB8, e entre 16 e 145 renovações por hora, nos modelos "E".

Esses resultados demonstram que a operação das aberturas teve impacto significativo na ventilação higiênica, haja vista os melhores desempenhos dos modelos "E", em relação aos modelos "ZB", mesmo tendo área de abertura igual ou menor. Isso pode ser observado na diferença entre o padrão de ventilação higiênica do modelo ZB1 e o padrão dos modelos de ZB2 a ZB6, embora todos tivessem a mesma área de abertura. O padrão de ventilação dos modelos "E" mostrou-se mais eficaz para manter as taxas de renovação acima da mínima o longo do ano, quando comparado ao padrão de ventilação sazonal dos modelos "ZB". A

exceção foi modelo ZB8, cujas aberturas “grandes” (42% da A. U.) demonstraram desempenho equivalente ao dos modelos “E”, de abertura “média” (22% da área útil), mesmo com a média anual de taxa de renovação em ZB8 sendo o dobro da média dos modelos “E”. Isso indica que há um limite para a autonomia da ventilação natural higiênica, além do qual não vale a pena aumentar a área de abertura e consequentemente a média de taxa de renovação. É provável que isso ocorra devido à frequência local de baixas velocidades do vento em algumas direções ou períodos de calmaria, com leituras de velocidades do vento abaixo de 0,5 m/s.

Assim, apenas alguns cenários simulados na Zona Bioclimática Oito alcançaram 100% autonomia da ventilação natural para manutenção da qualidade do ar interno, seja com aberturas “grandes” ou “médias”. Nos demais cenários, algum suplemento de ventilação mecânica seria necessário para manter as taxas de renovação acima da mínima e não prescindir da qualidade do ar em nenhuma hora do ano. Equipamentos como insufladores de ar poderiam se encarregar dessa tarefa. Mas esse suplemento afetaria as trocas por convecção, o amortecimento térmico e tenderia a modificar os percentuais de confortos. A eficácia superior apresentada pelos modelos “ZB” esteve sempre associada aos piores desempenhos da ventilação higiênica. A correção artificial das vazões, necessária para manter a qualidade do ar, afetaria negativamente o desempenho desses modelos. Permanece a questão sobre quanto o desempenho dos modelos “ZB” seria afetado por esse suplemento de ventilação higiênica. O efeito seria mais notável no modelo ZB1, onde esse suplemento precisaria atuar o ano inteiro. Um impacto menor, mais ainda considerável, seria certamente observado nos modelos de ZB2 a ZB7, que necessitariam de suplemento por cerca de metade do ano.

4.2 Análise da ventilação natural de resfriamento

Todos os cenários analisados onde surgiu desconforto por calor perceptível apresentaram também um potencial para elevar o percentual anual em conforto por meio da ventilação. A efetivação desse potencial por ventilação natural depende das velocidades do ar, que dependem da interação entre ventos locais e geometria do modelo. A contribuição efetiva da ventilação natural para o percentual anual em conforto foi avaliada segundo o método de conforto adaptativo da norma norte-americana *ANSI/ASHRAE Standard 55* (ASHRAE, 2017), a partir da velocidade média do ar no interior dos recintos, como exposto na Tabela 2-1, da seção 2.1.3. A obtenção das velocidades médias horárias nos cenários simulados dependia da

validação do procedimento proposto na seção 3.3.5, do capítulo3, antes que o mesmo fosse aplicado às amostras da pesquisa.

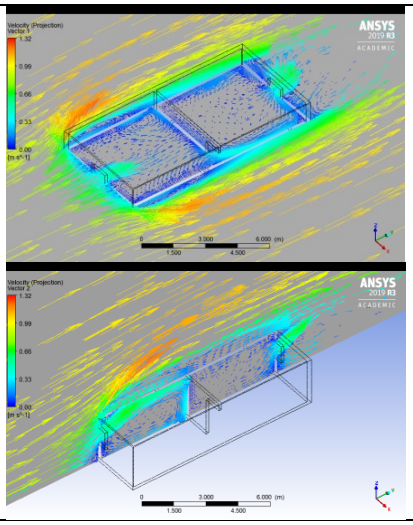
4.2.1 Resultados do teste de incerteza na estimativa de velocidades do ar

Os resultados do teste do referido procedimento está descrito nesta seção, em quatro etapas de análise. A primeira usou dados de velocidade do ar para incidência do vento a 0°, em três velocidades e nos dois ambientes. Esses dados mostraram que a variação do coeficiente de ventilação chegou a 0,03, no valor máximo para o ambiente a barlavento, e a 0,02, no desvio padrão para o ambiente a sotavento. A Tabela 4.2 mostra esses dados em dois níveis de precisão (0,0 e 0,00). Os coeficientes médios apresentaram-se constantes, na precisão de um décimo (0,0).

Tabela 4-2 - Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a 0°.

Precisão 0,00	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1 m/s	2 m/s	5 m/s	1 m/s	2 m/s	5 m/s
Médio	0.22	0.22	0.21	0.19	0.19	0.20
Mínimo	0.05	0.06	0.05	0.02	0.02	0.03
Máximo	0.39	0.40	0.42	0.48	0.47	0.47
Desvio Padrão	0.13	0.13	0.13	0.15	0.15	0.17

Precisão 0,0	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1 m/s	2 m/s	5 m/s	1 m/s	2 m/s	5 m/s
Médio	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Mínimo	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Máximo	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Desvio Padrão	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2

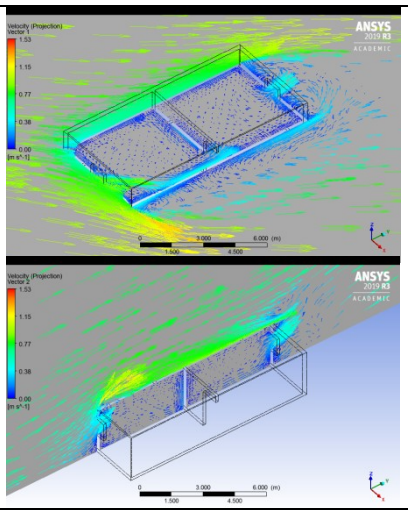


Fonte: O autor.

A segunda etapa de análise enfocou os dados de velocidade do ar para incidência do vento a 45°, no mesmo contexto anterior. Esses dados também mostraram uma variação dos coeficientes de ventilação de 0,03, no valor máximo para o ambiente a barlavento, e de 0,02, no valor máximo para o ambiente a sotavento. A Tabela 4.3 mostra esses dados em dois níveis de precisão. Os coeficientes apresentaram-se constantes na precisão de um décimo (0,0), também para essa incidência.

Tabela 4-3 - Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a 45°.

Precisão 0,00	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1 m/s	2 m/s	5 m/s	1 m/s	2 m/s	5 m/s
Médio	0.25	0.25	0.25	0.14	0.14	0.14
Mínimo	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
Máximo	0.75	0.77	0.78	0.33	0.35	0.35
Desvio Padrão	0.24	0.24	0.24	0.11	0.11	0.12
Precisão 0,0	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1m/s	2m/s	5m/s	1m/s	2m/s	5m/s
Médio	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Máximo	0.8	0.8	0.8	0.3	0.3	0.3
Desvio Padrão	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1

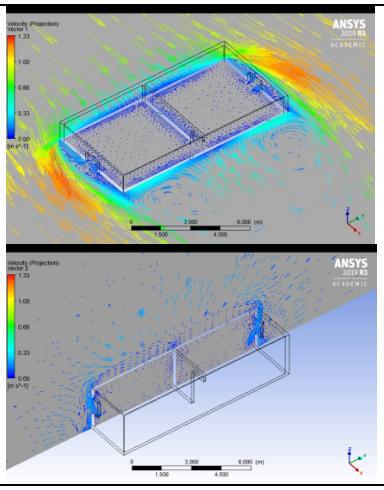


Fonte: O autor.

A terceira etapa analisou dados para vento na incidência 90°. A Tabela 4.4 mostra que a variação dos coeficientes chegou a 0,01, no desvio padrão a barlavento e no valor máximo a sotavento. O valor do coeficiente de ventilação médio apresentou-se constante novamente, na precisão 0,0. Isso ocorreu mesmo nessa condição, onde a diferença de pressão entre as aberturas é quase nula, para qualquer velocidade de vento.

Tabela 4-4 - Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a 90°.

Precisão 0,00	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1 m/s	2 m/s	5 m/s	1 m/s	2 m/s	5 m/s
Médio	0.07	0.07	0.07	0.03	0.03	0.03
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Máximo	0.26	0.26	0.26	0.12	0.11	0.11
Desvio Padrão	0.08	0.08	0.09	0.03	0.03	0.03
Precisão 0,0	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1 m/s	2 m/s	5 m/s	1 m/s	2 m/s	5 m/s
Médio	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Máximo	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1
Desvio Padrão	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0



Fonte: O autor.

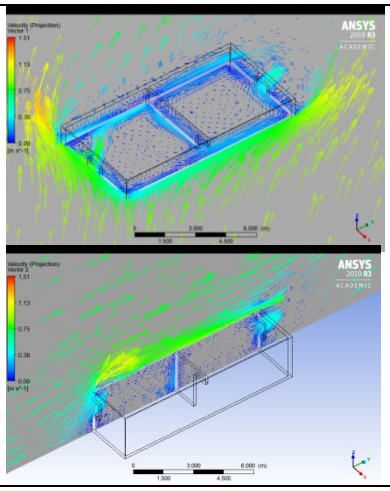
A quarta etapa analisou os dados de vento na incidência a -45°. A Tabela 4.5 mostra que a variação do coeficiente de ventilação chegou a 0,03, no valor máximo para ambiente a

barlavento e a sotavento. Os coeficientes apresentaram-se constantes mais uma vez, na precisão de um décimo (0,0).

Tabela 4-5 - Coeficientes de ventilação médios, mínimos, máximos e desvio padrão, para vento incidente a -45°.

Precisão 0,00	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1 m/s	2 m/s	5 m/s	1 m/s	2 m/s	5 m/s
Médio	0.26	0.26	0.26	0.16	0.16	0.17
Mínimo	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04
Máximo	0.75	0.76	0.78	0.38	0.39	0.41
Desvio Padrão	0.24	0.24	0.25	0.12	0.13	0.13

Precisão 0,0	Ambiente a Barlavento			Ambiente a Sotavento		
	1 m/s	2 m/s	5 m/s	1 m/s	2 m/s	5 m/s
Médio	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
Mínimo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Máximo	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4
Desvio Padrão	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1



Fonte: O autor.

As quatro etapas de análise mostraram que o valor do coeficiente de ventilação médio, na precisão de centésimos (0,00 m/s), variou um máximo de 0,03 para as diferentes velocidades e direções de vento. Isso ocorreu mesmo considerando valor mínimo, máximo e desvio padrão, na malha de pontos. Assim, na precisão de décimos (0,0), a variação do valor do coeficiente médio de ventilação pode ser considerada desprezível, para velocidades do vento entre 1 m/s e 5 m/s, a 1,5 m acima do terreno. Isso significa que, nesse nível de precisão e nessas condições, o coeficiente de ventilação médio para uma direção do vento e geometria de edifício específicas pode ser considerado invariável em função de velocidade do vento. O referido nível de precisão representa então a magnitude da incerteza na previsão da velocidade média do ar no ambiente, por meio de coeficientes médios de ventilação e a partir de dados horários de velocidade e direção do vento. Esse nível de precisão é o mesmo usado para definir os intervalos de velocidade média do ar, no método de avaliação do conforto térmico da *ANSI/ASHRAE Standard 55* (ANSI; ASHRAE, 2017).

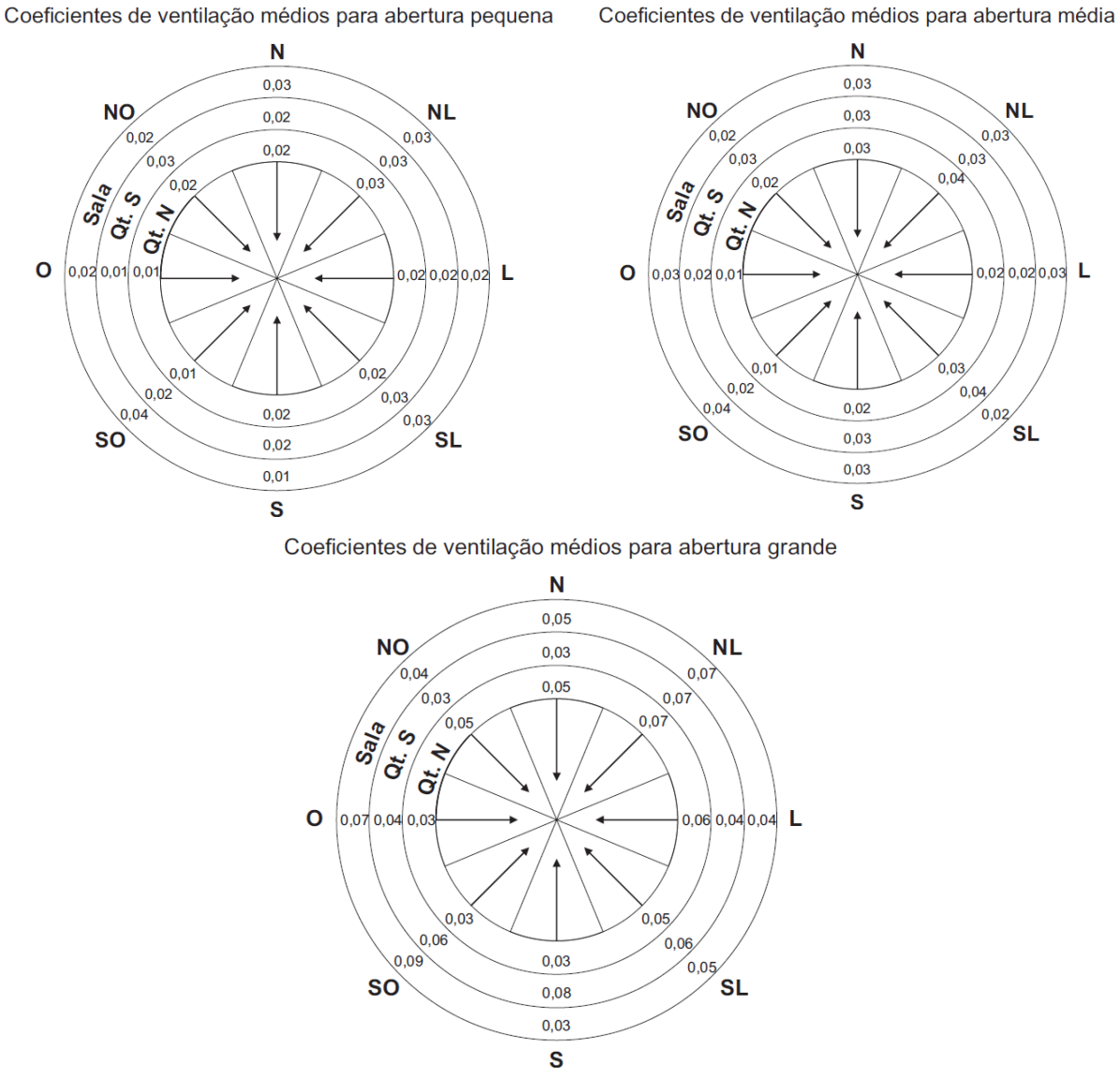
O maior coeficiente de ventilação médio encontrado no teste foi 0,3, que ocorreu para vento a -45° de incidência, no espaço a barlavento. O coeficiente máximo foi 0,8, que ocorreu no espaço a barlavento, com vento a 45º e -45° de incidência. A área das aberturas externas equivale a apenas 4% da área útil, sendo uma abertura relativamente pequena que oferece

maior resistência e provoca má distribuição interna do fluxo de ar. Isso tende a gerar médias de velocidade mais baixas e maiores desvios padrão.

4.2.2 Estimativa das velocidades do ar no ambiente interno

Após a confirmação da eficácia do procedimento testado, o mesmo foi usado na estimativa das velocidades médias do ar nas amostras. A Figura 4.27 mostra os coeficientes médios obtidos, para oito direções do vento, em três ambientes de três modelos, com aberturas pequenas (15% da A. U.), médias (22% da A. U.) e grandes (42% da A. U.).

Figura 4-27 - Coeficientes de ventilação médios calculados a partir das velocidades simuladas.



Fonte: O autor.

O maior coeficiente de ventilação encontrado foi 0,09, que ocorreu apenas para o espaço da sala, no modelo com aberturas grandes (42% da área útil) e ventos na direção sudoeste. O desvio padrão desses coeficientes médios variou entre 0.002 e 0.042, em todos os cenários analisados. A posição da malha de pontos, a 0,75 m do piso e mais baixo que o peitoril das janelas, contribui para que esses valores médios não fossem mais elevados. No entanto, o posicionamento da malha levou em consideração a altura onde a corrente de ar tende a ter maior contribuição para o resfriamento fisiológico de usuários sentados ou deitados, como ocorre frequentemente em salas de estar e dormitórios. É provável que um elemento como peitoril ventilado (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2005) tivesse promovido maiores velocidades do ar nesse nível, gerando coeficientes de ventilação mais altos, mesmo sem aumentar a área de abertura. O peitoril ventilado é um elemento que consta entre as bonificações do RTQ-R (INMETRO, 2012) para unidades autônomas.

4.2.3 Contribuição efetiva da ventilação para o conforto térmico

A proposta do presente trabalho foi estimar a velocidade média horária do ar em cada cenário multiplicando as velocidades horárias do vento no arquivo climático pelo coeficiente de ventilação médio de cada ambiente do modelo, para a respectiva direção do vento, como proposto na seção 3.3.6 do capítulo3 e mostrado na figura anterior 3.10 da seção 3.3.7.

O potencial para incremento do conforto por velocidade do ar variou de nulo, em São Joaquim-SC (ZB1-G1a), a 41 pontos percentuais, em São João do Piauí-PI (ZB7-G19). Ele chegou a ser de dez pontos percentuais em climas onde o desconforto por frio foi predominante, como em Curitiba-PR (ZB1-G2), Florianópolis-SC (ZB3-G1b) e São José dos Campos-SP (ZB3-G3). O mesmo variou entre 20 e 41 pontos percentuais nos climas mais quentes, onde o desconforto por frio foi desprezível, como em Belém-PA (ZB8-G17), Natal-RN (ZB8-G18), São João do Piauí-PI (ZB7-G19), Palmas-TO (ZB7-G20) e Mossoró-RN (ZB7-G22). Ele foi proporcional ao desconforto por calor em todos os cenários e o percentual de 100% do ano em conforto poderia apenas ser alcançado na Zona Bioclimática Oito, mas desde que esse potencial de conforto por velocidade do ar fosse completamente explorado. A única exceção foi o modelo ZB7 em Euclides da Cunha-BA (G14) e em Palmas-TO (G20). No entanto, as velocidades médias do ar interno estimadas ficaram abaixo de 0,6 m/s em todos os cenários avaliados, devido ao valor dos coeficientes e às velocidades do vento. Essas velocidades foram insuficientes para o resfriamento fisiológico dos ocupantes, já que o método de conforto adaptativo da norma norte-americana *ANSI/ASHRAE Standard 55*

(ASHRAE, 2017) desconsidera a ocorrência desse resfriamento com velocidades do ar abaixo de 0,6 m/s. Os dados do Apêndice A mostram que a média mensal de velocidade do vento na maioria dos municípios fica entre 2 m/s e 4 m/s. Essas velocidades médias equivalem a 0,5 m/s e 1 m/s, quando corrigidas pelo gradiente de vento para a altura das aberturas dos modelos (1,5 m do terreno), considerando rugosidade de centro urbano. Isso explica as baixas velocidades médias do ar interno, uma vez que o maior coeficiente de ventilação encontrado para os modelos foi de 0,09.

As aberturas grandes no modelo ZB8, com área equivalente a 42% da área útil, não promoveram maior aproveitamento do potencial para conforto por velocidade do ar, devido às condições dos ventos locais e aos baixos coeficientes de ventilação. Então, o potencial para incremento do conforto por velocidade do ar não foi totalmente explorado a partir da ventilação natural. O uso de ventiladores de teto poderia ser uma alternativa para garantir a efetivação desse potencial no incremento do conforto, já que uma velocidade de 1,2 m/s seria suficiente para esse objetivo (ASHRAE, 2017). Esses equipamentos já constam entre as bonificações para avaliação de eficiência energética no RTQ-R (INMETRO, 2012), para unidades autônomas. A ventilação mecânica para resfriamento não afetaria as taxas de renovação, nem as trocas por convecção e o amortecimento térmico, como ocorreria com ventilação mecânica higiênica. Seu efeito seria apenas o de incrementar percentual anual em conforto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este é o capítulo final do presente trabalho e confronta conclusões alcançadas e objetivos almejados. Ele apresenta ainda as principais contribuições ao campo de estudo, questões remanescentes sobre o tema analisado, limitações dos procedimentos realizados e possíveis desenvolvimentos futuros.

O objetivo do trabalho foi avaliar a eficácia de diretrizes construtivas e de operação de abertura estabelecidas em normas brasileiras, para HIS unifamiliar, a partir de abordagem adaptativa do conforto térmico, de parâmetros de velocidade e de qualidade do ar interno. A proposição de normas no Brasil não tem considerado esses indicadores na análise de eficácia, para definição de diretrizes de projeto. O método definiu uma amostra de modelos, que representou a tipologia e as diretrizes abordadas. Simulação computacional gerou os dados usados nas análises, a partir da amostra de modelos e climas. Os resultados mostraram a magnitude dos percentuais do ano em conforto e da intensidade do desconforto, a partir de soluções induzidas pelas normas brasileiras. O conforto ocorreu em mais da metade do ano, com exceção dos cenários nos climas mais frios e mais quentes da amostra. Os menores percentuais do ano em conforto ocorreram nos climas mais frios, pois o desconforto por frio alcançou valores mais elevados que o desconforto por calor, nos climas mais quentes. A diferença nas frequências de conforto entre recintos foi relativamente pequena, apesar das diferenças de orientação entre eles. Os resultados mostraram ainda que cenários pertencentes à mesma zona bioclimática não apresentaram sempre um padrão similar de desempenho.

Atender aos requisitos da NBR 15220-3 para atraso térmico e área de abertura induziu a seleção de alternativas não condizentes com o padrão construtivos corrente em HIS atualmente no Brasil, conforme o referencial adotado no trabalho. Por outro lado, o resultado com os modelos em acordo com a NBR 15575, com RTQ-R e limitados pelo padrão construtivo de referência mostrou os sistemas construtivos de maior resistência e capacidade térmica tendo o melhor ou o segundo melhor desempenho, em toda a amostra de climas. E isso ocorreu mesmo quando esses modelos diferiam das diretrizes da NBR 15220-3. A opção de envoltória de maior resistência e capacidade térmica em paredes ou em paredes e cobertura mostrou maior eficácia na promoção do conforto nos grupos climáticos com temperatura média anual de até 20°C. Nos demais grupos climáticos, a maior eficácia foi mostrada pelas opções de envoltória com maior resistência e capacidade térmica na cobertura ou em paredes e cobertura.

O padrão de operação das aberturas mostrou ter impacto considerável nos percentuais do ano em conforto. As recomendações da NBR 15220-3 para operação de aberturas provocaram baixa autonomia da ventilação natural higiênica nos modelos. Os modelos “ZB” tiveram o melhor ou o segundo melhor desempenho em termos de conforto, na maior parte dos climas da amostra. Mas também tiveram o pior desempenho em termos de qualidade do ar, em toda a amostra. A combinação de ventilação natural seletiva contínua para resfriamento, por aberturas médias, com ventilação natural higiênica permanente, por aberturas “mínimas”, mostrou-se mais eficaz para manutenção da qualidade do ar, mostrando ser equivalente à ventilação permanente, por aberturas “grandes”. As diretrizes para área de abertura em normas brasileiras estimam esse desempenho com base apenas em área de abertura. Os resultados apresentados pelo modelo com área de abertura ”grande” mostraram haver um limite, além do qual o aumento da permeabilidade do modelo não provoca maior autonomia da ventilação natural higiênica. Esses resultados mostraram também que o alcance de 100% do ano com taxa de renovação suficiente ocorreu em função dos ventos locais e não da área de abertura. Assim, o uso de ventilação mecânica higiênica seria necessário para suplementar as taxas de renovação e manter a qualidade aceitável do ar o ano todo, na maioria dos cenários avaliados. Mas essa solução afetaria as trocas de calor por convecção e o amortecimento térmico, interferindo negativamente no percentual anual em conforto do edifício. Essa interferência seria particularmente notável nos cenários que demonstraram menor autonomia da ventilação natural higiênica. Permanece a questão sobre quanto o desempenho seria afetado por esse suplemento.

O potencial para incremento do conforto por velocidade do ar foi proporcional ao desconforto por calor e chegou a ser de dez pontos percentuais, em climas amenos, e de 20 a 41 pontos percentuais, nos climas mais quentes, tanto nos úmidos quanto nos mais secos. Esse desempenho é estimado por normas brasileiras apenas com base em área de abertura. O percentual de 100% do ano em conforto apenas pôde ser alcançado em alguns cenários, nos climas mais quentes, mas desde que o potencial de conforto por ventilação fosse completamente explorado. As velocidades do vento não foram suficientes para isso em toda a amostra de climas, devido aos baixos coeficientes de ventilação dos modelos, mesmo com área de abertura “grande” e ventilação cruzada. Assim, o uso de ventiladores para garantir o aproveitamento total desse potencial mostrou-se necessário nos cenários testados.

Os procedimentos definidos para avaliar conforto térmico pela abordagem adaptativa, considerando critérios de velocidade e qualidade do ar, atenderam aos objetivos. As correções

aplicadas ao método da *ANSI/ASHRAE Standard* 55 permitiram ponderar o efeito no conforto da umidade do ar e de adaptações do usuário ao desconforto por frio. O critério de vazão mínima adotado permitiu avaliar o impacto na qualidade do ar de diretrizes de área e operação de abertura, que recomendam a suspensão da ventilação. O procedimento proposto para estimar as velocidades do ar a partir de dados climáticos foi útil em viabilizar o estudo da contribuição efetiva da ventilação natural no percentual do ano em conforto. Trabalhos futuros poderão aplicar esse método na comparação de diferentes envoltórias sob uma mesma condição de ventilação, já que os resultados mostraram o impacto significativo desta na conclusão da análise de eficácia. O método poderá ainda ser aplicado para comparar diferentes condições de ventilação em uma mesma envoltória, a fim de investigar a eficácia de diretrizes para operação de aberturas.

A presente investigação assumiu limitações quanto ao tamanho da amostra de climas e modelos. Então, apenas um clima em cada grupo climático foi selecionado e apenas algumas possibilidade induzidas pelas diretrizes das normas foram escolhidas, a fim de conter o tamanho das amostras. Trabalhos futuros poderão aplicar o mesmo método na avaliação de eficácia de diretrizes em diferentes climas, dentro de um mesmo grupo climático. Os resultados aqui mostraram apenas que não houve correspondência entre a classificação em oito zonas bioclimáticas e os padrões de desempenho observados. Trabalhos futuros poderão ainda avaliar alternativas além daquelas coincidentes com o padrão construtivo praticado atualmente no Brasil, já que esse critério mostrou-se mais restritivo que as recomendações das normas. O teste de soluções além dos limites desse critério poderia contribuir na promoção do aperfeiçoamento das tipologias correntes em HIS unifamiliar. A avaliação do impacto de tais soluções no custo de produção das unidades ou sua compatibilização com limites de custo de produção poderia ocorrer posteriormente às conclusões sobre sua eficácia.

Espera-se que essas considerações colaborem com o avanço das pesquisas no campo da adaptação do edifício ao clima, para maior conforto por meios passivos. Espera-se contribuir em especial para o aperfeiçoamento dos métodos prescritivos, devido a sua influência no ensino e prática de projeto arquitetônico.

6 REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações: Parte 3 - Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **ABNT NBR 16401.** Instalações de ar-condicionado-sistemas centrais e unitários, Parte 3-qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **ABNT NBR 15575.** Edifícios habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **3º Projeto revisão ABNT NBR 16401-2.** Instalações de ar-condicionado - sistemas centrais e unitários: parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **ABNT CB 002 NBR 15575**-Projeto de emenda: EMENDA 1. Rio de Janeiro, 2021.

ALMEIDA, L. S. S. et al. Avaliação da envoltória de habitações de interesse social de Florianópolis de acordo com o método prescritivo do RTQ-R In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XII ENCAC, VIII ELACAC, 2013, Brasília. **Anais**: Brasília, ANTAC, 2013.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, 2014.

AMARANTE, O. A. C. D. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Camargo Schubert, TrueWind Solutions, CEPEL, Eletrobrás, MME, 2001.

AMORIM, A. C.; CARLO, J. C. Análise das propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro: estudo de caso de Colatina, ES. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 373, 2017.

ANDRADE, N. C. D. **Estudo da ventilação natural em edificações com captadores de vento multidirecionais por meio de ensaios em túnel de vento e simulações computacionais.** (2013). Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

ANDRÉ, M. et al. Conforto térmico em ambientes internos no Brasil e o desenvolvimento da Base Brasileira de Dados In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XV ENCAC, XI ELACAC, 2019, João Pessoa. **Anais:** João Pessoa, ANTAC, 2019.

ANSI; ASHRAE, American National Standards Institute; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 55**. Thermal environmental conditions for human occupancy Atlanta, 1992.

_____. **Standard 55.** Thermal environmental conditions for human occupancy Atlanta, 2017.

_____. **Standard 62.2.** Ventilation and acceptable indoor air quality in residential buildings Atlanta, 2016.

ANSYS. **Ansys Workbench-Academic Student 2019 R3**. 2019. Disponível em <https://www.ansys.com/academic/students/ansys-student> Acesso em: jun, 2019.

ARAÚJO, V. M. D. D.; ARAÚJO, E. H. S. D. Estudo da aplicabilidade de índices e zonas de conforto térmico na avaliação de desempenho térmico de edificações em Natal RN In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, IV ENCAC, 1997, Salvador. **Anais:** Salvador, ANTAC, 1997. p.262.

ASHRAE. Physiological principles for comfort and health. In: ASHRAE (Ed.). **ASHRAE Fundamentals Handbook**: American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 1985. Cap.8.

AULICIEMS, A. Psycho-physiological criteria for global thermal zones of building design. **International Journal of Biometeorology**, 1981.

AULICIEMS, A.; SZOKOLAY, S. V. **Thermal comfort**. (PLEA notes) Brisbane: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture The University of Queensland PLEA, 1997..

BASTOS, L. E. G.; BARROSO-KRAUSE, C.; BECK, L. Estratégias da ventilação natural em edificações de interesse social e a norma ABNT 15220-3: zoneamento bioclimático x potencial eólico brasileiro In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, IX ENCAC, V ELACAC, 2007, Ouro Preto. **Anais:** Ouro Preto, ANTAC, 2007. p.172.

BAVARESCO, M. V. et al. **Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações.** CB3E Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis. 2017. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/Relatorio_GruposClimaticos.pdf Acesso em: nov, 2020.

BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Introdução à Ventilação Natural** Introdução à Ventilação Natural. Maceió: EdUFAL, 2005.

BOGO, A. J.; PEREIRA, F. O. R. **Considerações bioclimáticas para o projeto de habitações no estado de Santa Catarina** ciência e tecnologia. In: Congresso Brasileiro sobre Habitação Social:, Florianópolis. CTHAB BRASIL, 2003.

BOGO, A. et al. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico.** Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1994. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Bioclimatologia.pdf. Acesso em: nov, 2020.

BOGO, A. J. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **HOLOS**, v. 7, n. 32, p. 290, 2016.

BRE. Principles of natural ventilation. **BRE Digest**, n. 210, 1978.

BUONOCORE, C. et al. Influence of relative air humidity and movement on human thermal perception in classrooms in a hot and humid climate. **Building and Envionment**, v. 146, 2018.

CÂNDIDO, C. et al. Towards a Brazilian standard for naturally ventilated buildings: guidelines for thermal and air movement acceptability. In: Windsor Conference, 4th, 2010, London. **Proceedings:** London, Network for Confort and Energy Use in Buildings, 2010.

CÂNDIDO, C.; DEAR, R. D.; LAMBERTS, R. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate. **Building and Environment**, v. 46, p. 379-385, 2011.

CEF, Caixa Econômica Federal GIDUR-VT. **Cadernos CAIXA** projeto padrão - casas populares - 42m². Vitória: CEF, 2007.

CORREIA, W. F. B.; BARBIRATO, G. M. Arquitetura e clima no contexto do semiárido nordestino: respostas construtivas com vistas ao conforto térmico e eficiência energética In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XII ENCAC, VIII ELACAC, 2013, Brasília. **Anais:** Brasília, ANTAC, 2013.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício:**. (2006). Dissertação (Ms.). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DEDEAR, R. D.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an adaptative model of thermal comfort and preference**: final report ASHRAE RP-884. Macquarie Research Ltd / Macquarie Universty - Center for Environmental Design Research / University of California. Sidney-Berkeley: 1997.

DEDEAR, R. J. D; BRAGER, G. S. Thermal confort in naturally ventilated buildings:. **Energy and Buildings**, v. 34, p. 12, 2002.

DEDEAR, R.; KIM, J.; PARINSON, T. Residential adaptive comfort in a humid subtropical climate: Sydney Austrália. **Energy and Buildings**, v., n. 158, p. 2018.

DEVECCHI, R. et al. Application of the adaptive model proposed by ASHRAE 55 in the Brazilian climate context: raising some issues. In: Windsor Conference, 8th, 2014, London. **Proceedings:** London, Network for Confort and Energy Use in Buildings NCEUB, 2014.

DEVECCHI, R. D.; LAMBERTS, R.; CANDIDO, C. M. The role of clothing in thermal comfort: how people dress in a temperate and humid climate in Brazil. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 69, 2017.

DIAS, A. R. D.; CALADO, B. F.; PEDRINI, A. Desempenho térmico da envoltória de edifícios na zona bioclimática 08: comparação entre os métodos de simulação e prescritivo do RTQ-R e o modelo de conforto adaptativo In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XIII ENCAC, IX ELACAC, 2015, Campinas. **Anais:** Campinas, ANTAC, 2015.

DORNELES, Kelen A. **Biblioteca de absortância de telhas:** base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios. São Carlos: IAU/USP, 2021. 57 p.

ELETROBRAS, DPS Departamento de Pesquisa. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso:** ano base 2005, classe residencial, relatório Brasil. Eletrobras/Procel. 2007. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=&params=itemID=%7B99EBBA5C-2EA1-4AEC-8AF2-5A751586DAF9%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D> Acesso em: nov, 2020.

_____. **Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial:** PPH-Brasil-2019, ano base 2018. ELETROBRAS. 2019. Disponível em: <http://www.procel.gov.br/main.asp?View={4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480}> Acesso em: nov, 2020.

FANGER, O. P. **Thermal comfort in the built environment**. In: European Conference on Architecture, April, Munich. H S Stephens & Associates, 1987. p.6-10.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. D. Avaliação da aplicabilidade de índices de conforto adaptativo para o caso brasileiro In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XII ENCAC, VIII ELACAC, 2013, Brasília. **Anais:** Brasília ANTAC, 2013.

FERREIRA, C.; SOUZA, H. A. D.; ASSIS, E. S. D. Estudo do clima brasileiro: reflexões e recomendações sobre a adequação climática de habitações In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XV ENTAC, 2014, Maceió. **Anais:** Maceió, ANTAC, 2014. p. 429.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. D.; ASSIS, E. S. D. Comparação de desempenho de envoltórias recomendadas por normas de desempenho e Mahoney In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XIII ENCAC, IX ELACAC, 2015, Campinas. **Anais:** Campinas, ANTAC, 2015.

FLORENSA, R. S.; ROURA, H. C. **Arquitectura y energía natural.** Barcelona: UPC, 1995.

GIVONI, B. Confort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 12, 1992.

_____. **Climate considerations in building and urban design** Climate considerations in building and urban design. New York: John Wiley & Sons, 1998.

GONÇALVES, W. B. **Estudo de índices de conforto térmico avaliados com base em população universitária na região metropolitana de Belo Horizonte.** (2000). 241 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

GONZALEZ, E. et al. **Proyecto, clima y arquitectura** Proyecto, clima y arquitectura. Mexico: Gustavo Gilli, 1986. (Arquitectura Lationamericana).

GRAÇA, V. A. C.; KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; PETRECHE, J. R. D. O Projeto Axiomático. In: Kowaltowisk et al (Ed.). **O processo de projet em arquitetura da teoria à tecnologia.** São Paulo: Oficina de Texto, 2011. Cap.8.

GU, L. Airflow Network modeling in Energyplus In: International Building Performance Simulation Associantion Conference, IBPSA, Beijing. **Proceedings:** Beiing, IBPSA, 2007. p.964-971.

HOYT, T. et al. **CBE Thermal Confort Too.** 2017. Disponível em: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/> Acesso em: nov, 2020.

HOPFE, C. J.; STRUCK, C.; HENSEN, J. Design optimization during the different desig stages In: International Conference on adaptive computing in design and manufacture, 7th, 2006, Bristol. **Proceedings**: Bristol, University of the West of England, 2006. p.275.

Proceedings of the 7th Int. Conf. on adaptive computing in design and manufacture, Bristol. University of the West of England, 2006. p.275.

HUMPHREYS, M. Outdoor temperatures and comfort indoors. **Building Research & Information**, v. 6, n. 2, 1978.

HUMPHREYS, M. A.; NICOL, J. F. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environment. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 18, 2002.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil:** Intensidade do vento NCB 1981-2010, 2018. Disponível em <https://portal.inmet.gov.br/normais/> Acesso em: mar, 2020.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **RTQ-R:** Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residenciais. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf> Acesso em: nov, 2020

_____. **Anexo da portaria INMETRO N°50:** Catálogo de propriedades térmicas, paredes, coberturas e vidros. 2013. In: PBE Edifica (2020), Portaria Nº 50, de 01 de fevereiro de 2013. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/planilhas-catalogos> Acesso em: nov, 2020.

_____. **Instrução Normativa Inmetro (INI-C)**, que aperfeiçoa os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Portaria Nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. Disponível em: < http:// http://www.pbeedifica.com.br/inic> Acesso em: jun, 2021.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 7730** – Ergonomics of thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Genebra: International Standard, 2005.

KHEDARI, J. et al. Thailand ventilation comfort chart. **Energy and Buildings**, v. 32, 2000.

KOENIGSBERGER, O. H.; MAHONEY, C. T.; EVANS, J. M. **Climate and house design**. New York: United Nations, 1970.

KOHNKE, P. **ANSYS Theory reference:** release 5.6. 11 ed. Canonsburg: ANSYS Incorporated, 1999.

KRELLING, A. F. et al. Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências: NBR 15575 In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XVIII ENTAC, 2020, Porto Alegre. **Anais:** Porto Alegre, ANTAC, 2020.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos INMET 2018.** 2021. Disponível em: < https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018r/> Acesso em: jan, 2021.

LAMBERTS, R. et al. **Towards a brazilian standard on thermal comfort Towards a brazilian standard on thermal comfort.** LABEEE - UFSC / IEQ Lab -University of Sydney. Florianópolis. 2013. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Towards_a_Brazilian_Standard_Complete_Version.pdf. Acesso em: nov, 2020.

LAMBERTS, R. et al. **Conforto e stress térmico** Conforto e stress térmico. Florianópolis: LabEEE, 2014. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4200_apostila%202011.pdf_2.pdf> Acesso em: nov, 2020.

_____. Desempenho térmico de edificações Desempenho térmico de edificações. ed. Florianópolis: LABEEE, 2016. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf> Acesso em: nov, 2020.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2014. Disponível em:<http://www.labeee.ufsc.br/publicacoes/livros> Acesso em: dezembro 2016.

LEITE, C. G. **Alterações da ventilação urbana frente ao processo de verticalização de avenidas litorâneas:**. (2008). Dissertação (Ms.). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

LEITE, R. C. V. **Fortaleza: terra do vento:**. (2010). Dissertação (Ms.). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LIGGETT, R.; MILNE, M. **Climate Consultant** 6.0 (Buid 13). UCLA, 2008. Disponível em: <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/request-climate-consultant.php>. Acesso em: nov, 2020.

LIMA, R. S.; PACHECO, G. Análise do desempenho térmico de uma habitação unifamiliar de interesse social na cidade de Mossoró/RN In: Enconto Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XVIII ENCAC, 2020, Porto Alegre. **Anais**: Porto Alegre, ANTAC, 2020.

LOURA, R. M.; ASSI, E. S. D. Análise comparativa entre resultados de desempenho térmico de envoltórias de edifício residencial gerados por diferentes normas brasileiras In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XI ENCAC, VII ELACAC, Búzios. **Anais**: Búzios, ANTAC, 2011.

MACIEL, A. A.; FORD, B.; LAMBERTS, R. Main influences on the design philosophy and knowledge basis to bioclimatic integration into architectural design. **Building and Environment**, v., n. 42, p. 3762, 2007.

MARQUES, T.; NEVES, L.; MELLO, M. Análise de desempenho térmico pelo método simplificado proposto na NBR 15575: importância da área envidraçada da fachada In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XIII ENCAC, IX ELACAC, 2015, Campinas. **Anais:** Campinas, ANTAC, 2015.

MARTINS, T. A. D. L.; BITTENCOURT, L. S.; KRAUSE, C. M. D. L. B. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 59, 2012.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no program Energyplus** Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no program Energyplus. Florianópolis: LabEEE, 2015. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Manual_GroundDomain_E+versao9.0.pdf> Acesso em: jan, 2020.

MMA, Ministério do Meio Ambiente; LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética na Edificação. **Projeteee**, 2021. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee> Acesso em: mar, 2021.

MME, Ministério das Minas e Energia; EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2019:** ano base 2018. MME. Rio de Janeiro. 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf.> Acesso em: nov, 2020.

MORAIS, J. M. D. S. C. **Ventilação natural em edifícios multifamiliares do "Programa Minha Casa Minha Vida"**. (2013). Tese (Dr.). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

NEGREIROS, B. D. A. **Análise de métodos de predição de desempenho térmico de habitação em clima quente-úmido com condicionamento passivo**. (2010). (mestrado). Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

NEIVA, A. C. D. B. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro:** simulações 2013. Rio de Janeiro: CEPEL, CPTEC / Inpe, 2017.

NICOL, F. Adaptive thermal confort standards in the hot-humid tropics. **Energy and Buildings**, v. 36, 2004.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, A. M. Adaptative thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, 2002.

NREL, National Renewable Energy Laboratory; BIG LADDER, Software LLC. **Euclid 0.9.4.3**. 2020. Disponível em: <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid> Acesso em: jan, 2019.

OLGYAY, V. **Design with climate** : bioclimatic approach to architectural regionalism. Princeton: Princeton University Press, 1963.

PEDRINI, A. **Integration of low energy strategies to the early stages of design process of office buildings in warm climate.** (2003). Thesis (PhD. em Arquitetura). Department of Architecture, University of Queensland, Brisbane, 2003.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classifiction. **Hidrology and Earth System Sciences**, v. 11, 2007.

PEREIRA, H. A. D. C. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energyplus - versão 8.0**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações LABEEE, 2013. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Manual_Ventilacao_v8_0.pdf> Acesso em: jan, 2019.

PEREIRA, I.; FERREIRA, C. Avaliação dos impactos da ABNT NBR 15575 no conforto térmico e no consumo de energías nas novas edificações habitaconais brasileiras In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XV ENTAC, 2014, Maceió. **Anais:** ANTAC, 2014. p. 518.

PEREIRA, I.; ASSIS, E. S. D. Discussão da classificação bioclimática de Belo Horizonte proposta pelo projeto de norma de desempenho térmico de edificações In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Contruído, VIII ENCAC, IV ELACAC, 2005, Maceió. **Anais:** Maceió, ANTAC, 2005.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. D. Avaliação de modleos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, 2010.

PEREIRA, F. O. R. et al. Ferramenta simplificada para a estimativa do desempenho da iluminação natural em edificações residenciais In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XVIII, 2020, Porto Alegre. **Anais:** Porto Alegre, ANTAC, 2020.

ROCHA, A. P. D. A.; ASSIS, E. S. D.; GONÇALVES, W. D. B. **Zoneamento bioclimático do estado de Minas Gerais: aperfeiçoamento dos resultados** In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, X ENCAC, VI ELACAC, Natal. **Anais:** Natal. ANTAC, 2009.

RORIZ, M. **Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro**. ANTAC. São Carlos: 2012a. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf Acesso em: nov, 2020

_____. **Segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático do Brasil**. ANTAC. São Carlos: 2012b. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf Acesso em: nov, 2020.

_____. **Classificação de climas do brasil – versão 3.0**. ANTAC. São Carlos: 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf Acesso em: nov, 2020.

RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. V ENCAC, II ELACAC, 2012, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza, ANTAC, 1999.

SACHT, H. M.; LUKIANTCHUKI, M. A.; CARAM, R. Análise da influência do tamanho das aberturas de entrada de ar no desempenho da ventilação natural In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XIV ENCAC, X ELACAC, 2017, Balneário Camburiu. **Anais:** Balneário Camburiu, ANTAC, 2017. p. 564.

SALES, G. D. L. **Ventilação natural e análise da influência das aberturas no fluxo do ar - estudo de caso:**. (2012). Dissertação (Ms.). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SANTOS, T. L. D.; PORTO, F. H. F. D. S.; SILVA, A. S. Análise da correlação entre conforto e desempenho térmico em habitações de interesse social por simulação computacional. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 211, 2020.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1:. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 1, jan/mar 2014.

SILVA, R. B. M. E.; PAULA, J. M. B. D.; BARBIRATO, G. M. Programas de habitação social e qualidade de projeto: avaliação de arranjo construtivo e de condições térmicas internas de habitação no contexto climático de Maceió-AL In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XII ENCAC, VIII ELACAC, 2013, Brasília. **Anais**: Brasília, ANTAC, 2013.

SORGATO, M. J. et al. **Nota técnica referente à avaliação para a norma de desempenho NBR 15575 em consulta pública.** Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

LABEEE. Florianópolis. 2012. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/notas_tecnicas/NT_15575_FINAL.pdf. Acesso em: nov, 2020.

SZOKOLAY, S. V. **Thermal design of buildings**. Canberra: RAIA Education Division, 1987.

_____. **Introduction to Architectural Science:** The Basis of Sustainable Design. Bullington, Great Britain: Architectural Press, 2004.

TOE, D. H. C.; KUBOTA, T. Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot-humid climates using ASHRAE RP-884 database. **Frontiers of Architectural Research**, v. 2, 2013.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, v. 87, 2015.

U.S.DOE, Departmento de Energia dos Estados Unidos. **EnergyPlus - Weather.** Disponível em <https://energyplus.net/weather> Acesso em: jan, 2019.

_____. **EnergyPlus**. 2016. disponível em < https://energyplus.net/downloads//> acesso em: jan, 2019.

_____. **Getting started**.: University of Illinois, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2018. (EnergyPlus version 8.9.0 documentation). Disponível em: <https://energyplus.net/documentation> Acesso em: jan, 2019.

_____. **EnergyPlus version 8.9.0 Documentation:** input output reference. 2018. Disponível em: <https://energyplus.net/documentation> Acesso em: jan, 2019.

VEIGA, R. K. S. et al. Proposta para as escalas dos níveis de desempenho térmico de residências: NMR 15575 In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XVIII ENTAC, 2020, Porto Alegre. **Anais:** ANTAC, 2020.

VENÂNCIO, R. **Modos projetuais de simulação**. (2012). 200 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Programa Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2012.

WILDE, P. D. **Computational support for the selection of energy saving building components.** (2004). Thesis (PhD.). Delft University of Technology, Delft University of Technology, Delft, 2004.

WALSH, A.; CÓSTOLA, D.; LABAKI, L. C. Reviel of methods for climatic zoning for building energy efficiency programs. **Building and Envionment**, v. 112, p. 14, 2017.

WATSON, D.; LABS, K. **Climatic design:** energy-efficient building principles and practices. ed. New York: McGraw-Hill, 1983.

WEBER, F. D. S. et al. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus.** LABEEE / UFSC. Florianópolis. 2017. Disponível em:

<https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Biblioteca_ComponentesConstrutivos_0.pdf.> Acesso em: jan, 2020.

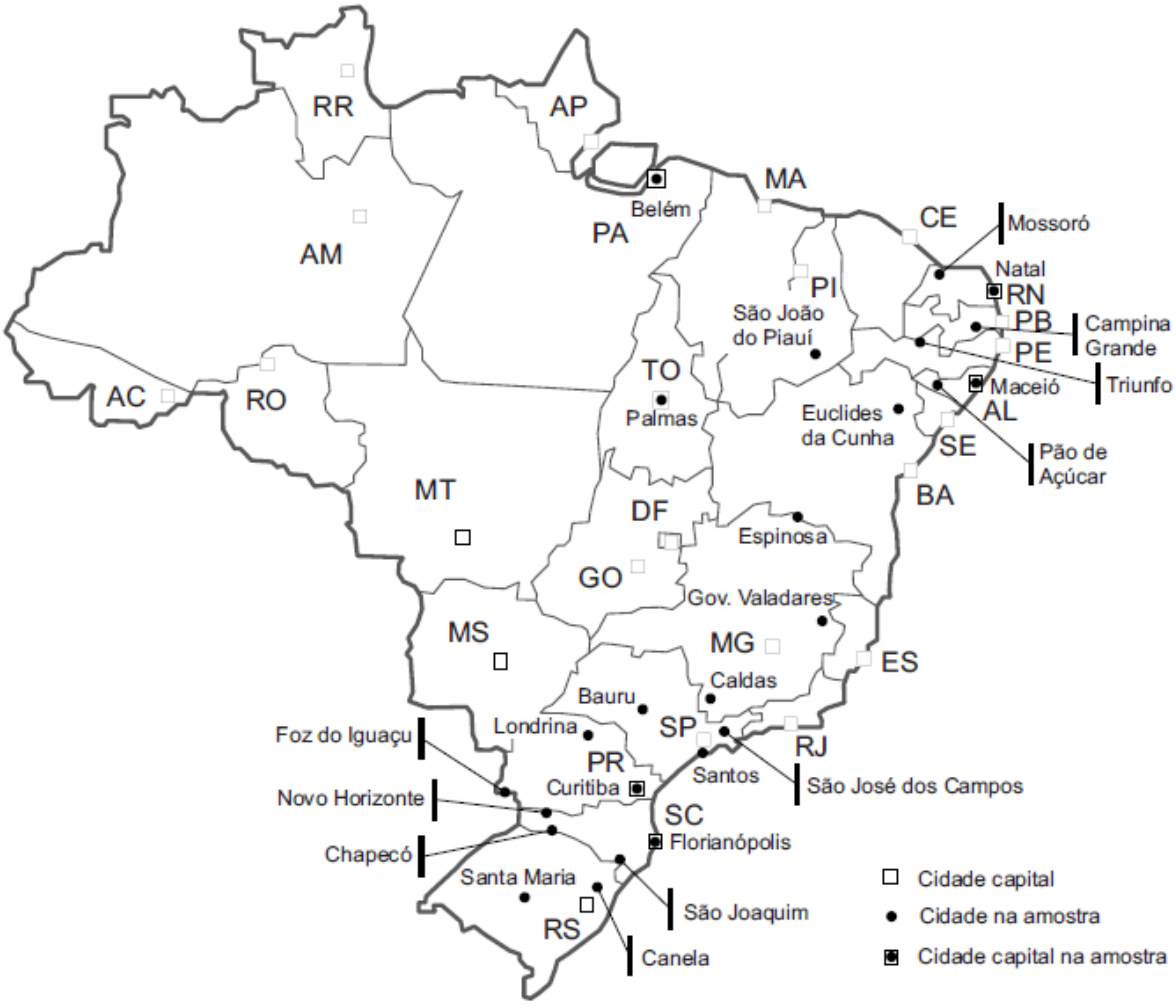
XAVIER, A. A. P. **Condições de conforto térmico para estudantes de 2º grau na região de Florianópolis**. (1999). 209 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

ZAMBONATO, B. et al. Pesquisa qualitativa sobre o comportamento do usuário em habitação multifamiliar: estudo piloto In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, XVIII ENCAC, 2020, Porto Alegre. **Anais:** ANTAC, 2020.

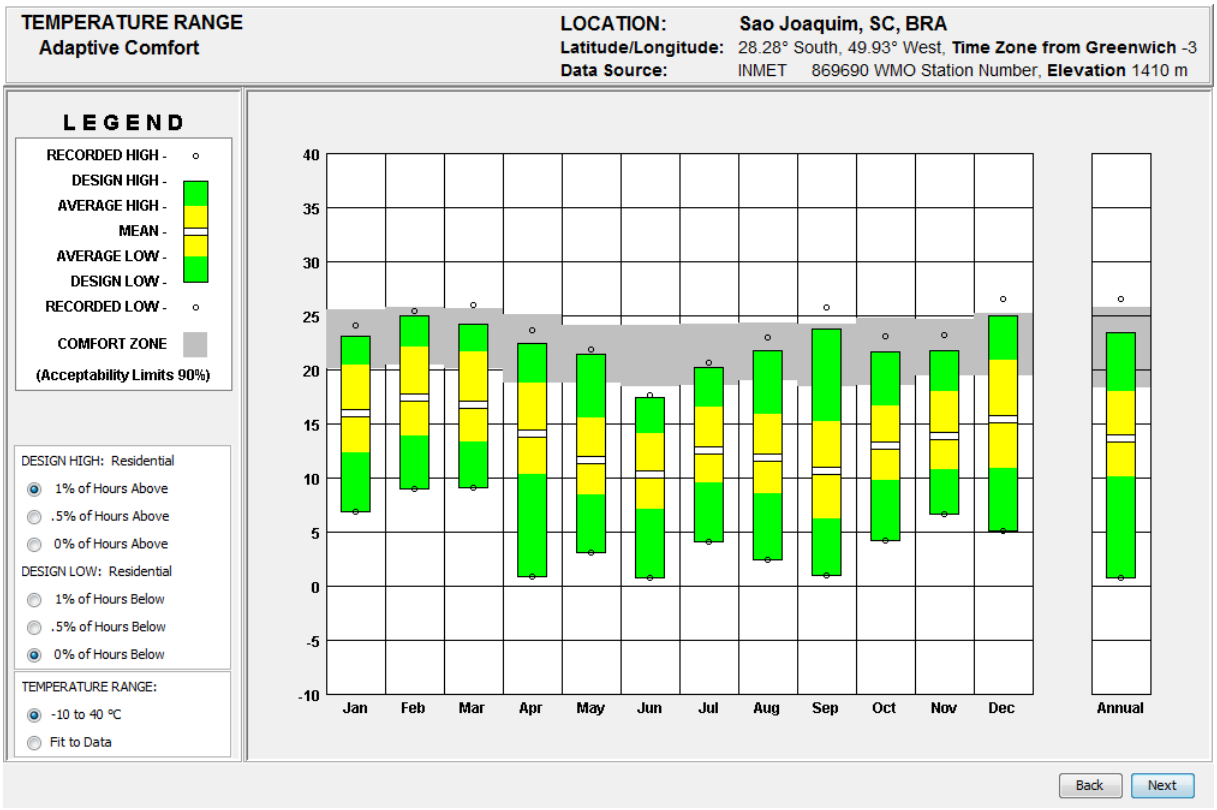
APÊNDICE A

Este apêndice reúne informações sobre os climas integrantes da amostra selecionada na presente investigação. Os arquivos climáticos da base INMET 2018 (LABEEE, 2021) foram usados na geração de gráficos com a ferramenta *Climate Consultant* 6.0, usando opção de zona de conforto *ANSI-ASHRAE Standard* 55 - 2010 (LIGGETT; MILNE, 2008). O clima de cada um dos 25 municípios da amostra está representado por seis gráficos, agrupados em três pares. O primeiro ("a" e "b") está baseado em dados horários de temperatura do ar. O segundo par de gráficos ("c" e "d") apresenta dados de velocidade e direção do vento. Os dois últimos gráficos ("e" e "f") mostram dados higrotérmicos e de conforto. Esses gráficos são apresentados seguindo a sequência de grupos climáticos, como consta na tabela abaixo, que apresenta também os arquivos climáticos utilizados.

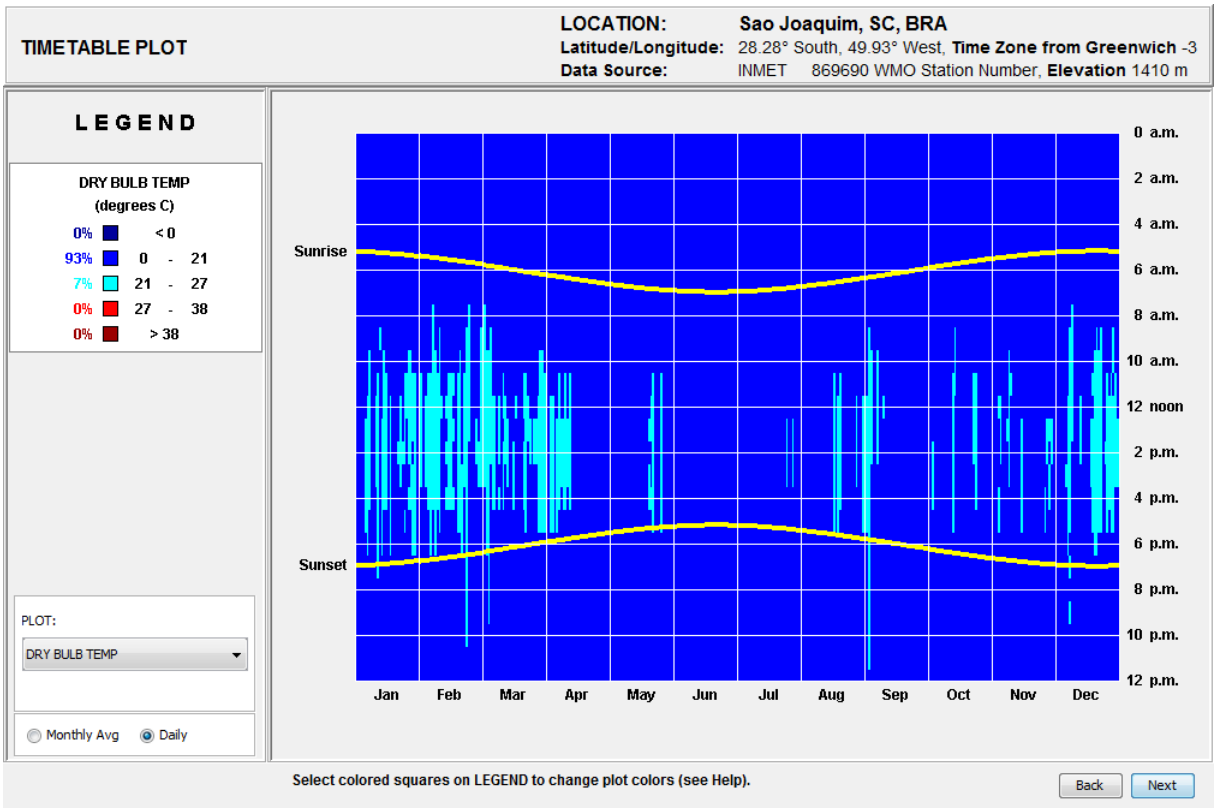
CIDADE – UF	**ZB**	**G**	**LAT.** (0,0°S)	**LONG.** (0,0°W)	**ALT.** (m)	**ARQUIVO CLIMÁTICO** (INMET 2018-LABEEE)
São Joaquim-SC	ZB1	G1a	8	42	222	BRA_SC_Sao.Joaquim.869690_INMET
Florianópolis-SC	ZB3	G1b	28	49	6	BRA_SC_Florianopolis-Luz.Intl.AP.838990_TMYx.2003-2017
Curitiba-PR	ZB1	G2	26	49	924	BRA_PR_Curitiba-Pena.Intl.AP.838400_TMYx.2003-2017
S. José dos Campos-SP	ZB3	G3	28	50	1410	BRA_SP_Sao.Jose.dos.Campos-Stumpf.Intl.AP.838290_TMYx.2003-2017
Caldas-MG	ZB3	G4	22	46	1151	BRA_MG_Caldas.868460_TMYx.2003-2017
Novo Horizonte-SC	ZB2	G5	26	53	960	BRA_SC_Novo.Horizonte.869380_INMET
Canela-RS	ZB1	G6	29	51	830	BRA_RS_Canela.AP.869800_INMET
Chapecó-SC	ZB3	G7	27	53	679	BRA_SC_Chapeco.838830_TMYx.2003-2017
Santa Maria-RS	ZB2	G8	30	54	95	BRA_RS_Santa.Maria.AB.839370_TMYx.2003-2017
Gov. Valadares-MG	ZB5	G9	19	42	263	BRA_MG_Governador.Valadares.835430_INMET
Campina Grande-PB	ZB8	G10	7	36	501	BRA_PB_Campina.Grande-Suassuna.AP.827950_TMYx.2003-2017
Triunfo-PE	ZB6	G11	8	38	1020	BRA_PE_Triunfo.827890_TMYx.2003-2017
Bauru-SP	ZB4	G12	22	49	617	BRA_SP_Bauru.AP.837220_TMYx
Santos-SP	ZB5	G13	24	46	3	BRA_SP_Santos.AB.838180_TMYx.2003-2017
Euclides da Cunha-BA	ZB7	G14	11	39	432	BRA_BA_Euclides.da.Cunha.866130_INMET
Londrina-PR	ZB3	G15	23	51	566	BRA_PR_Londrina.837660_TMYx.2003-2017
Foz do Iguaçu-PR	ZB3	G16	26	54	232	BRA_PR_Foz.do.Iguacu-Cataratas.Intl.AP.869250_TMYx.2003-2017
Belém-PA	ZB8	G17	1	48	16	BRA_PA_Belem-Val.de.Cans.Intl.AP.821930_TMYx.2003-2017
Natal-RN	ZB8	G18	6	35	51	BRA_RN_Natal.Intl.AP.825990_TMYx.2003-2017
S. João do Piauí-PI	ZB7	G19	7	38	234	BRA_PI_Sao.Joao.do.Piaui.828790_TMYx.2003-2017
Palmas-TO	ZB7	G20	10	48	280	BRA_TO_Palmas-Rodrigues.AP.830650_TMYx.2003-2017
Maceió-AL	ZB8	G21	10	36	118	BRA_AL_Maceio-Palmares.Intl.AP.829930_TMYx.2003-2017
Mossoró-RN	ZB7	G22	5	37	23	BRA_RN_Mosoro-Dix.Sept.Rosado.AP.825910_TMYx
Espinosa-MG	ZB6	G23	15	43	571	BRA_MG_Espinosa.866950_TMYx
Pão de Açúcar-AL	ZB8	G24	10	37	19	BRA_AL_Pao.de.Acucar.819940_INMET


RR
AP
MA
Belém
PA
AM
CE
Mossoró
Natal
RN
PI
São João
do Piauí
PB
Campina
Grande
PE
TO
Maceió
Triunfo
AC
RO
Palmas
Euclides
da Cunha
AL
SE
Pão de
Açúcar
MT
DF
BA
Espinosa
GO
Gov. Valadares
MS
MG
ES
Caldas
Bauru
Londrina
SP
RJ
Foz do Iguaçu
PR
Curitiba
Santos
São José dos Campos
Novo Horizonte
SC
Florianópolis
Chapecó
Santa Maria
São Joaquim
RS
Canela
Cidade capital
Cidade na amostra
Cidade capital na amostra

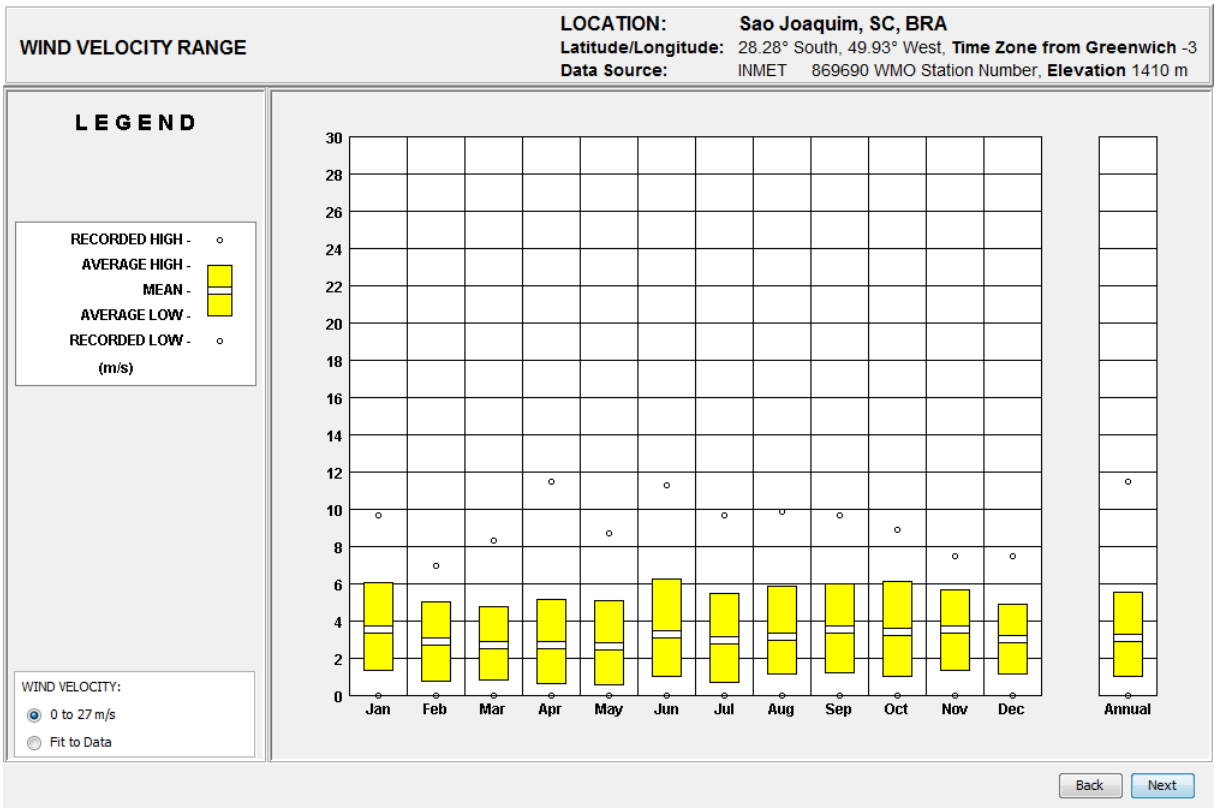
1a São Joaquim-SC ZB1 G1a



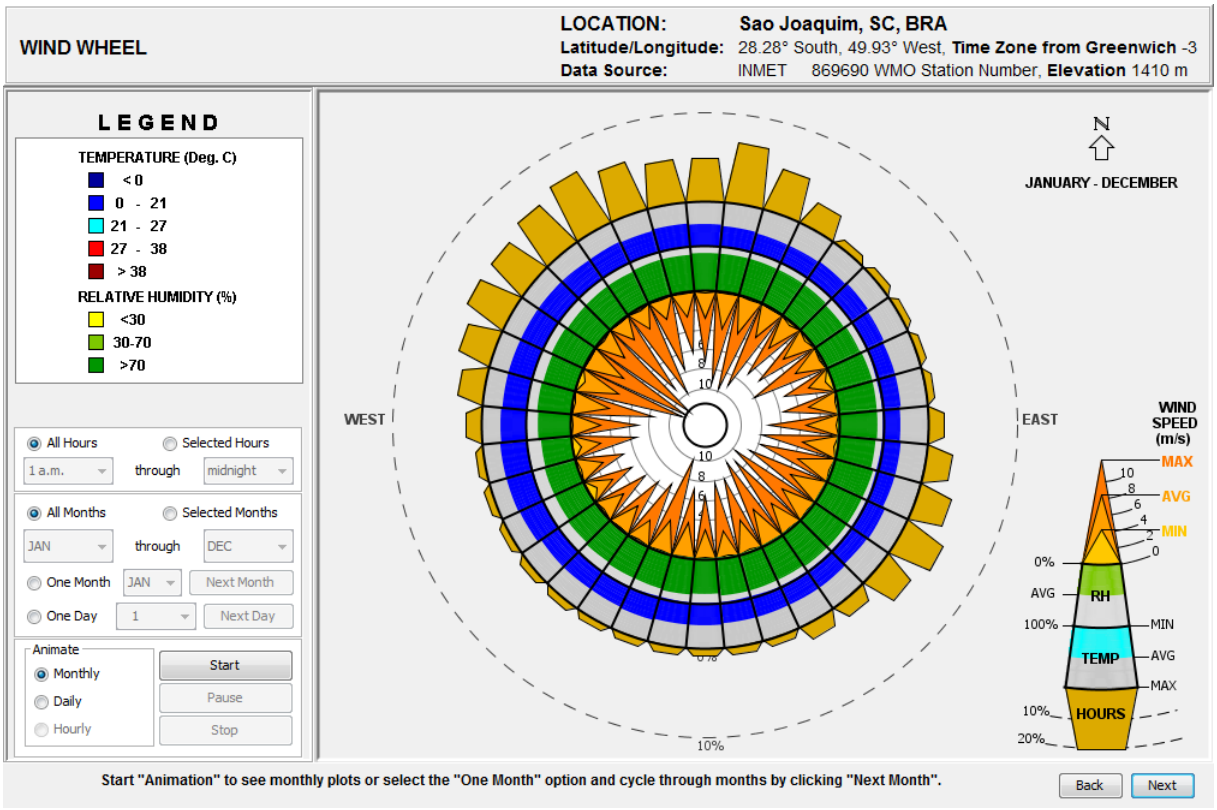
1b São Joaquim-SC ZB1 G1a



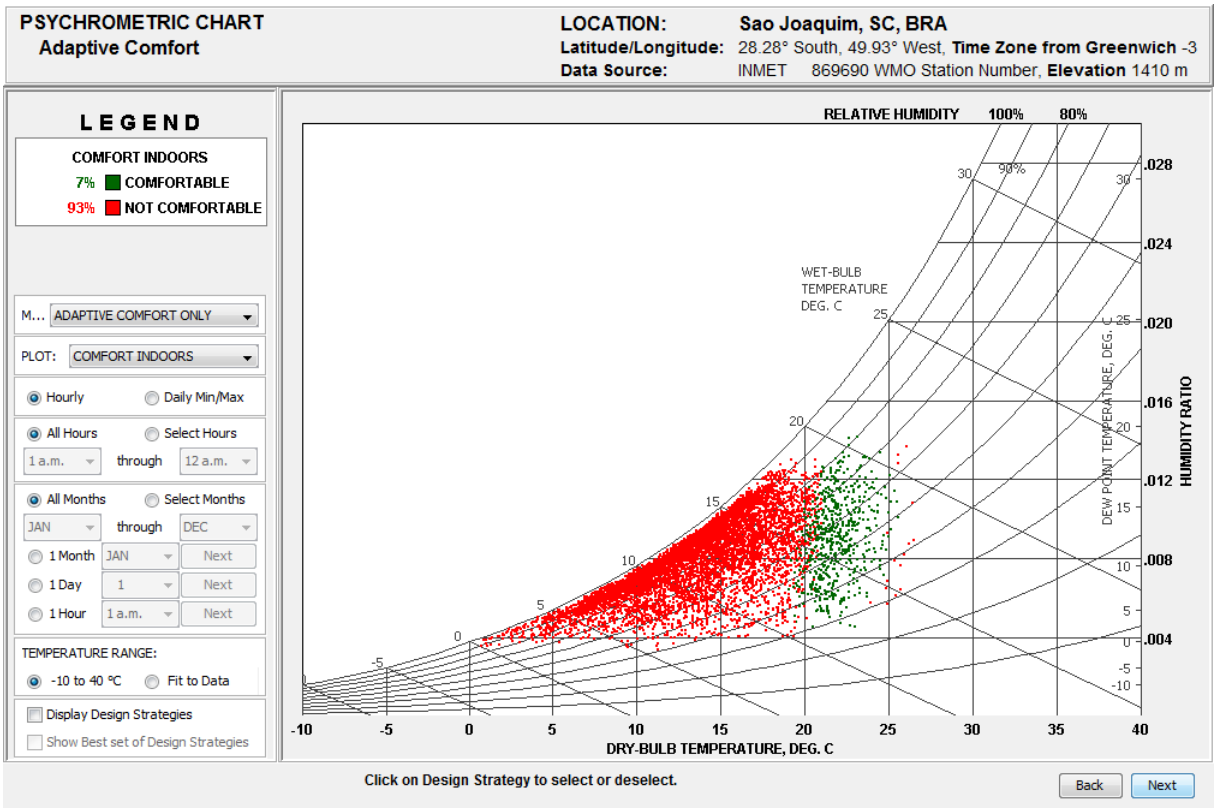
1c São Joaquim-SC ZB1 G1a



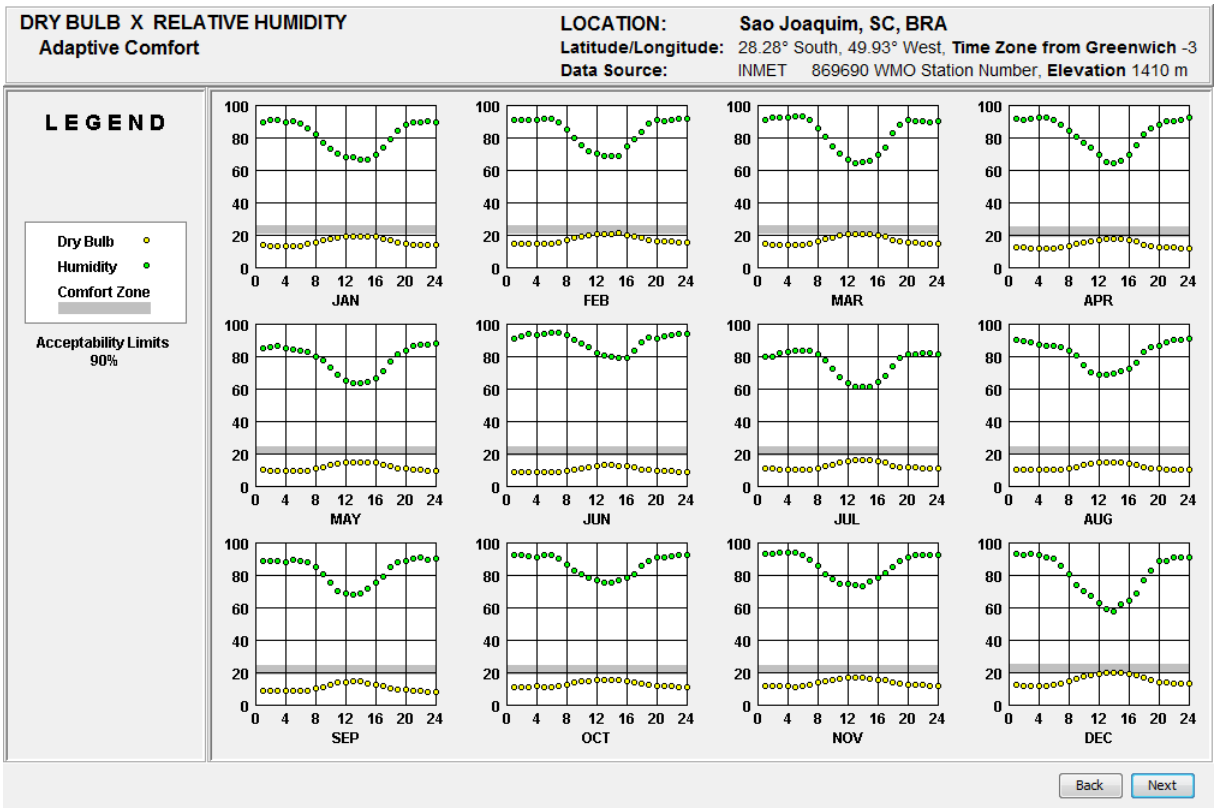
1d São Joaquim-SC ZB1 G1a



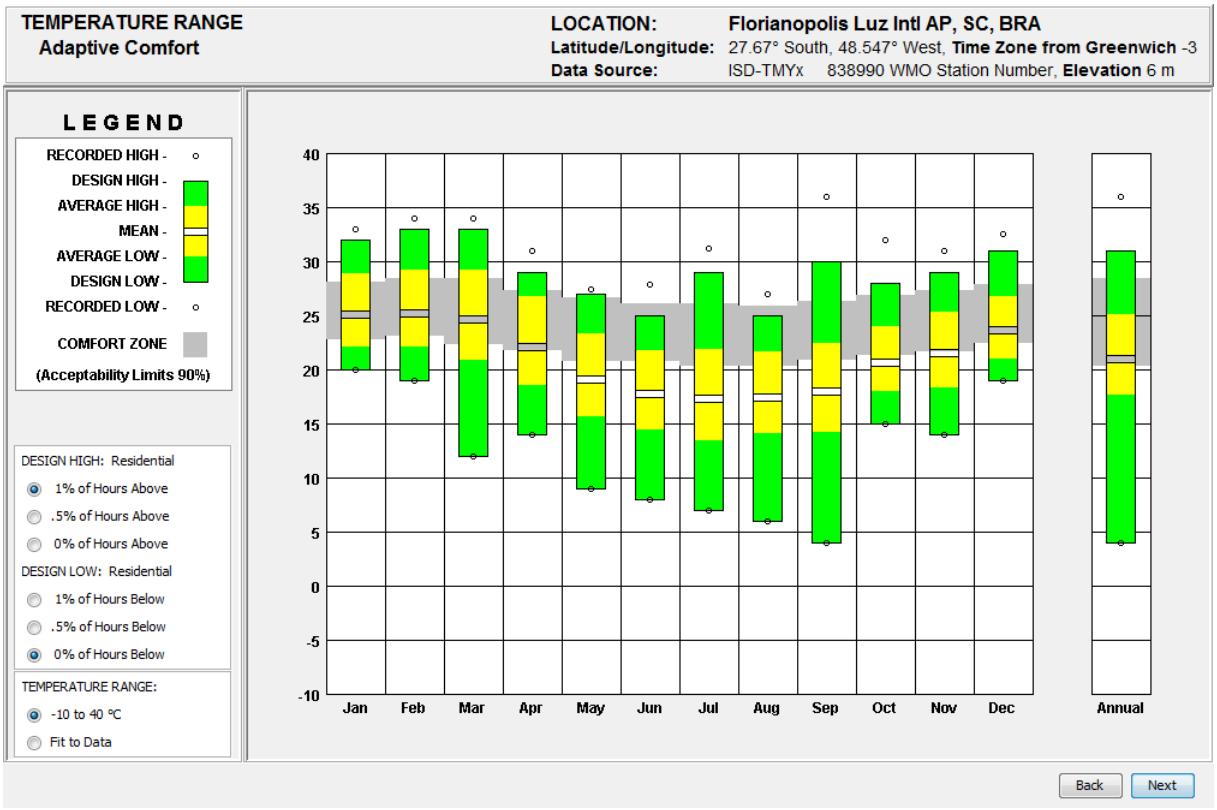
1e São Joaquim-SC ZB1 G1a



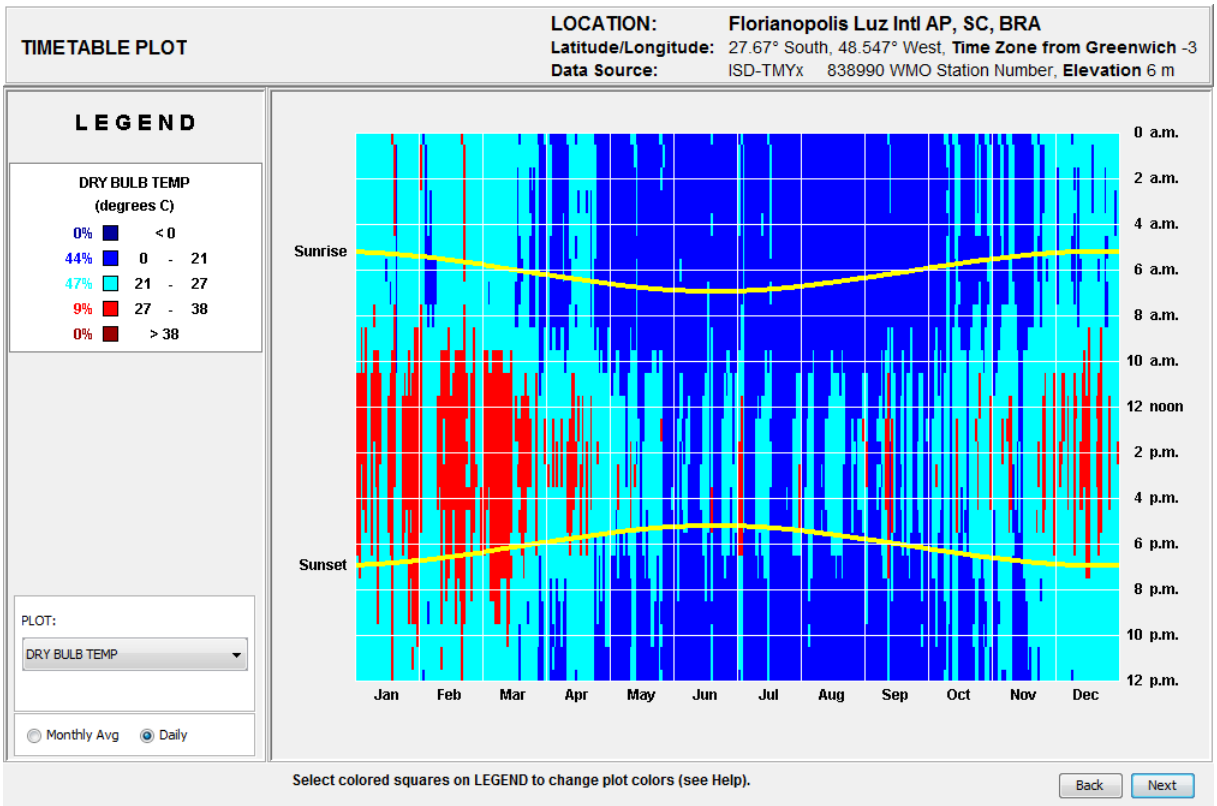
1f São Joaquim-SC ZB1 G1a



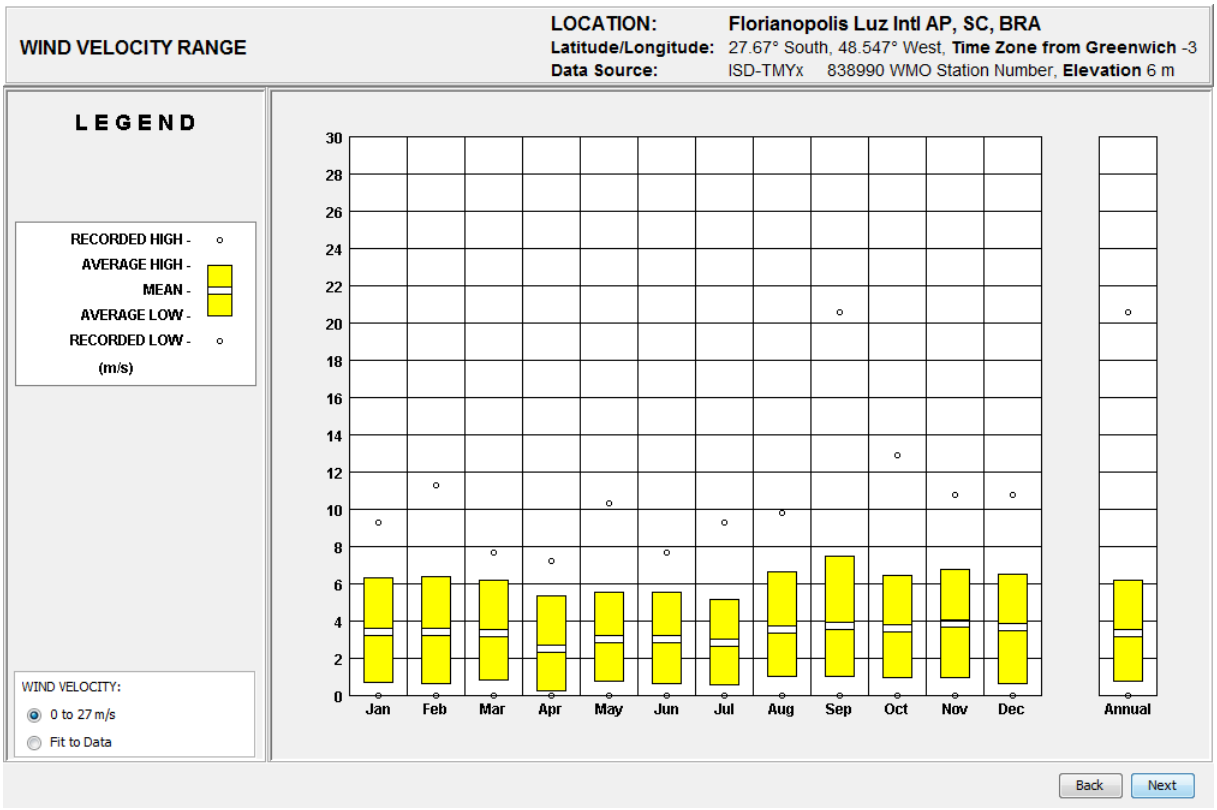
2a Florianópolis-SC ZB1 G1b



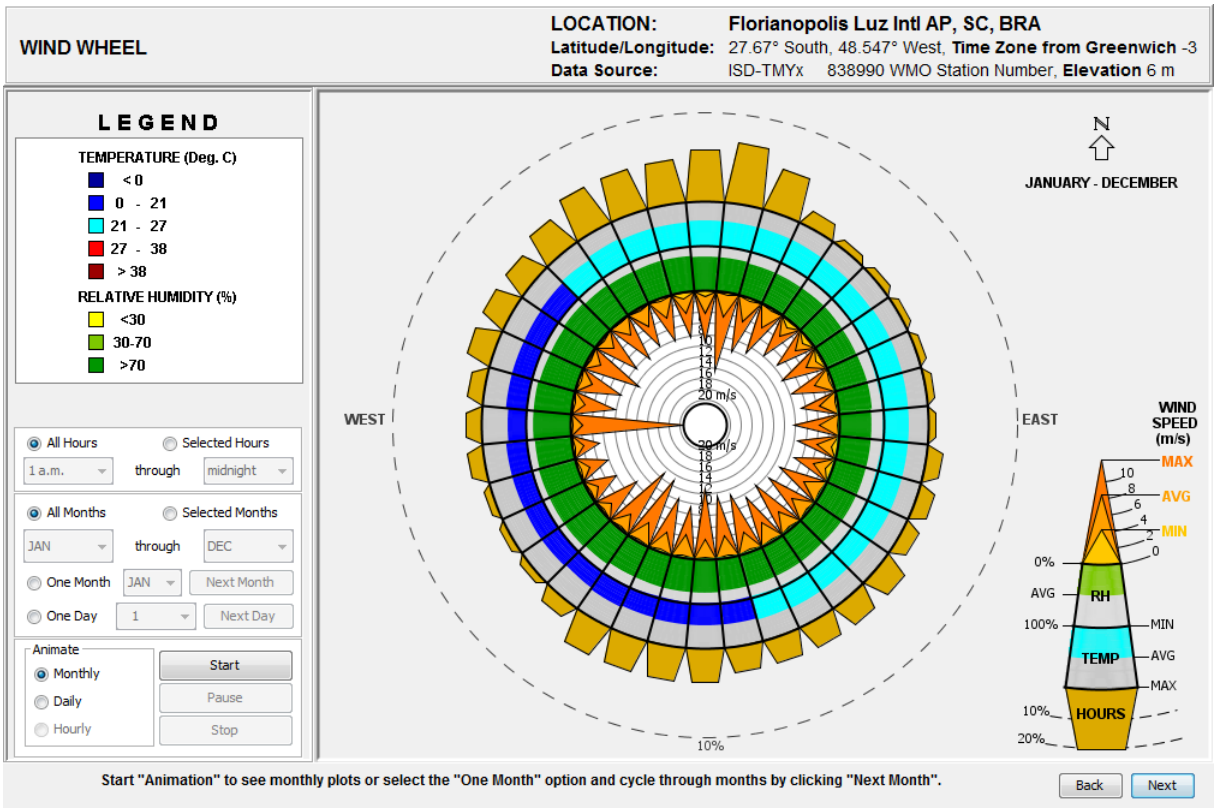
2b Florianópolis-SC ZB1 G1b



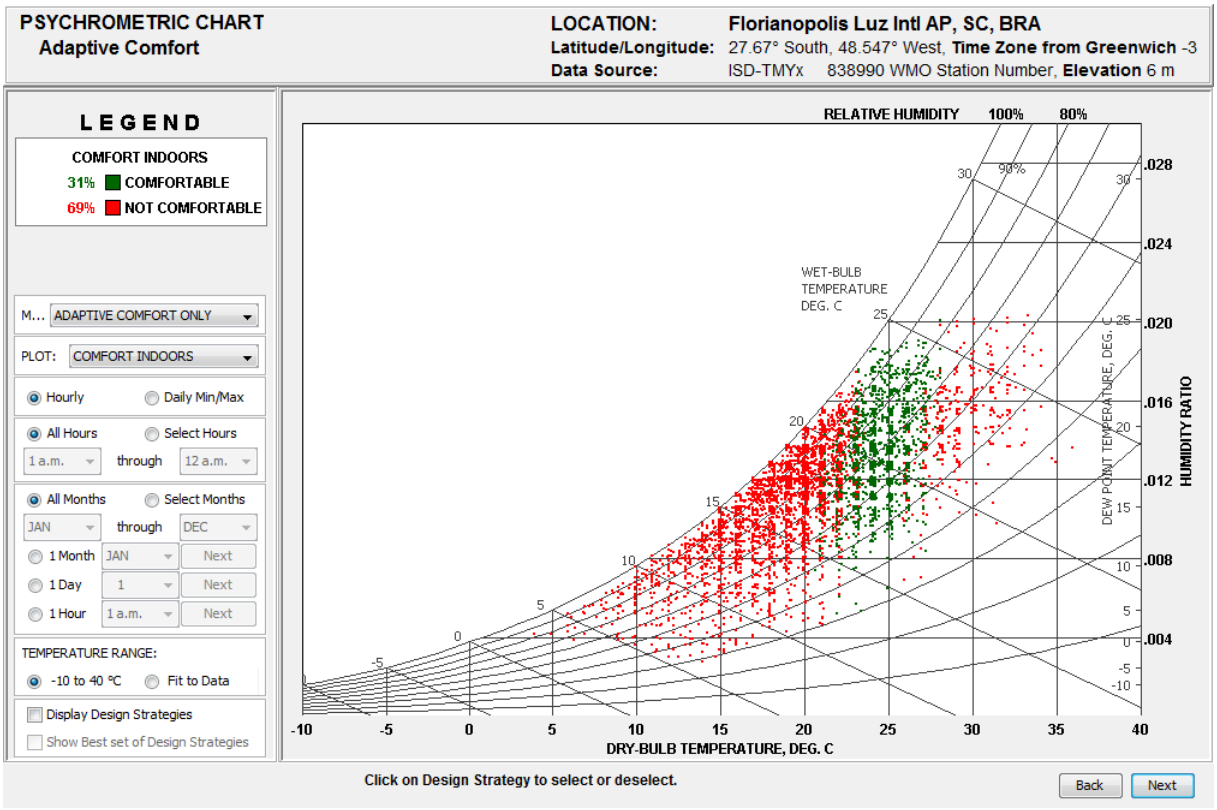
2c Florianópolis-SC ZB1 G1b



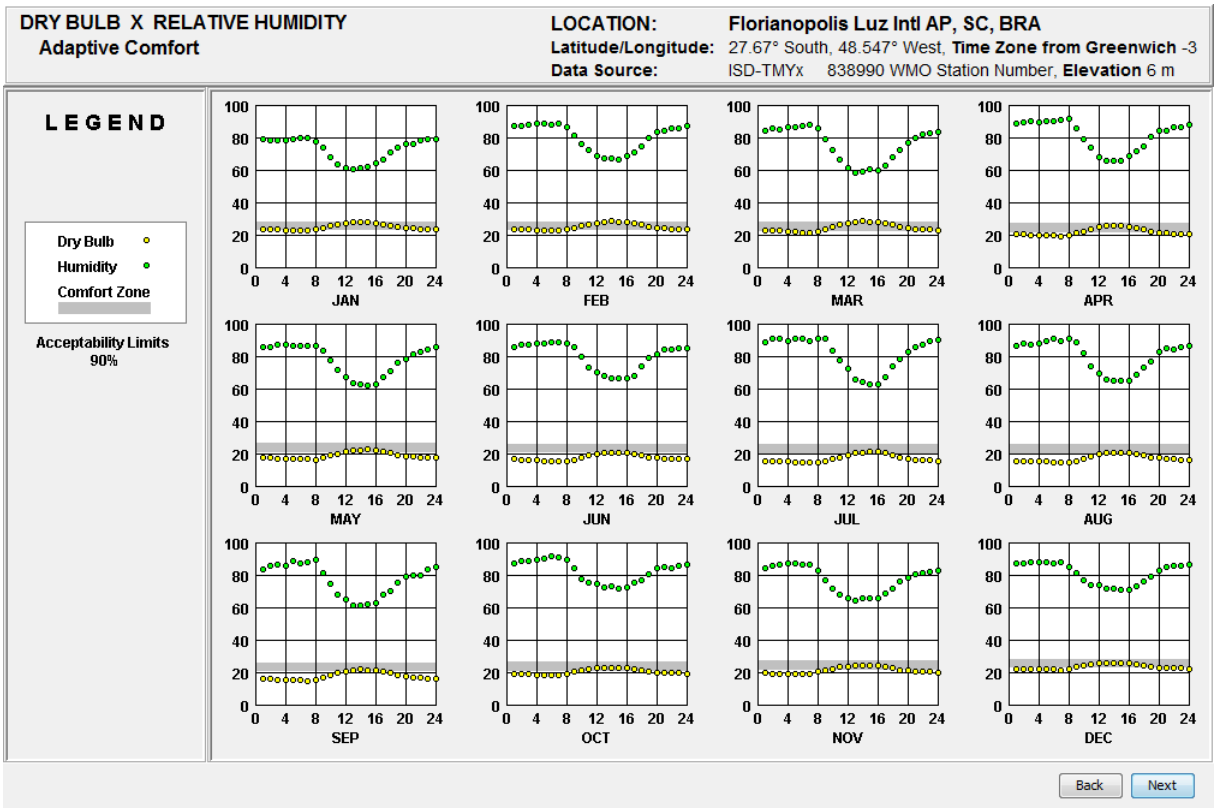
2d Florianópolis-SC ZB1 G1b



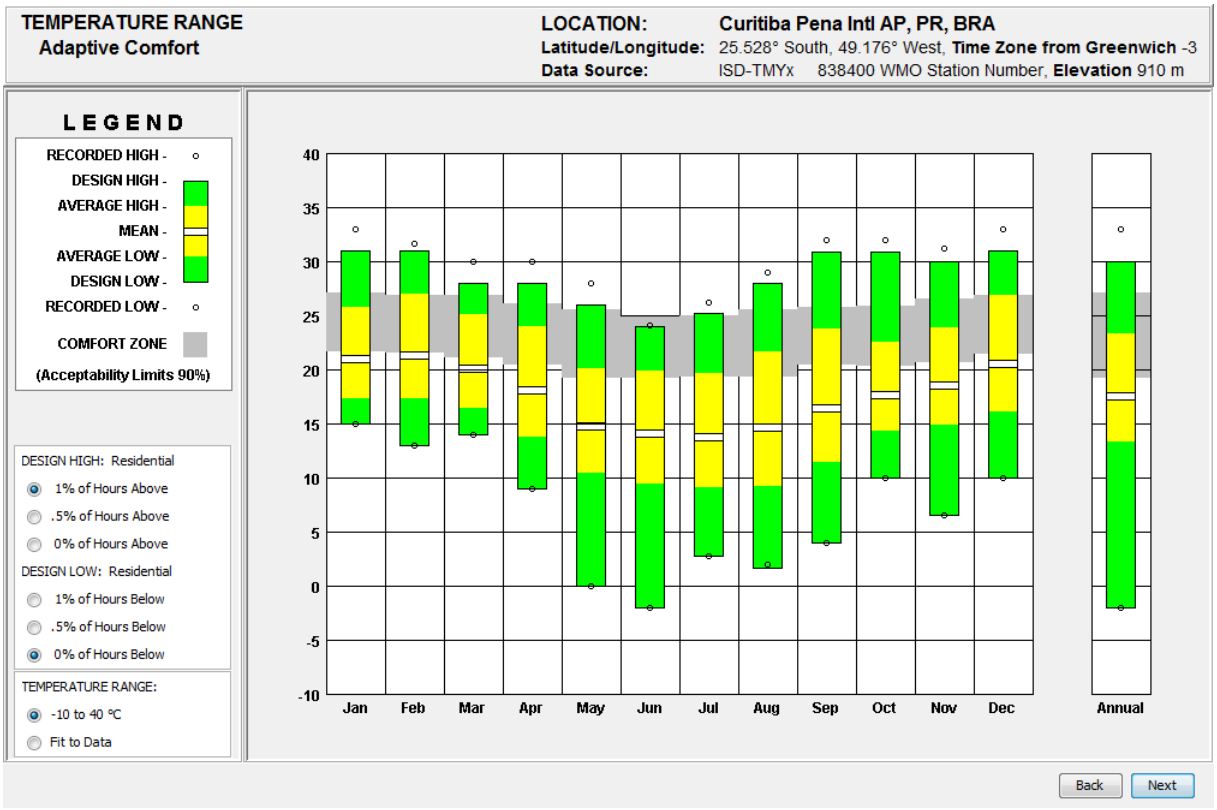
2e Florianópolis-SC ZB1 G1b



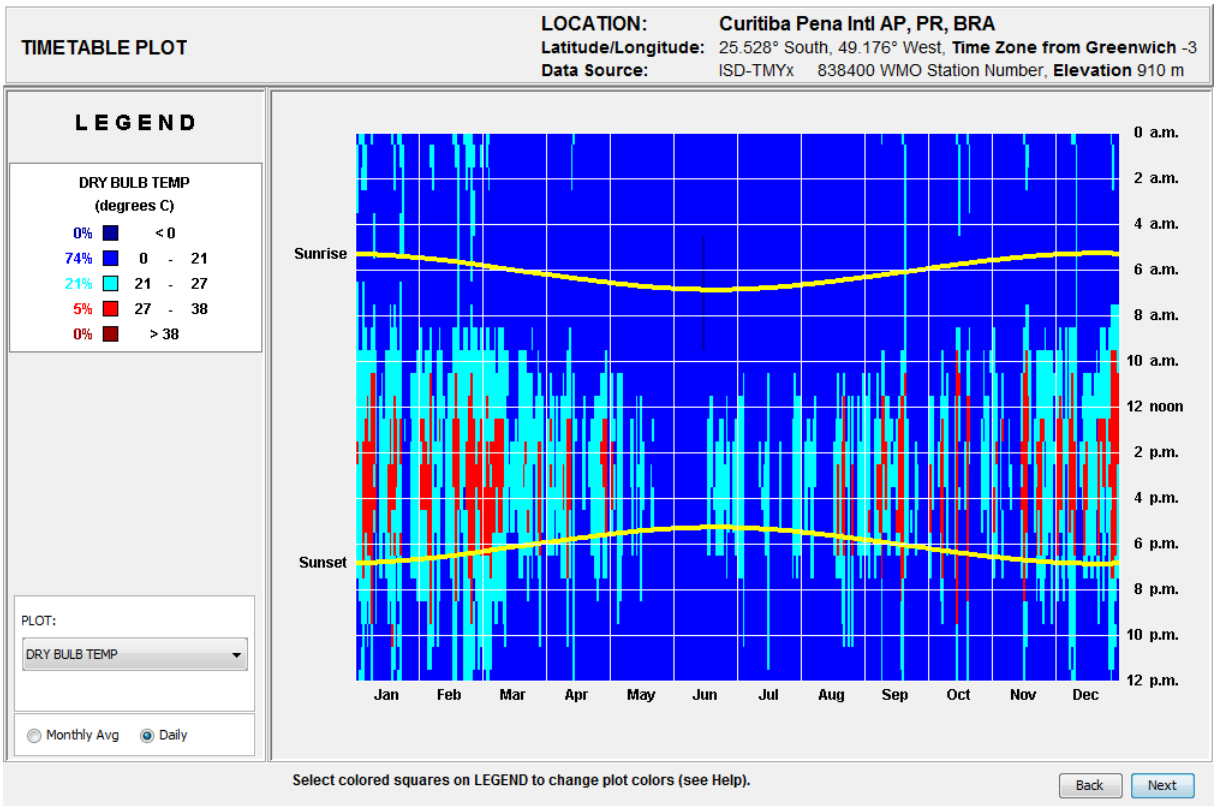
2f Florianópolis-SC ZB1 G1b



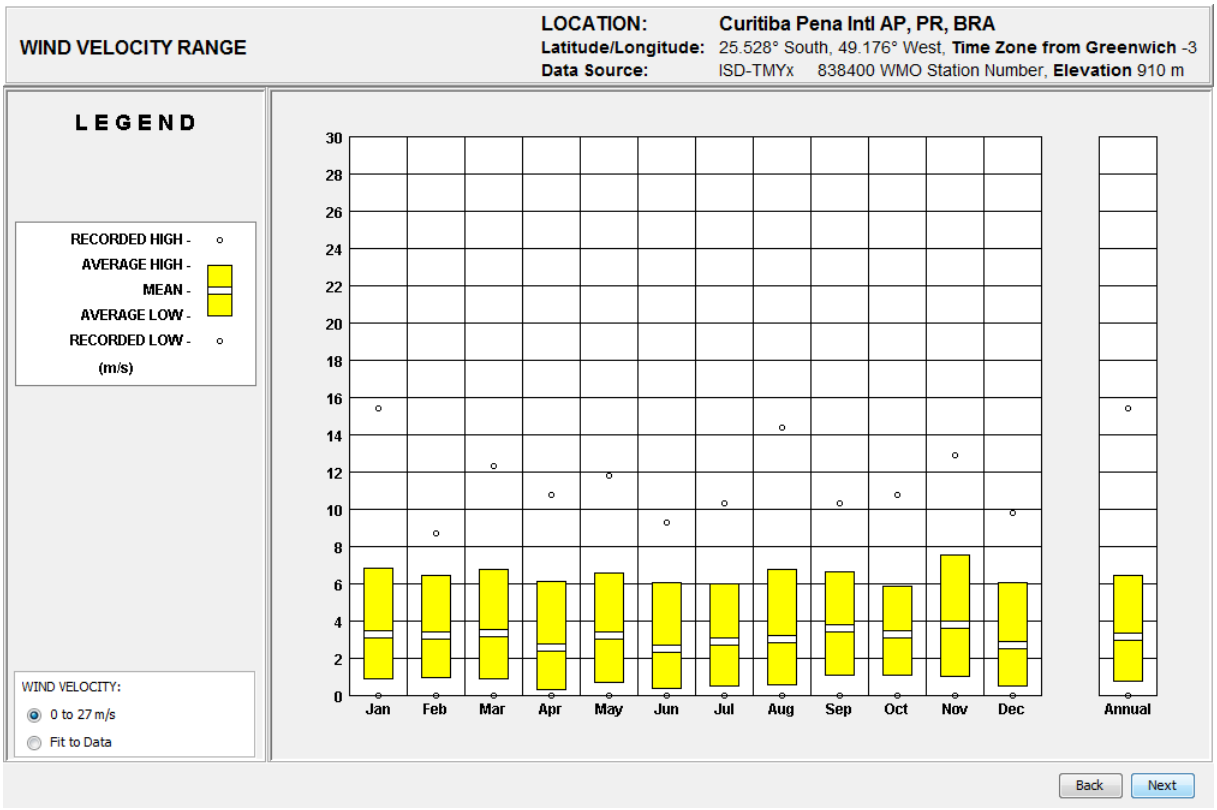
3a Curitiba-PR ZB1 G2



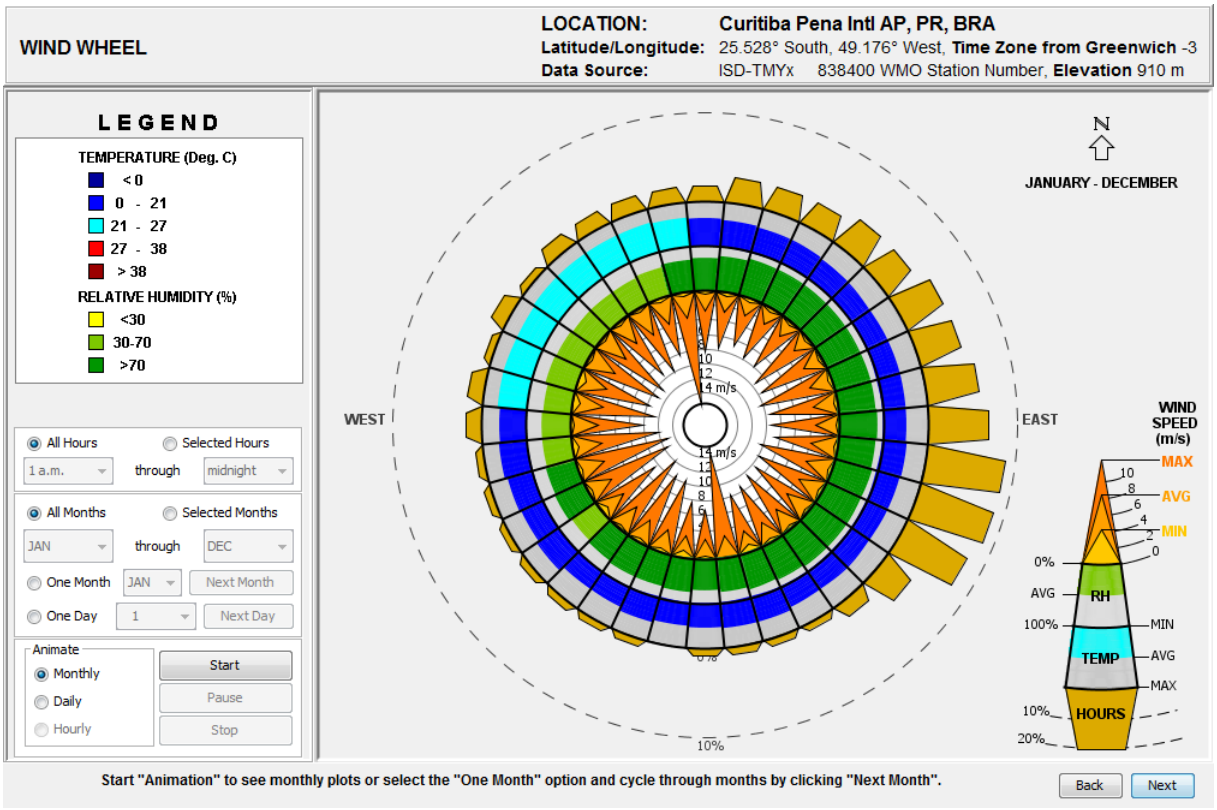
3b Curitiba-PR ZB1 G2



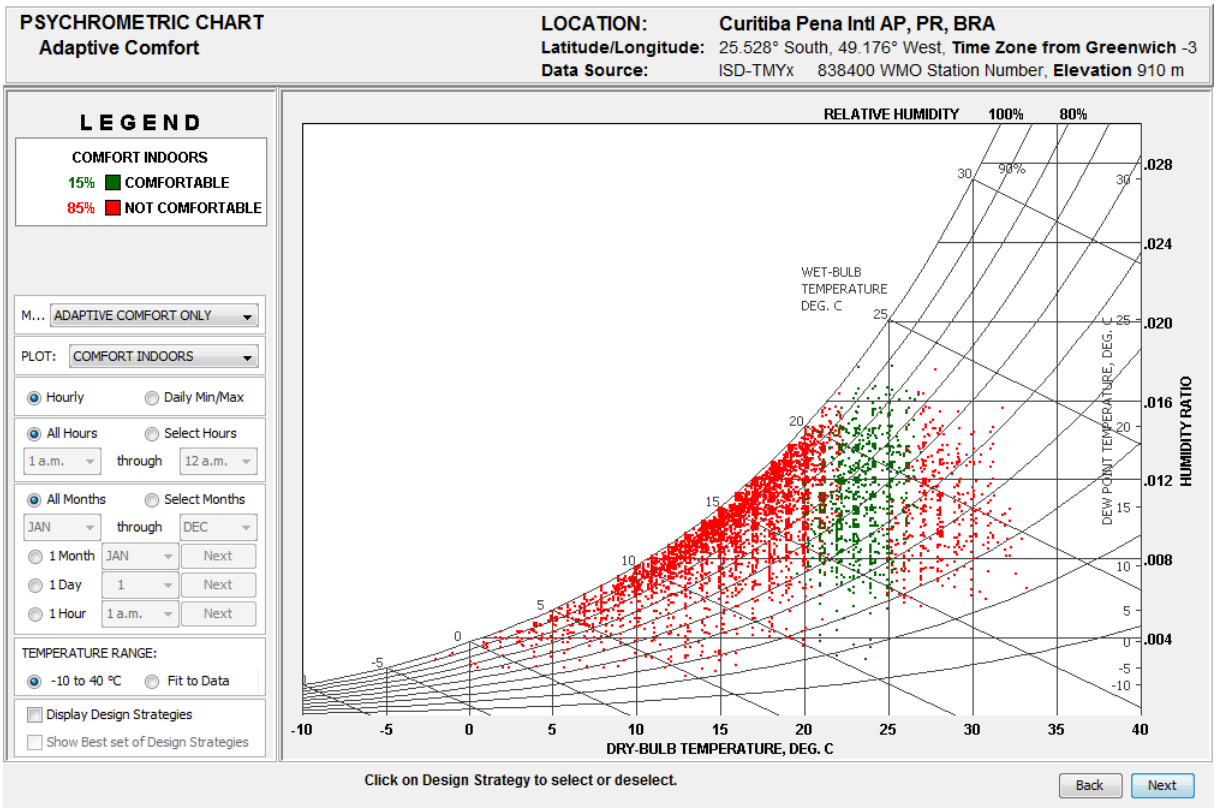
3c Curitiba-PR ZB1 G2



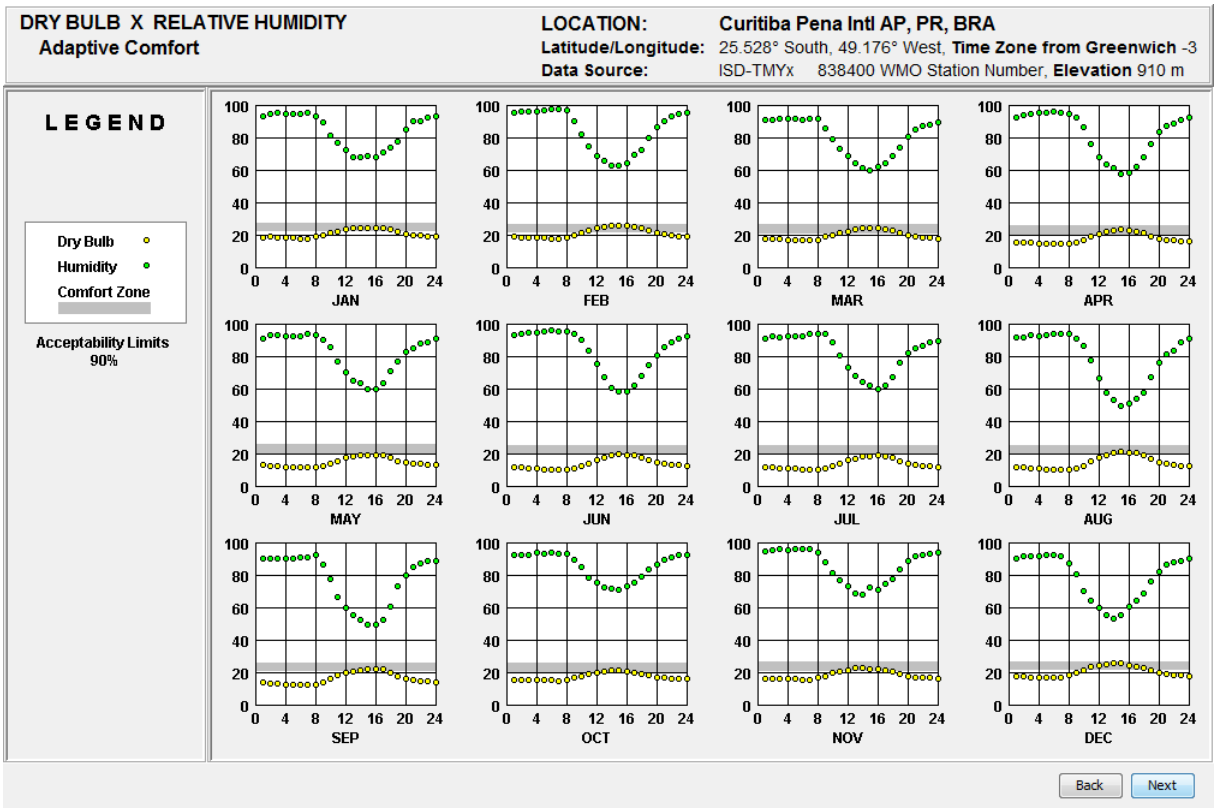
3d Curitiba-PR ZB1 G2



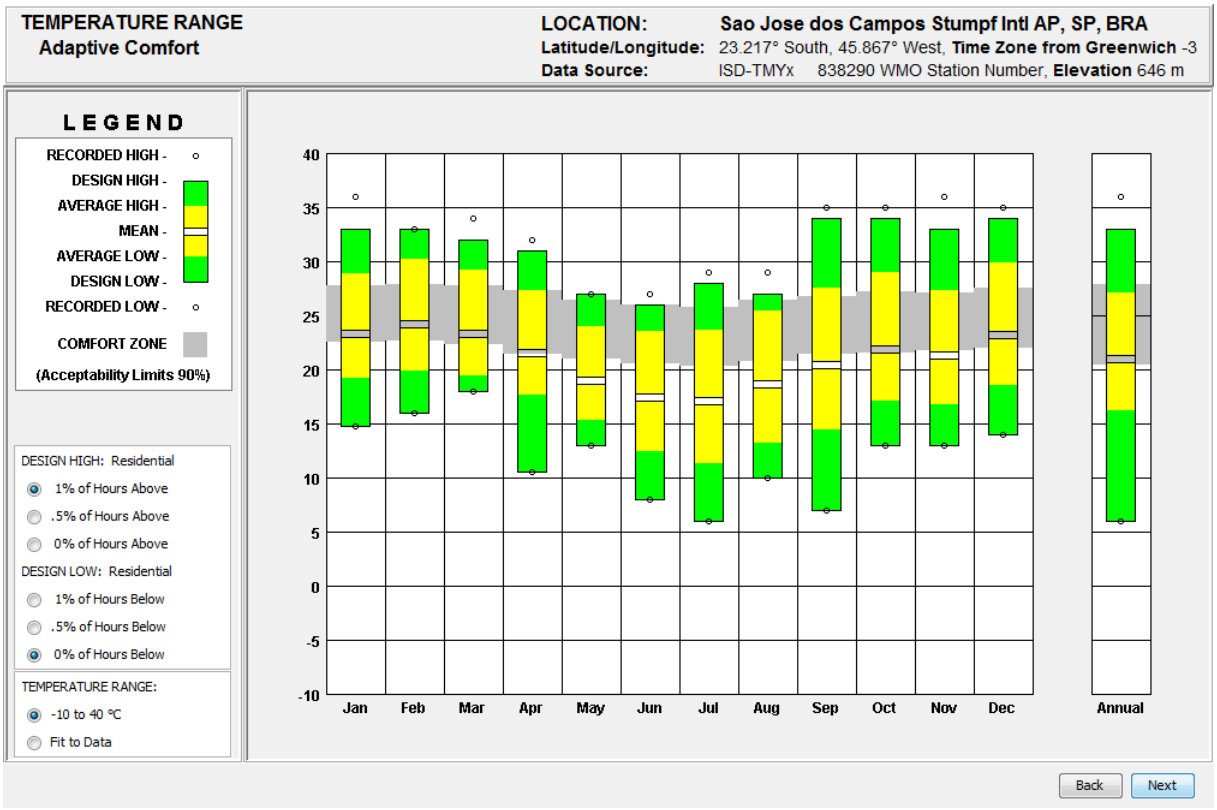
3e Curitiba-PR ZB1 G2



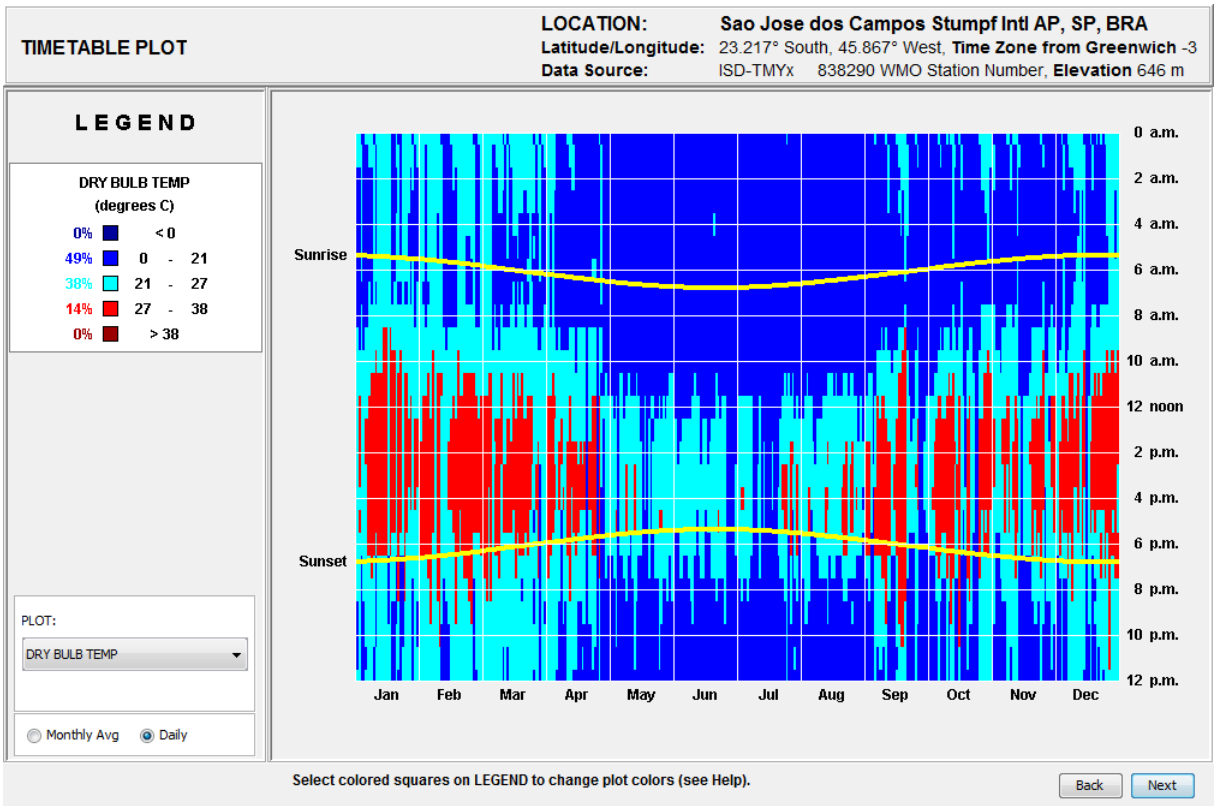
3f Curitiba-PR ZB1 G2



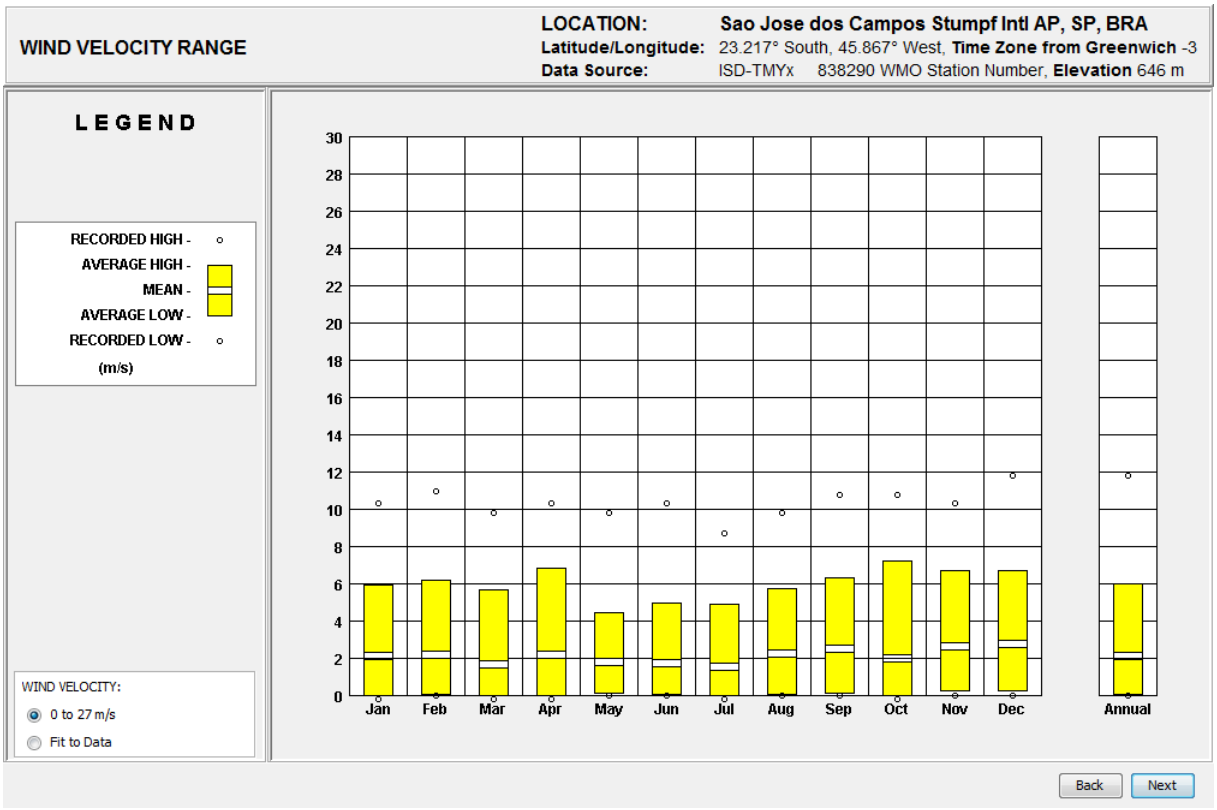
4a São José dos Campos-SP ZB3 G3



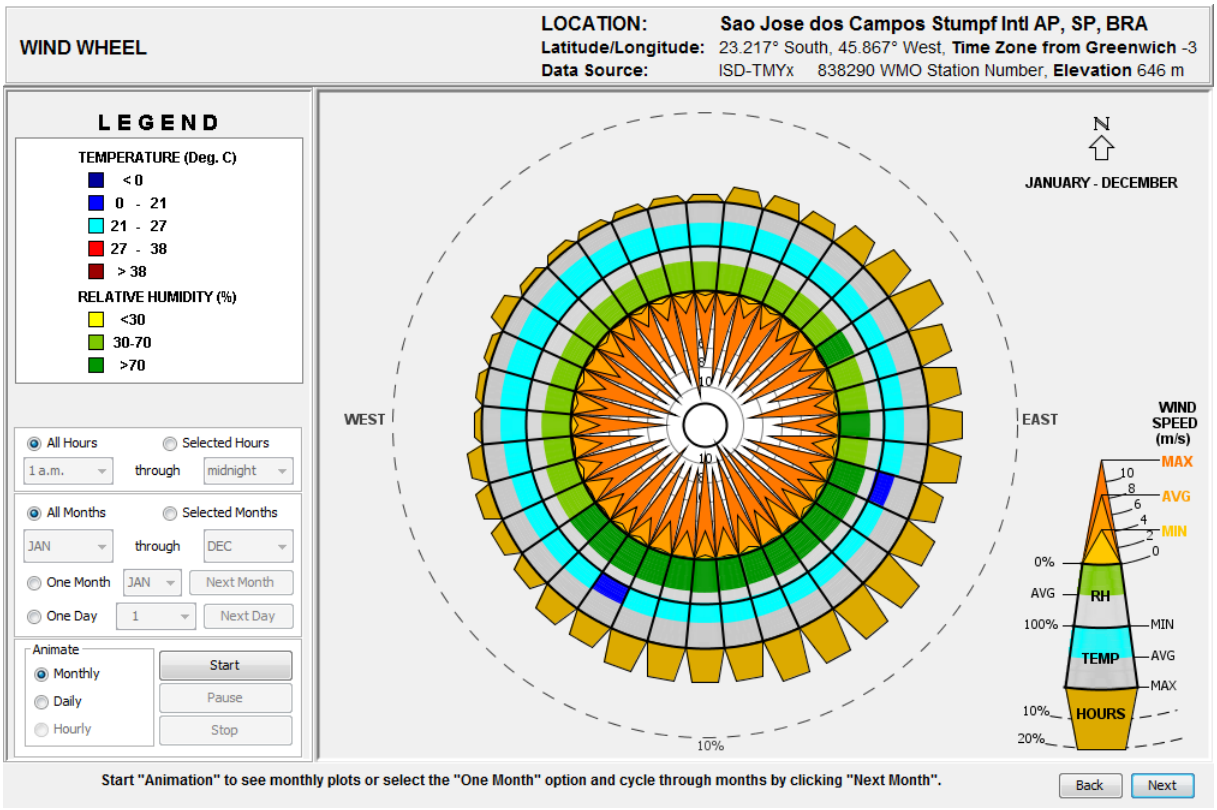
4b São José dos Campos-SP ZB3 G3



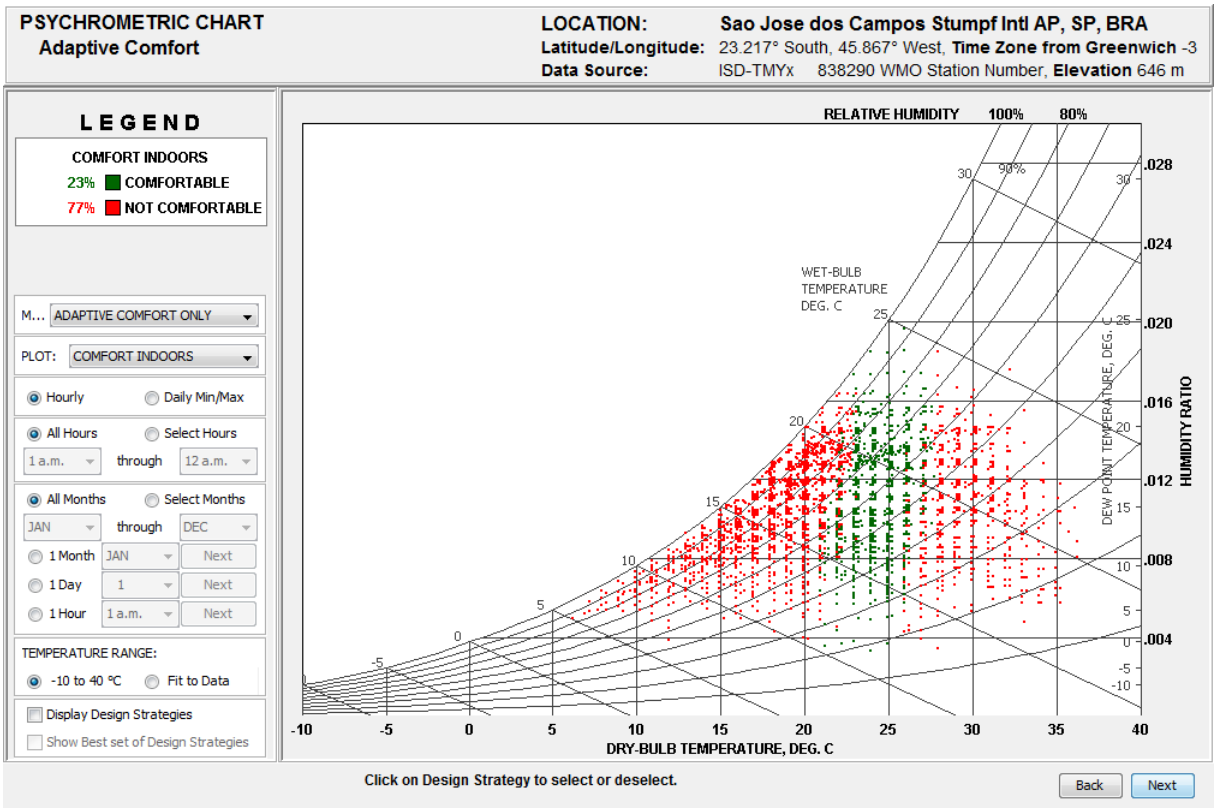
4c São José dos Campos-SP ZB3 G3



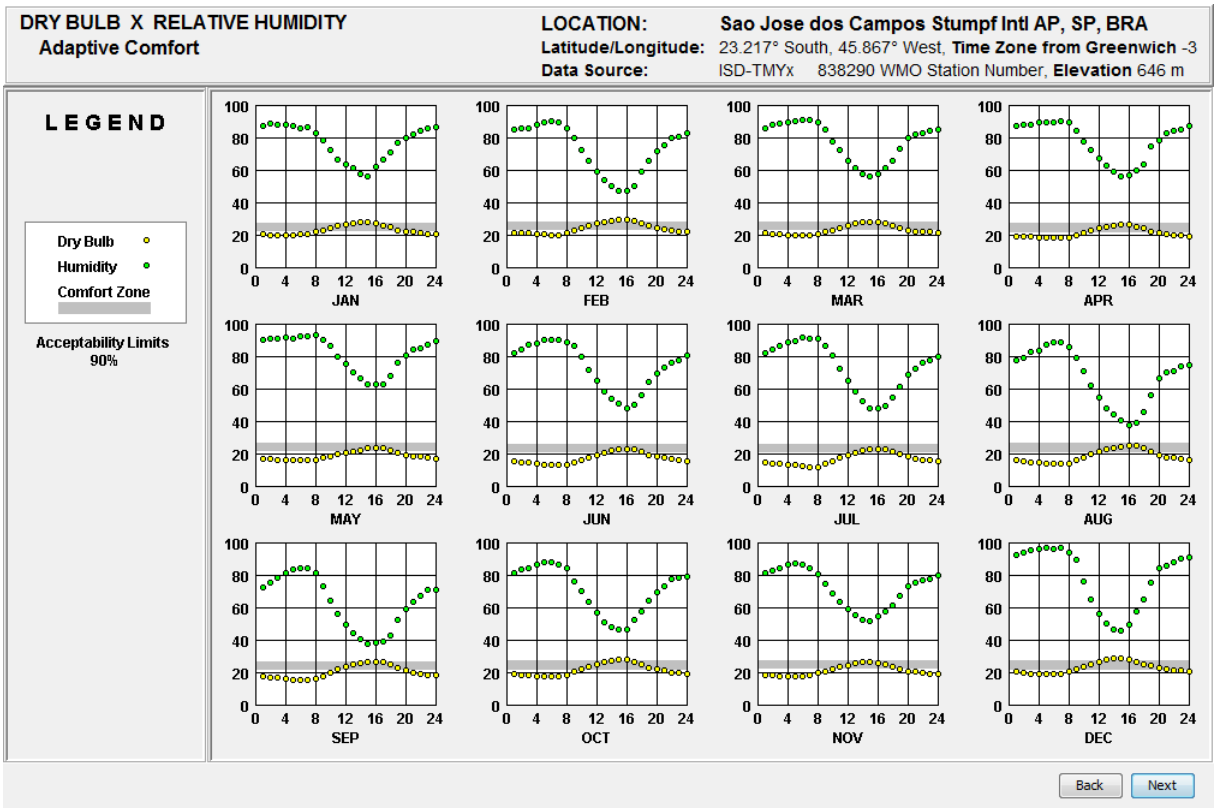
4d São José dos Campos-SP ZB3 G3



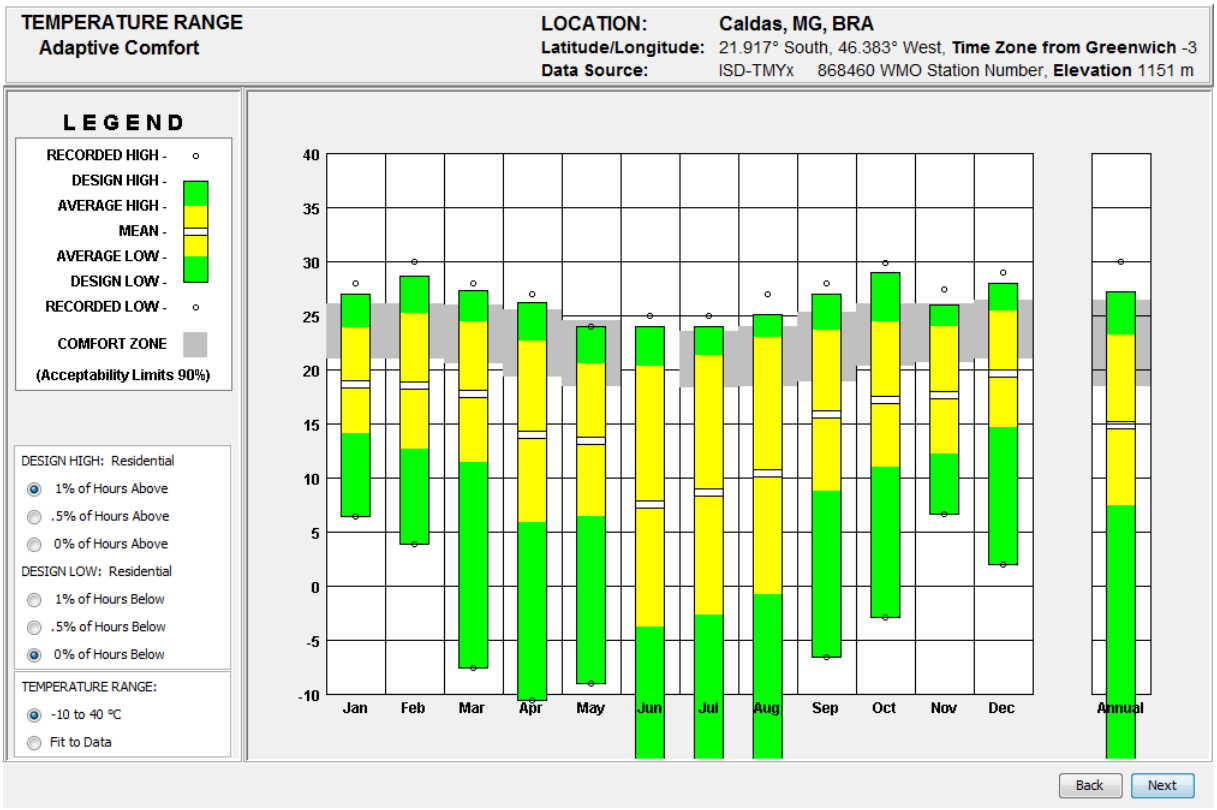
4e São José dos Campos-SP ZB3 G3



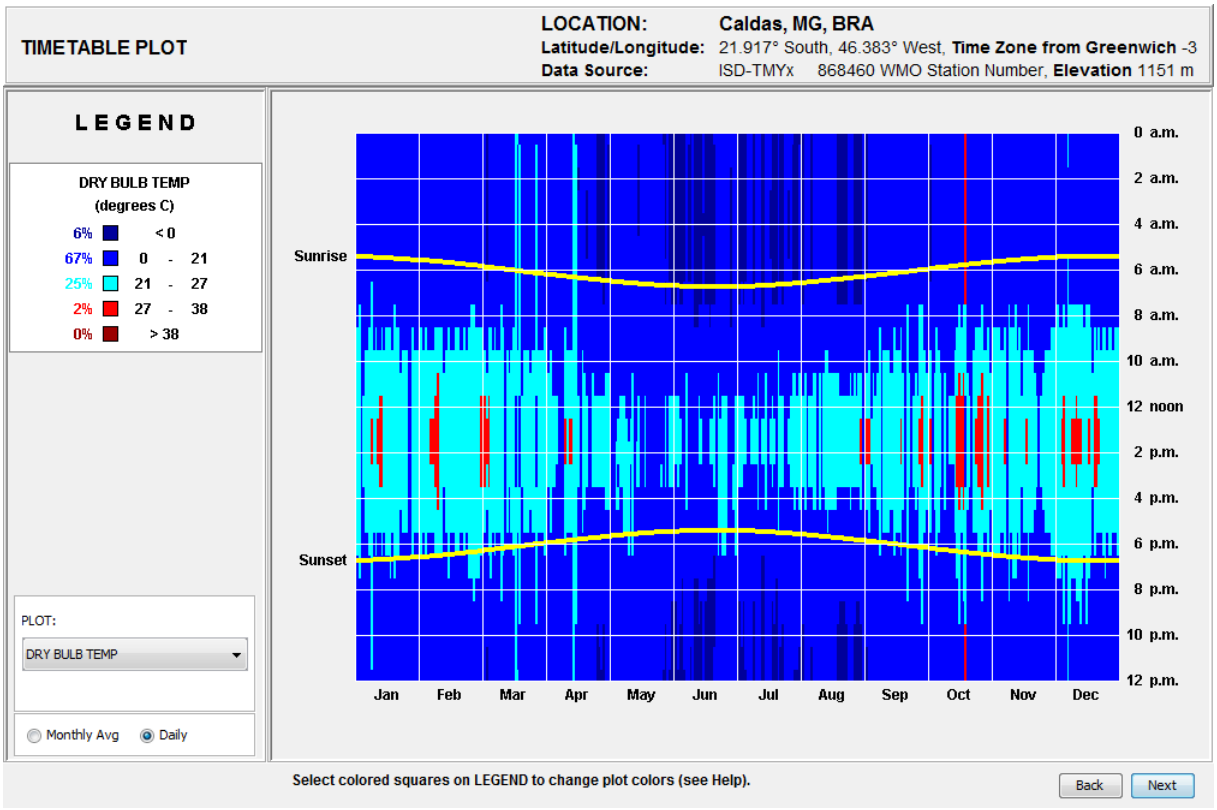
4f São José dos Campos-SP ZB3 G3



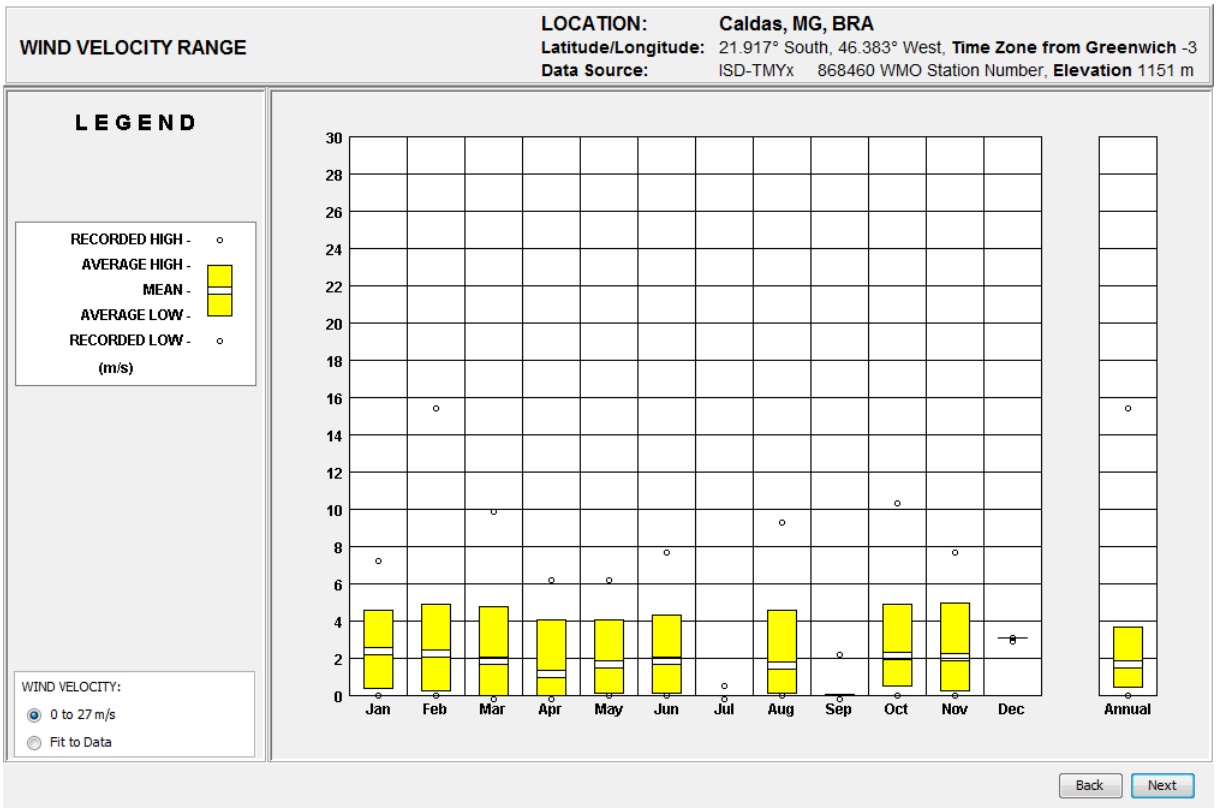
5a Caldas-MG ZB3 G4



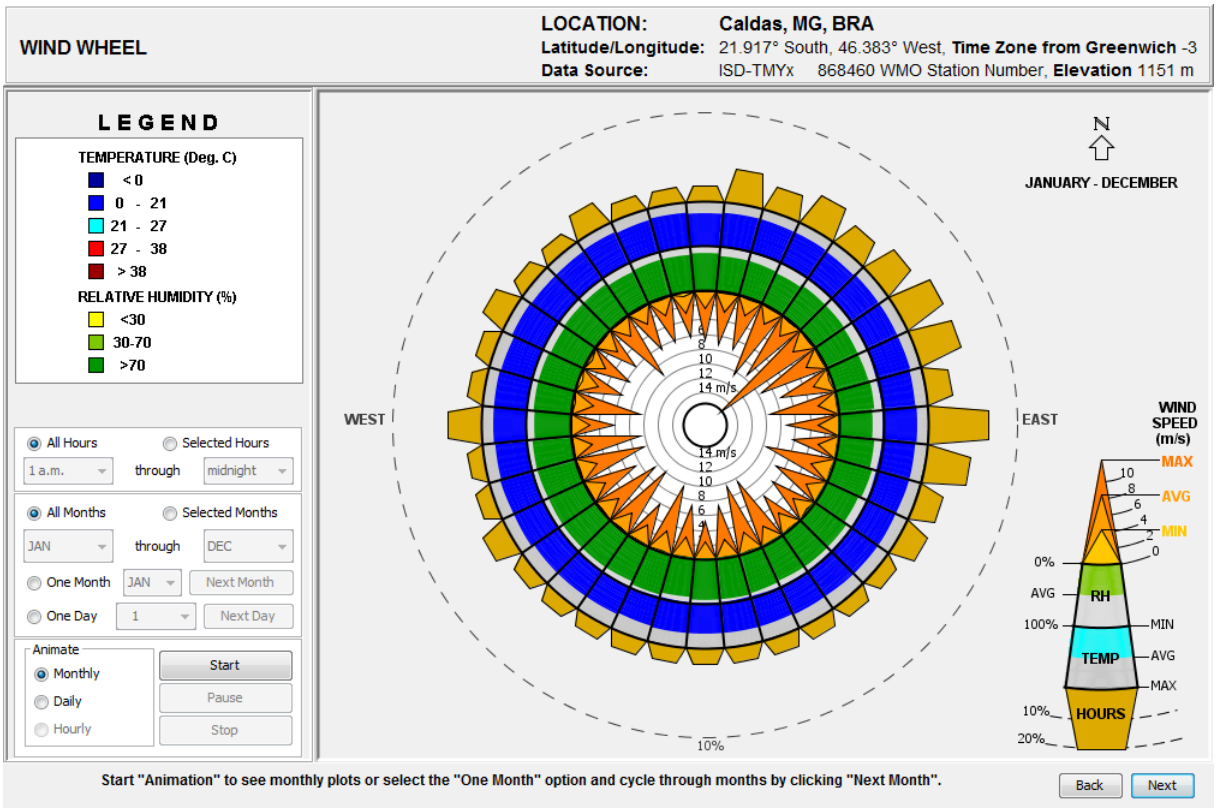
5b Caldas-MG ZB3 G4



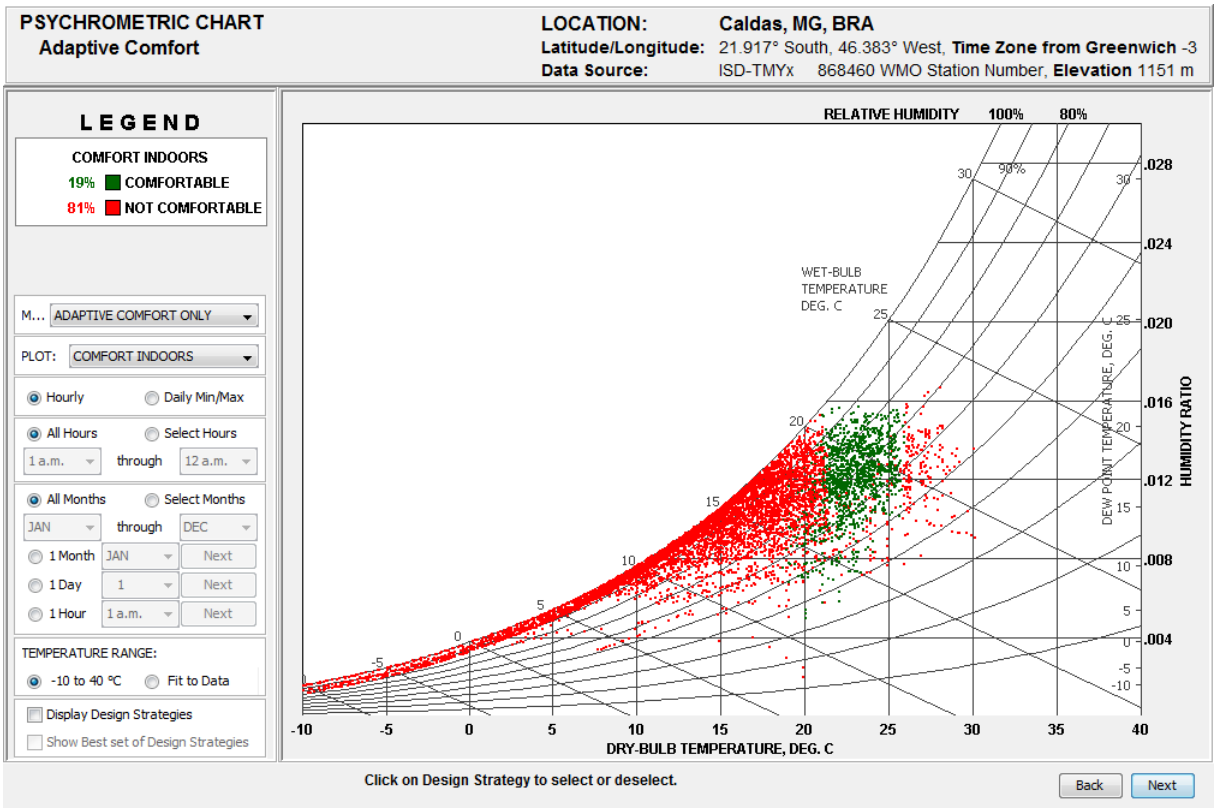
5c Caldas-MG ZB3 G4



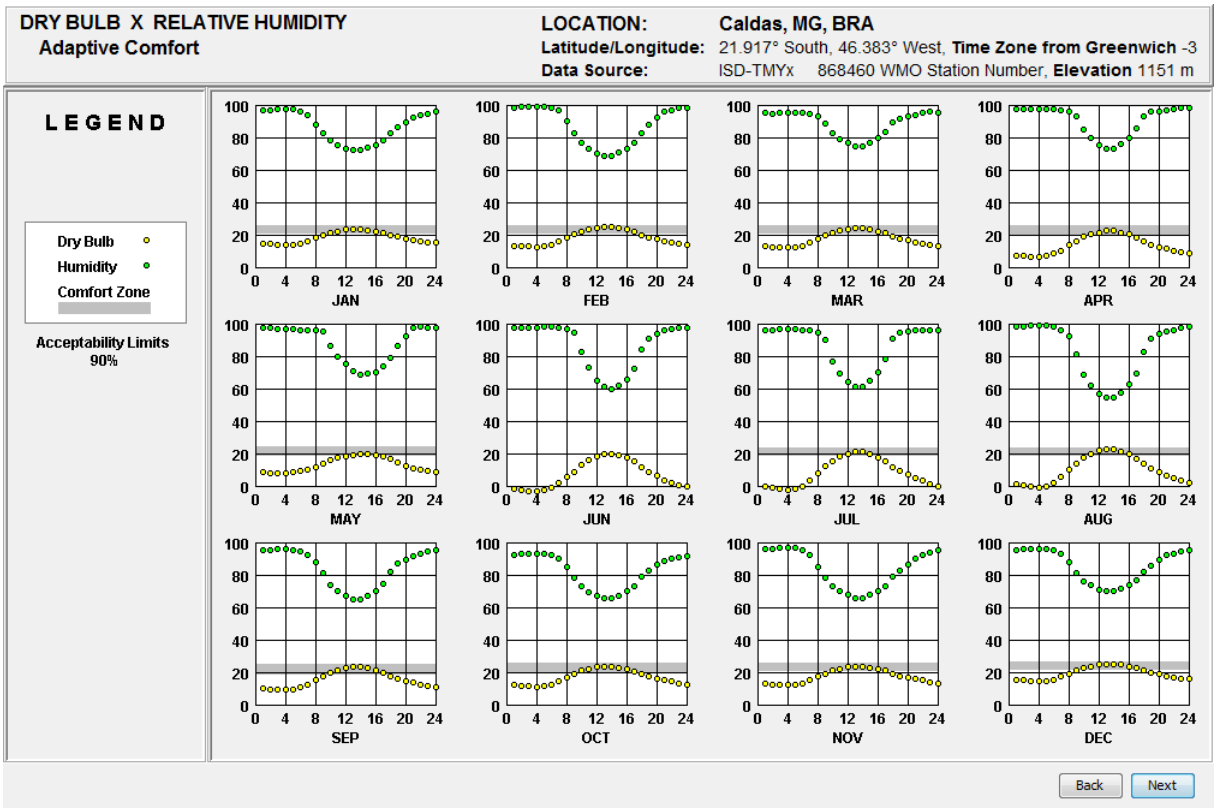
5d Caldas-MG ZB3 G4



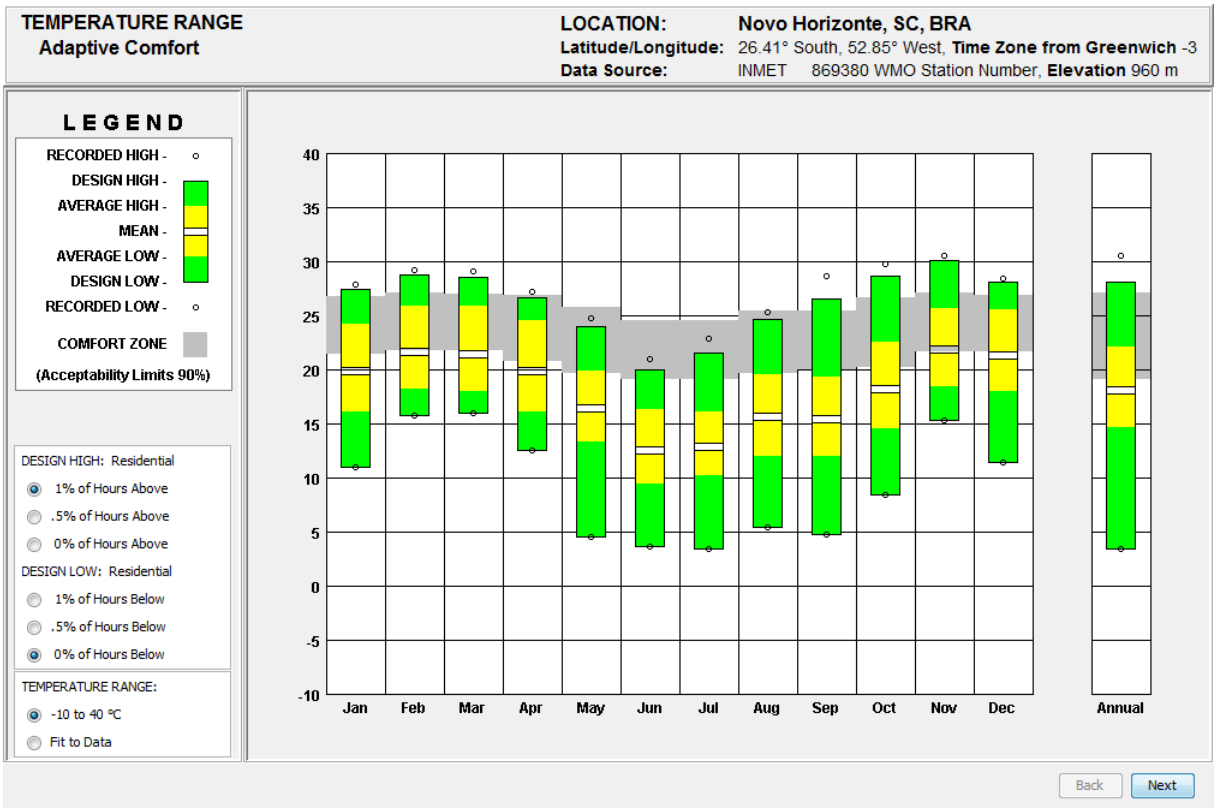
5e Caldas-MG ZB3 G4



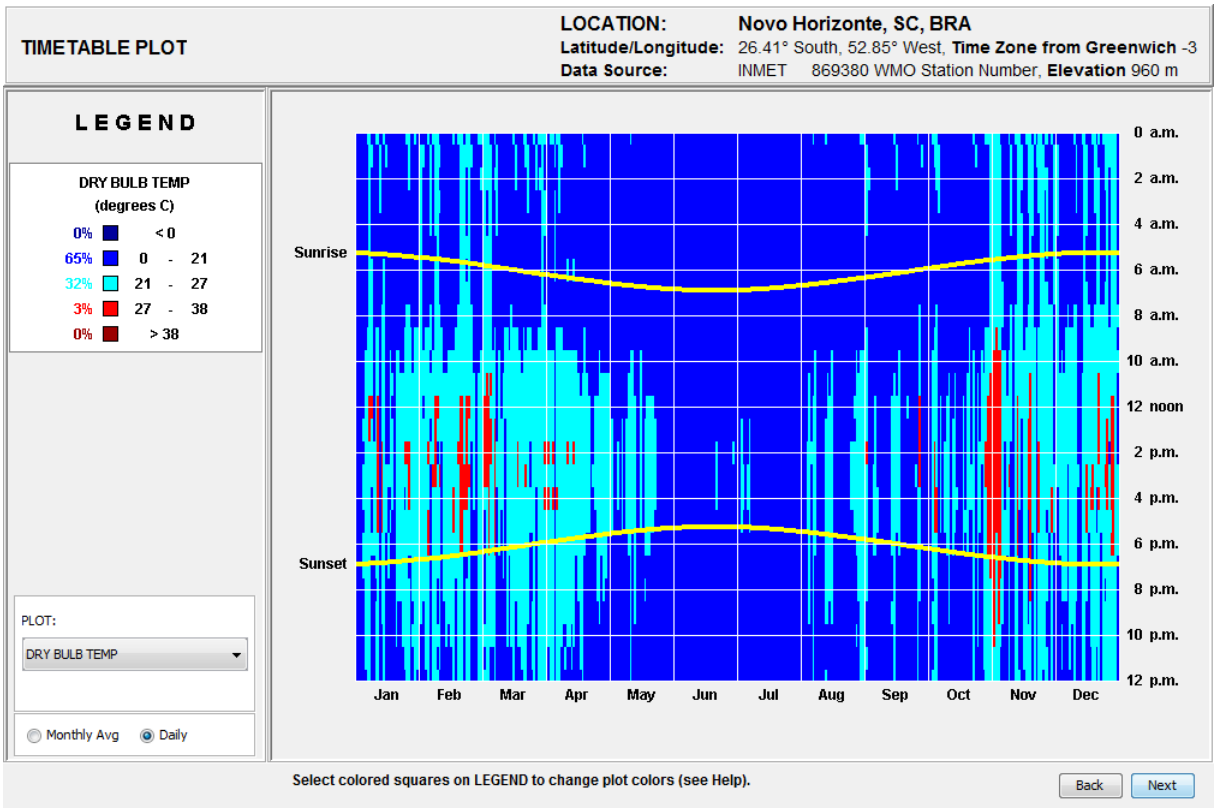
5f Caldas-MG ZB3 G4



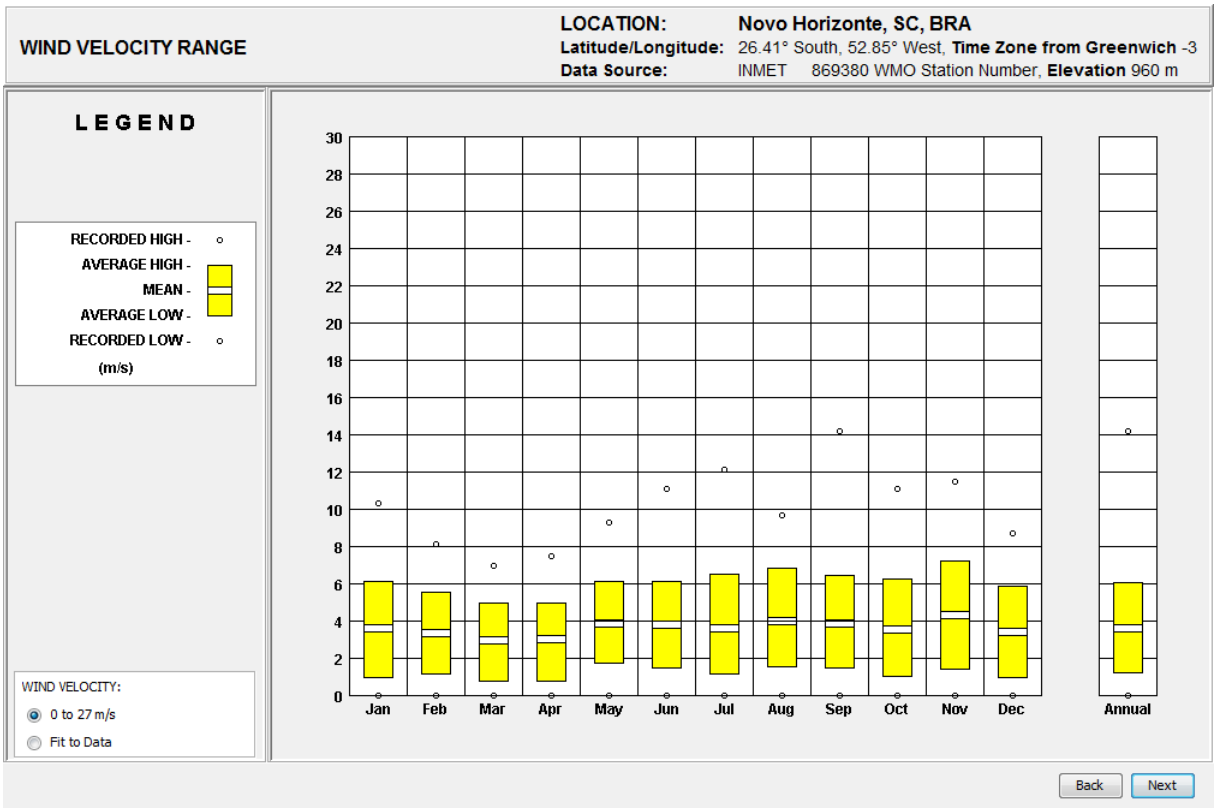
6a Novo Horizonte-SC ZB2 G5



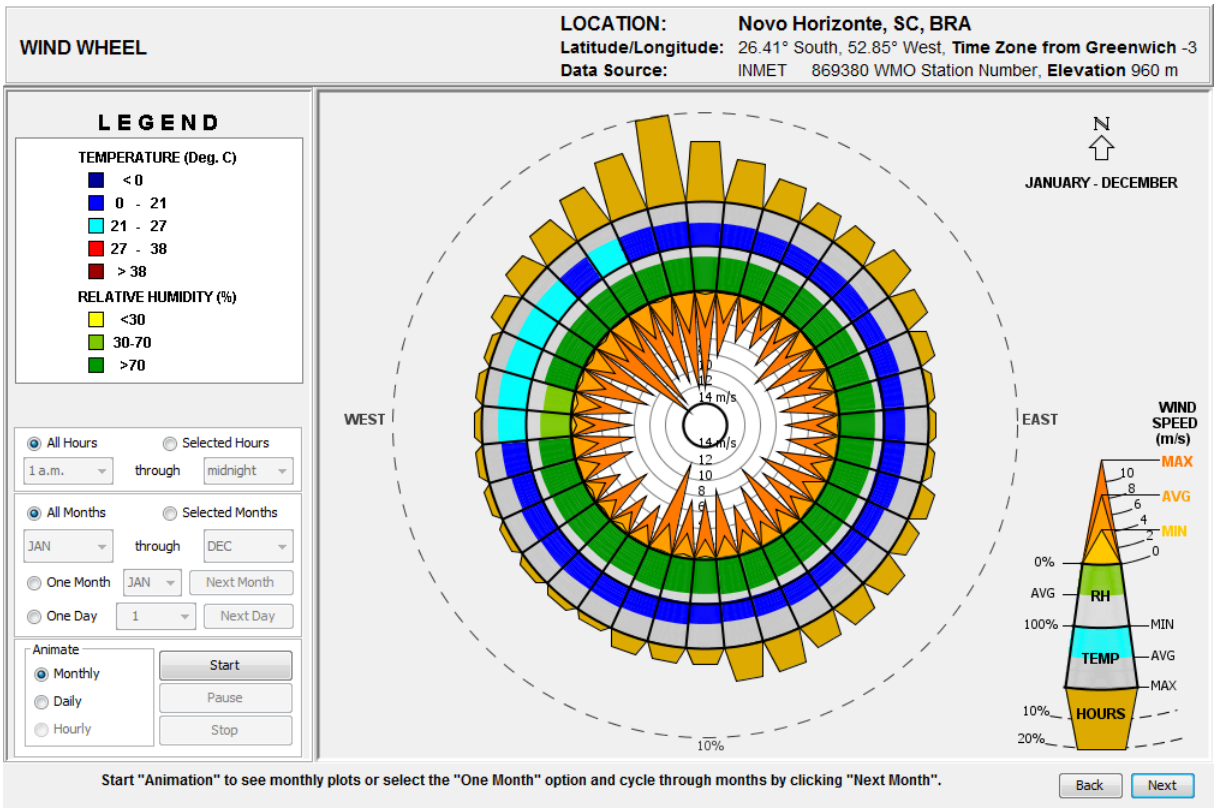
6b Novo Horizonte-SC ZB2 G5



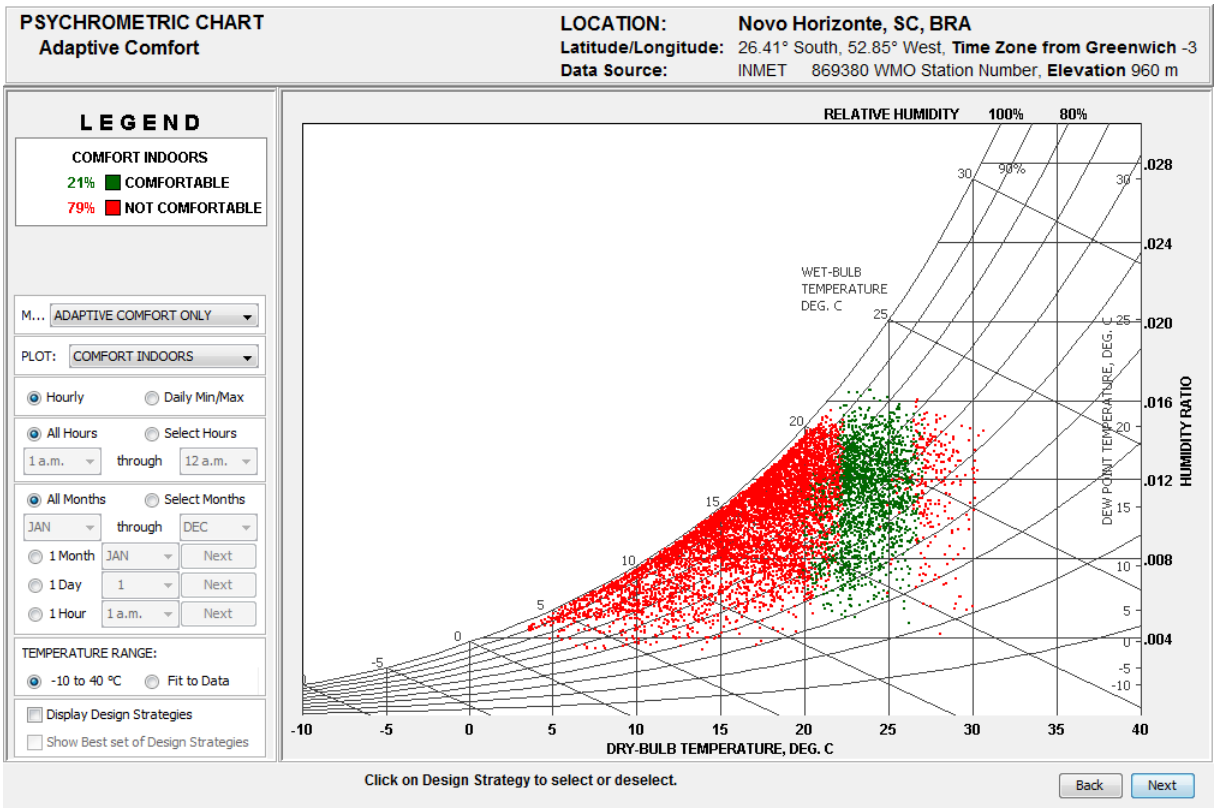
6c Novo Horizonte-SC ZB2 G5



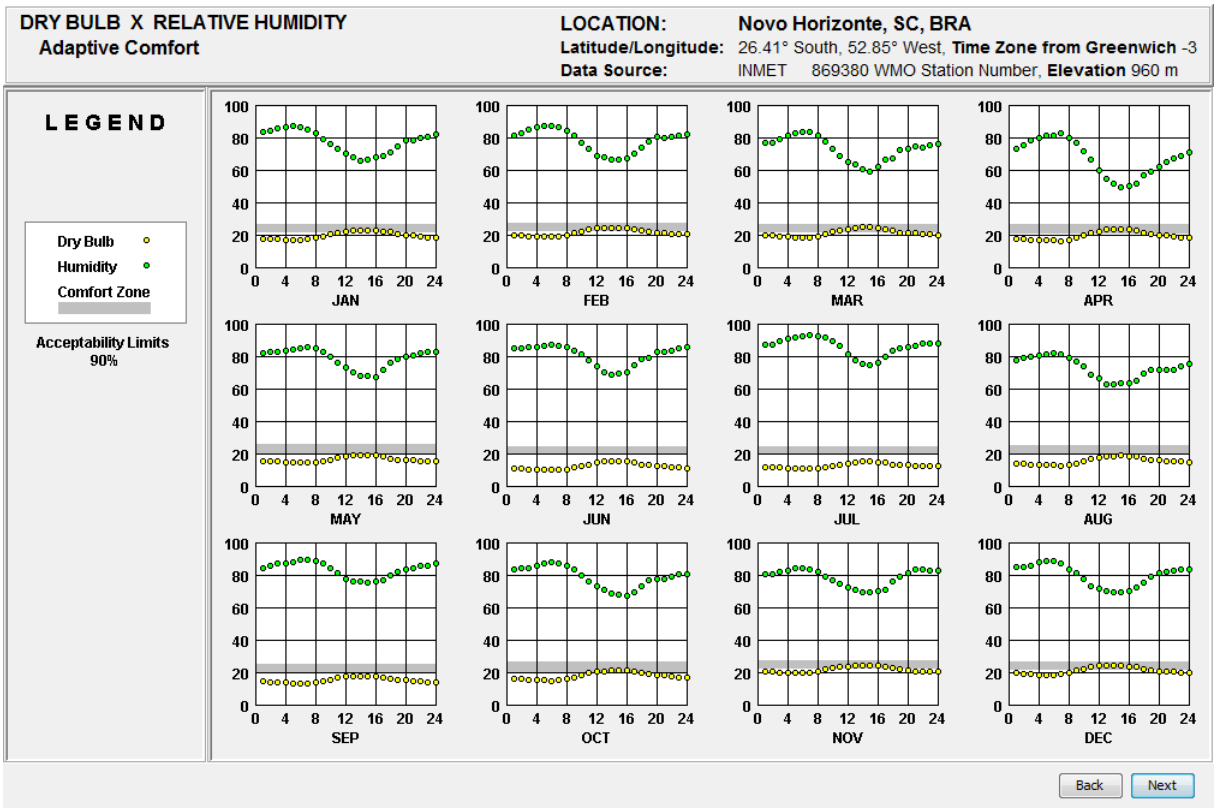
6d Novo Horizonte-SC ZB2 G5



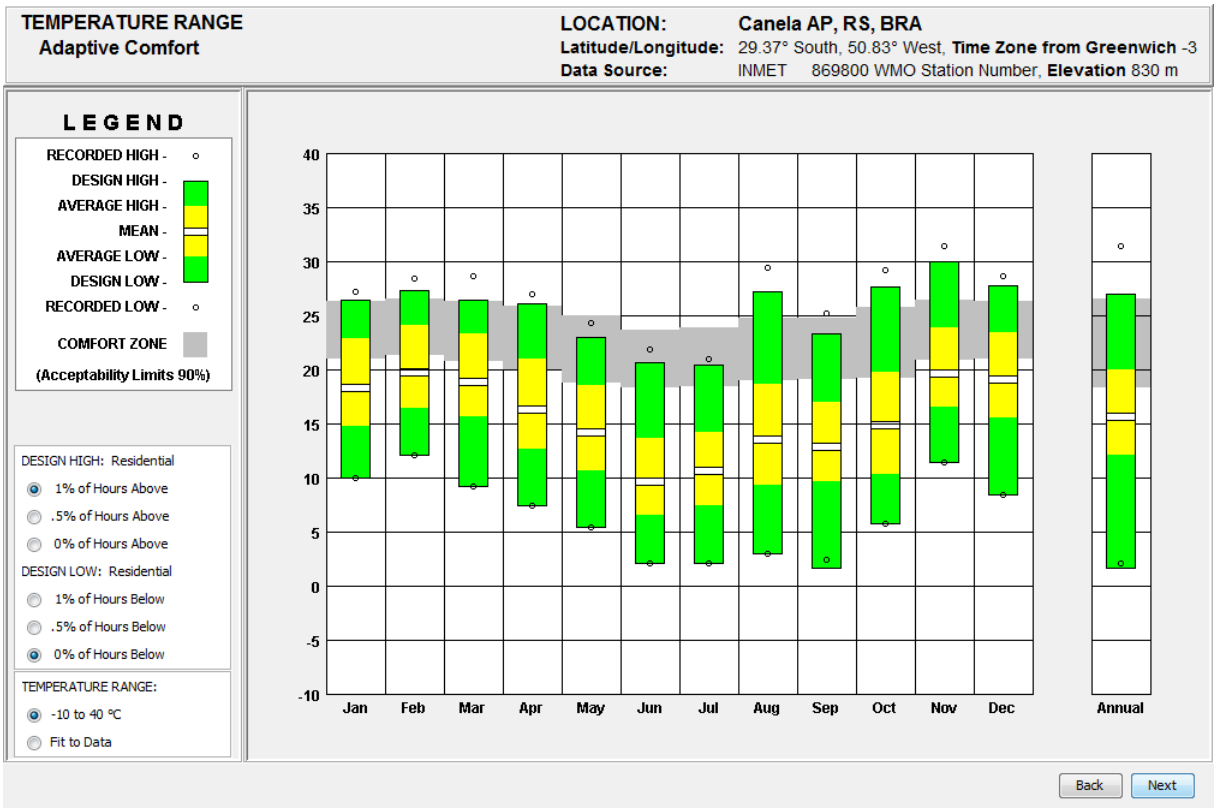
6e Novo Horizonte-SC ZB2 G5



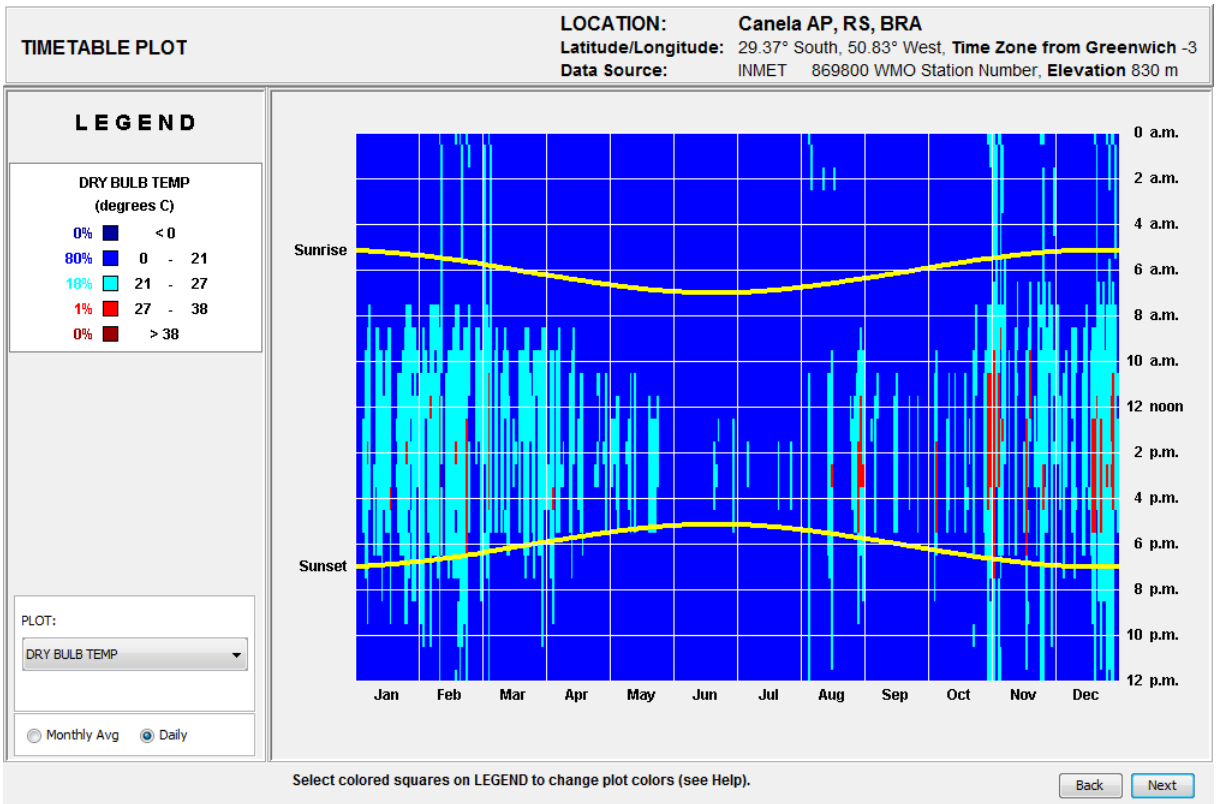
6f Novo Horizonte-SC ZB2 G5



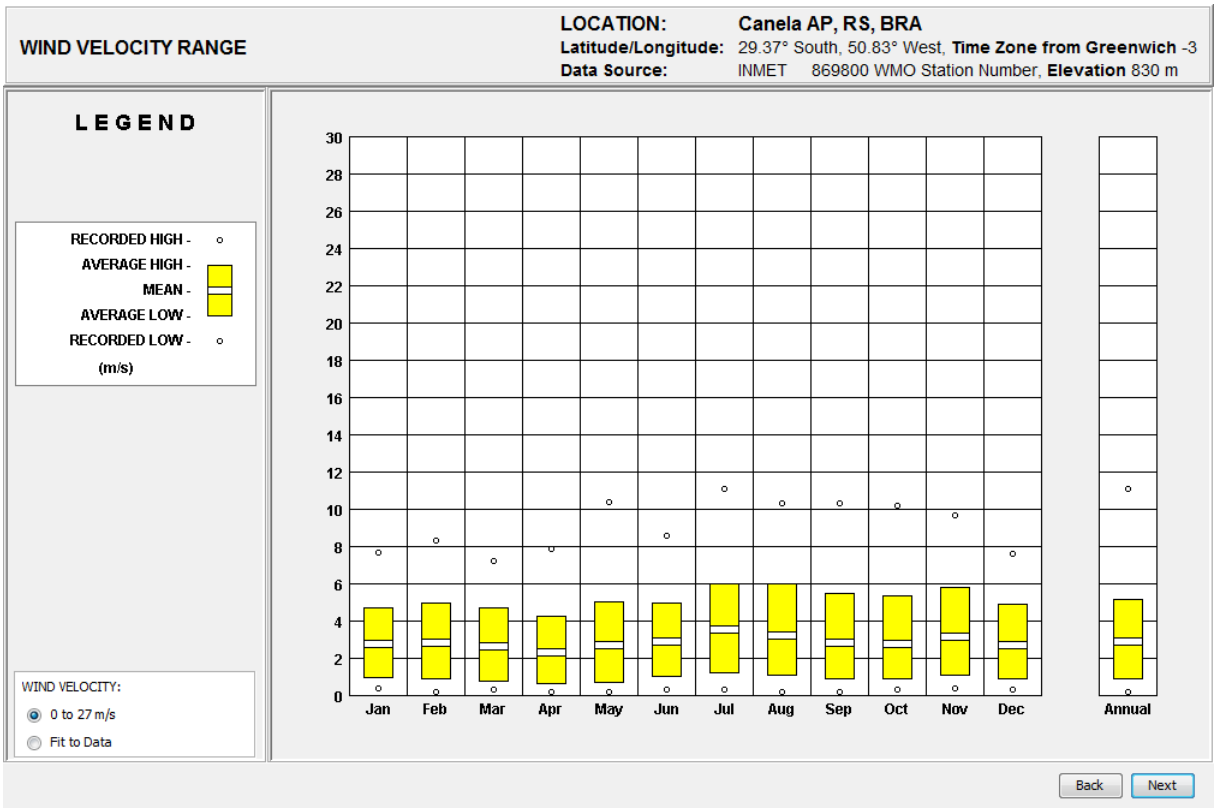
7a Canela-RS ZB1 G6



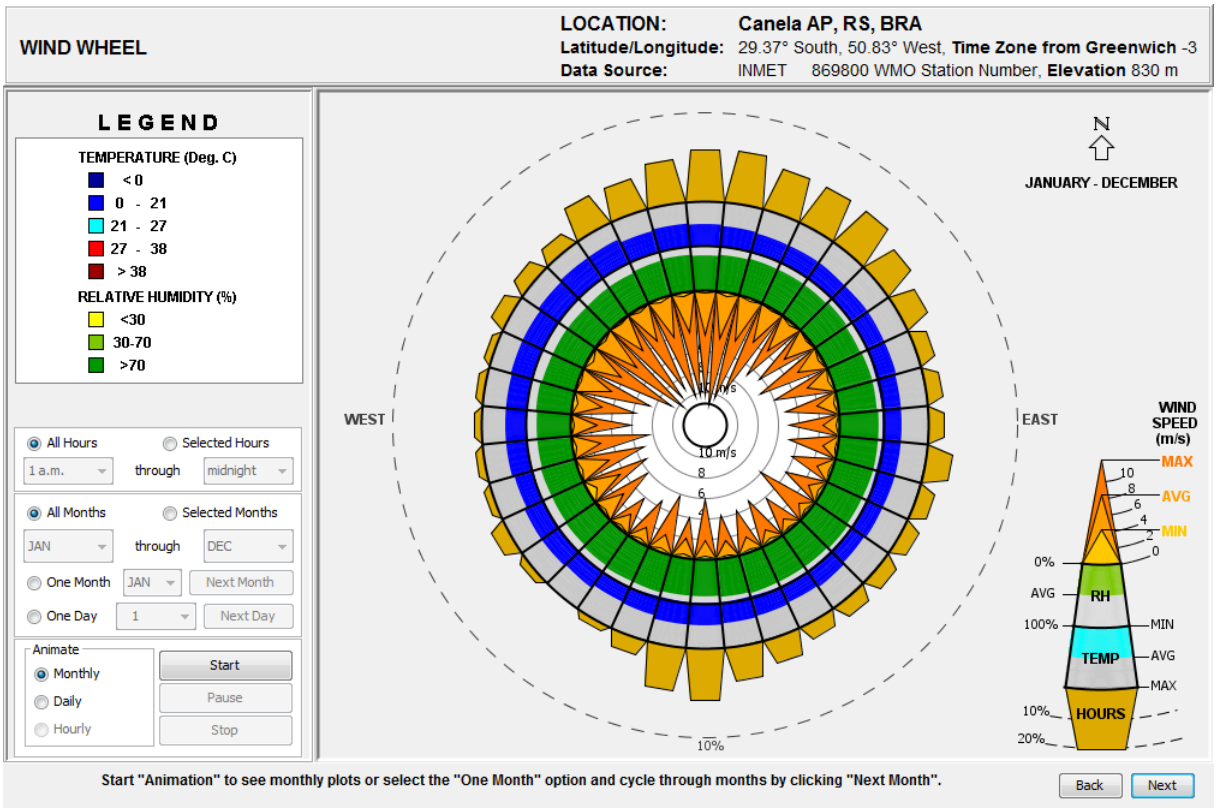
7b Canela-RS ZB1 G6



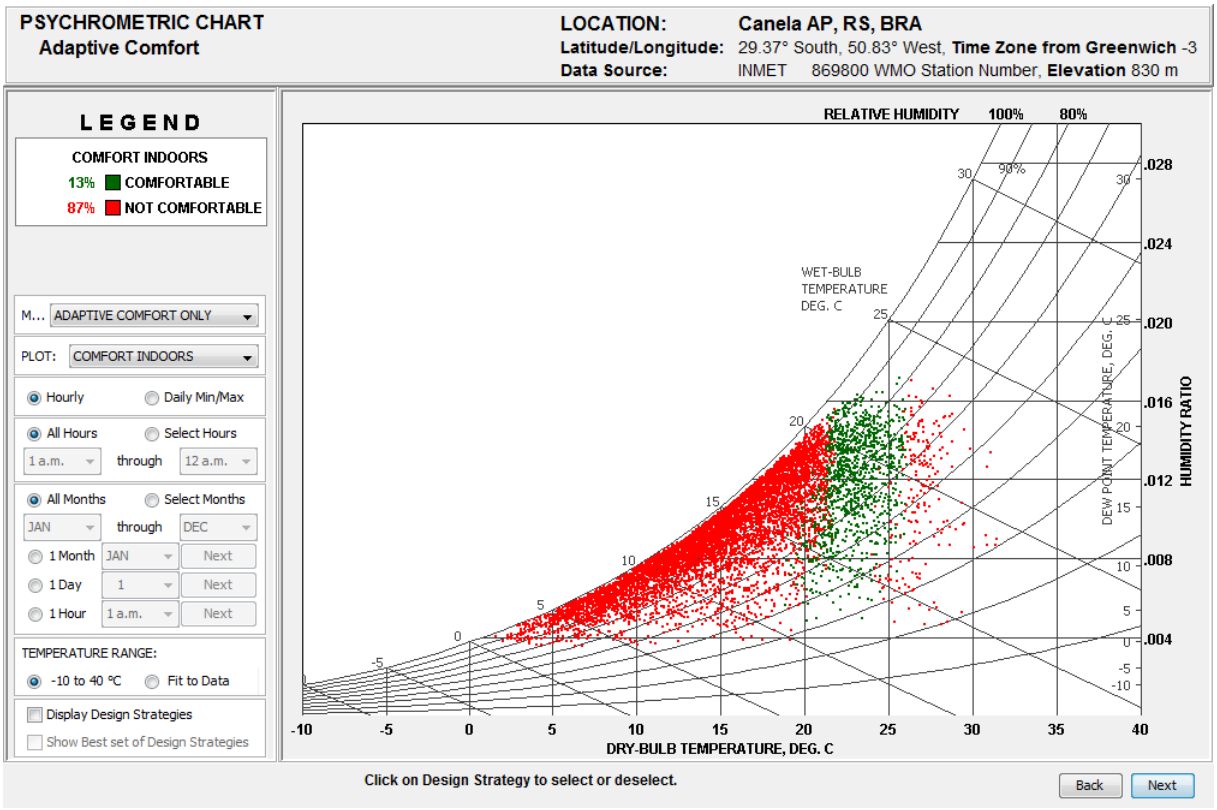
7c Canela-RS ZB1 G6



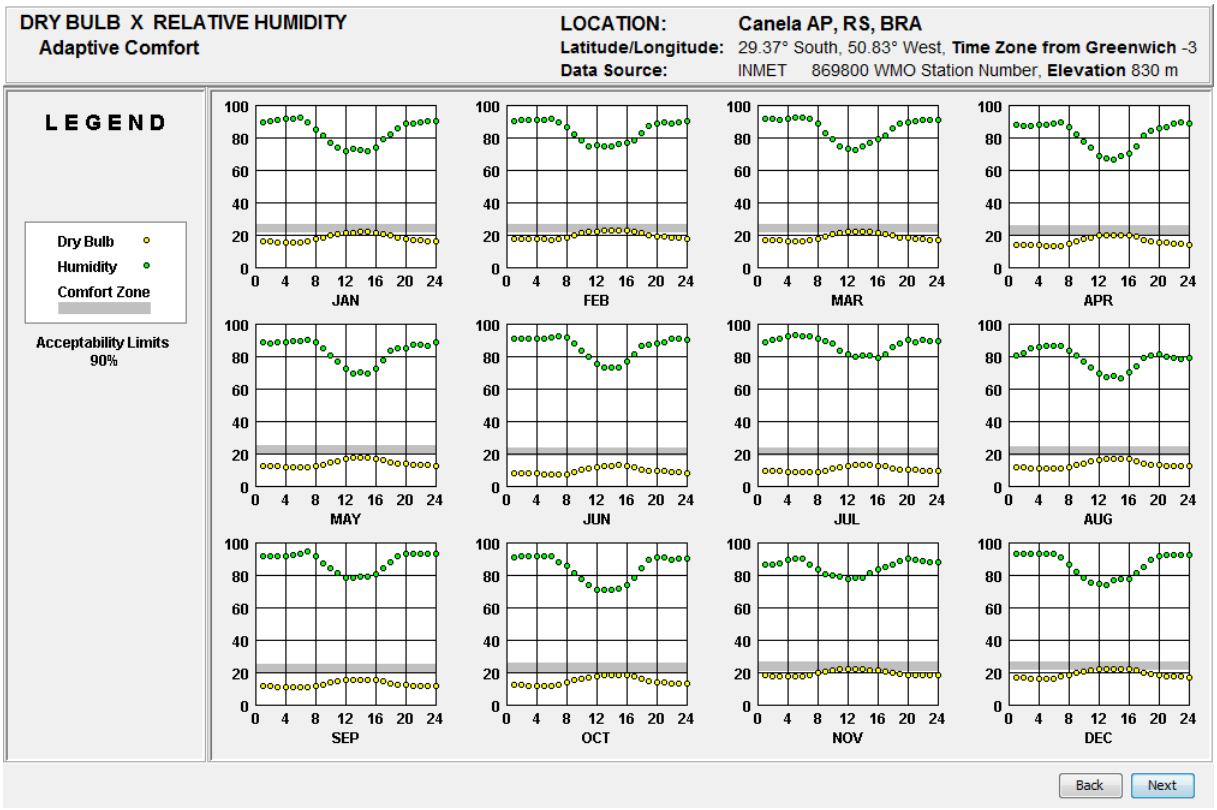
7d Canela-RS ZB1 G6



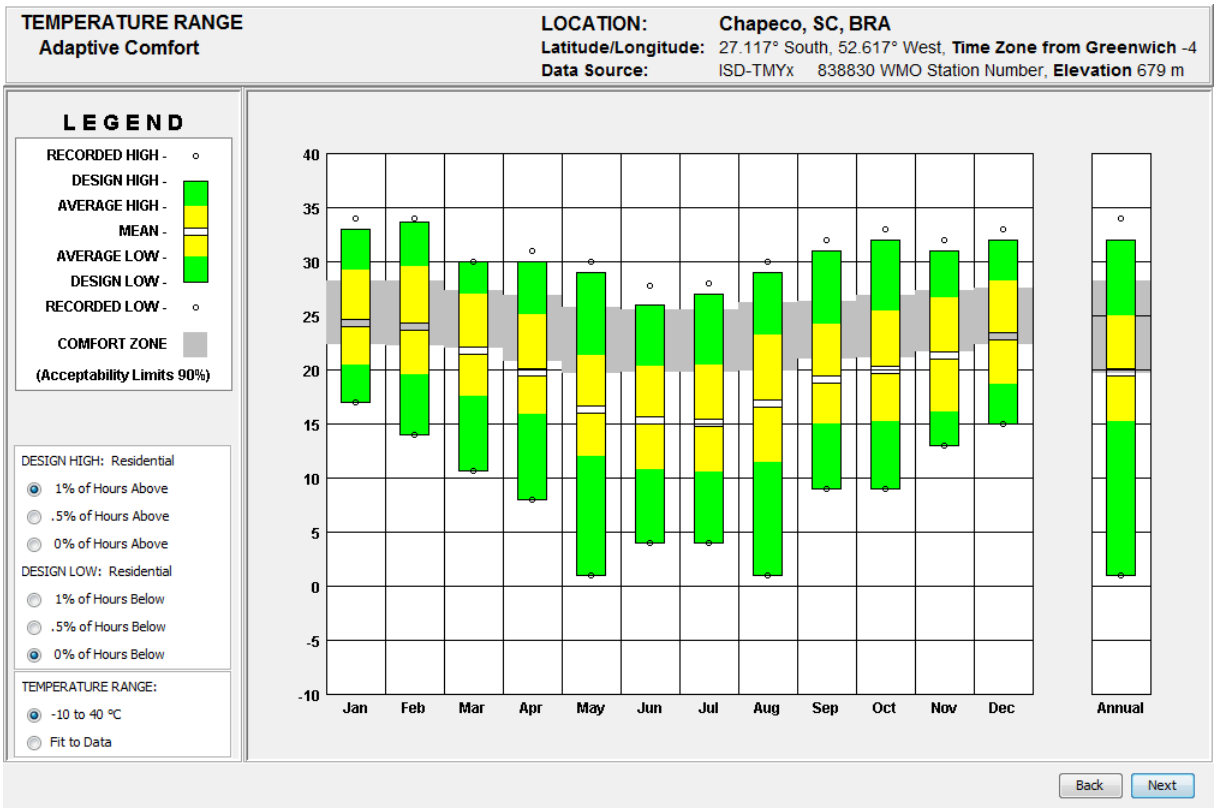
7e Canela-RS ZB1 G6



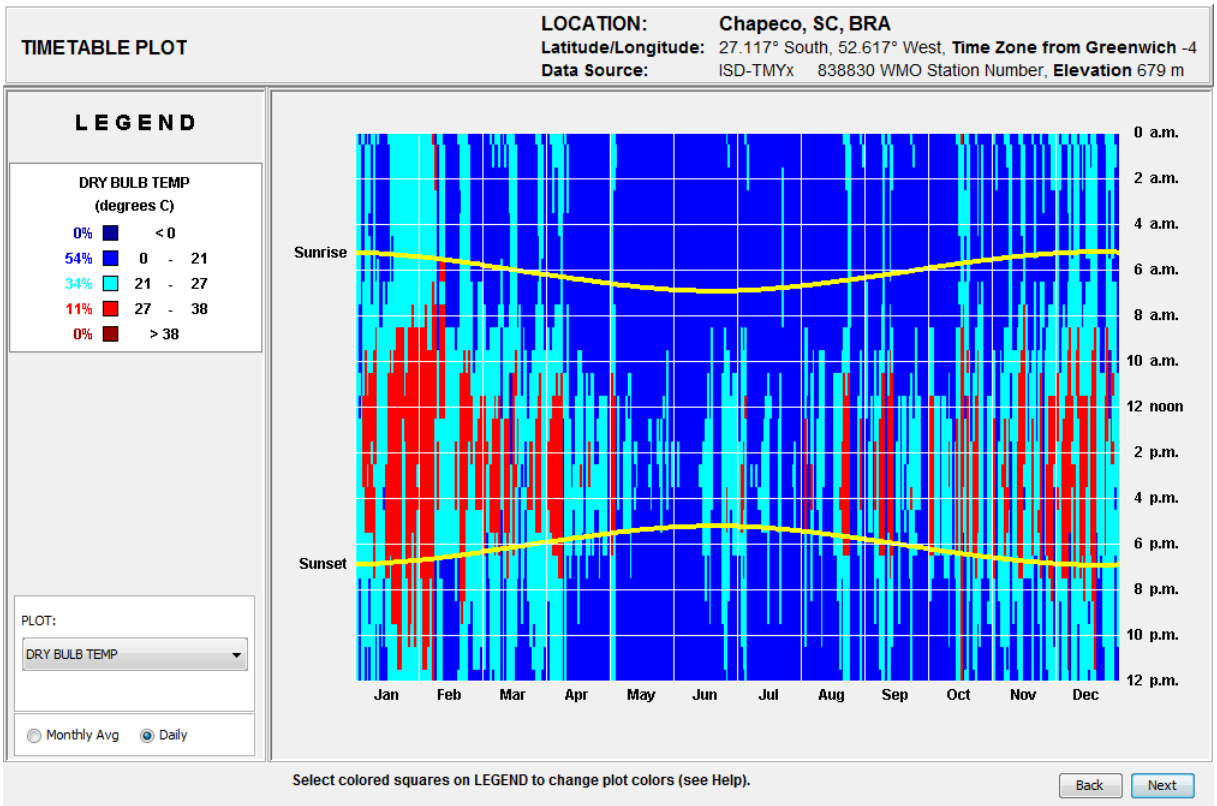
7f Canela-RS ZB1 G6



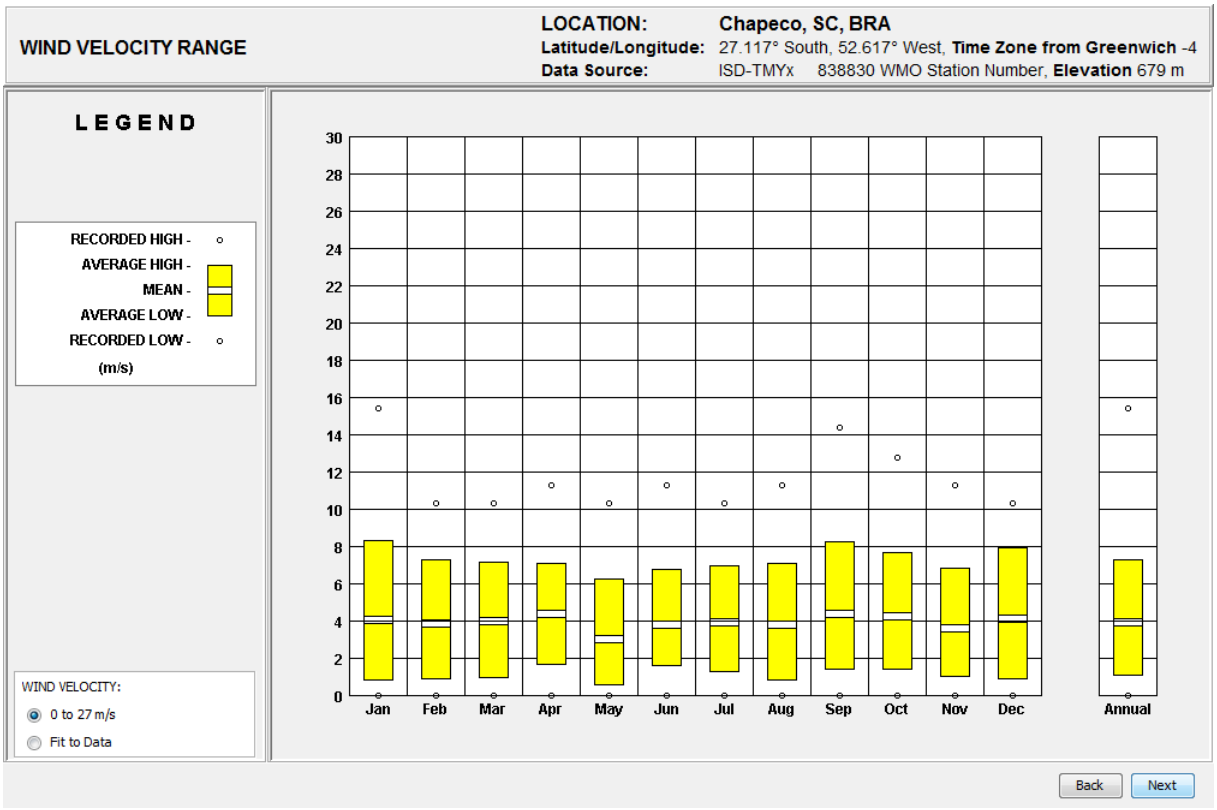
8a Chapecó-SC ZB3 G7



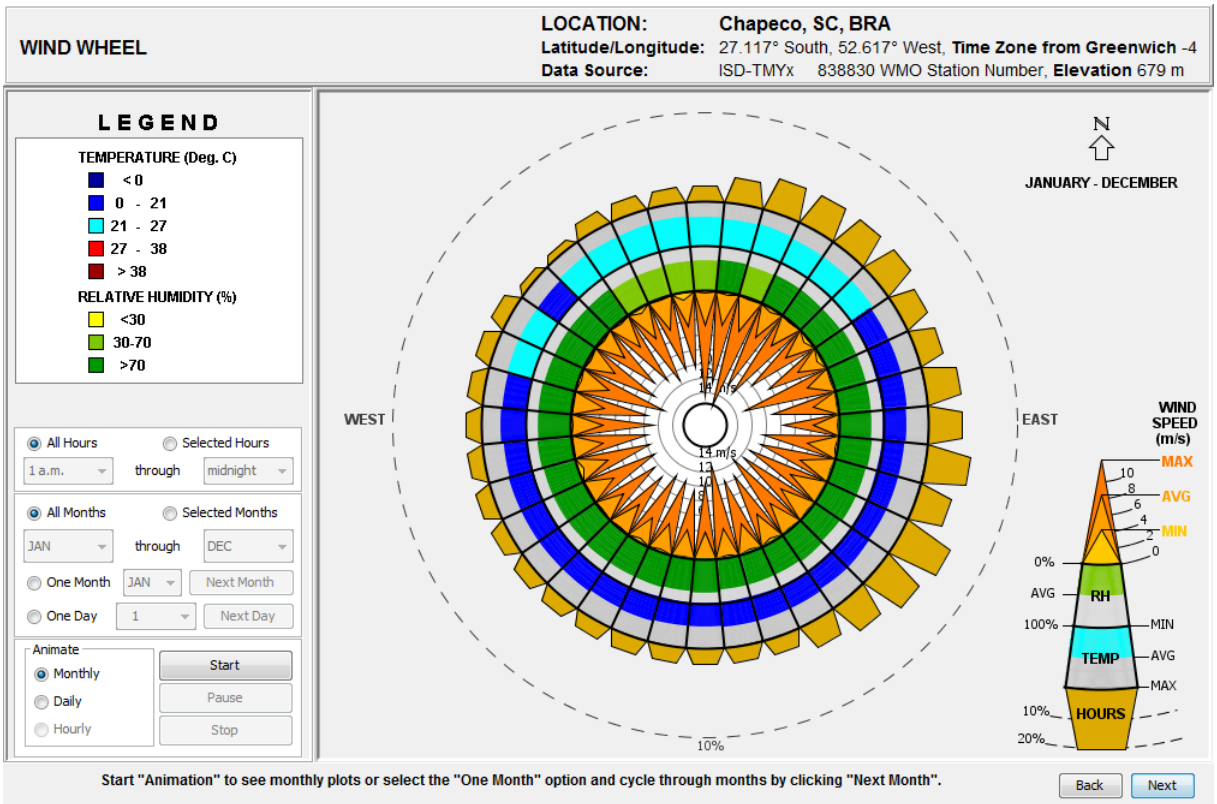
8b Chapecó-SC ZB3 G7



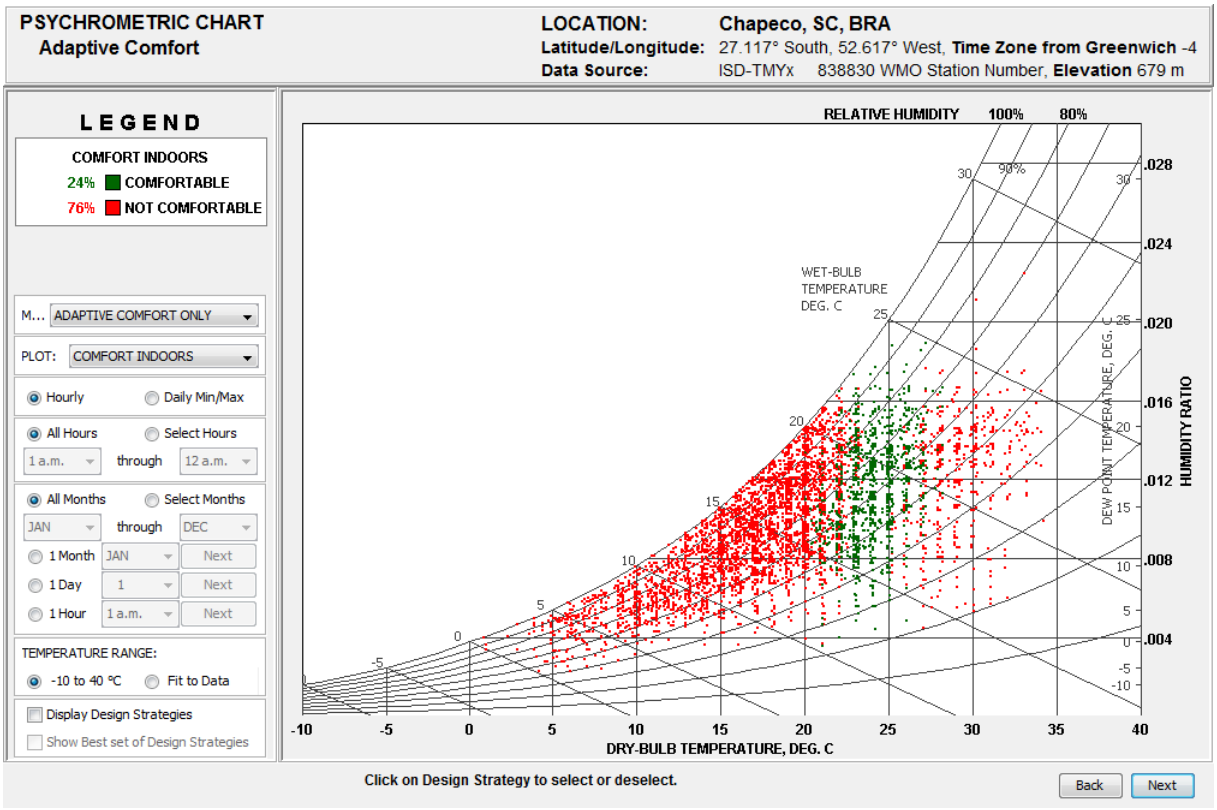
8c Chapecó-SC ZB3 G7



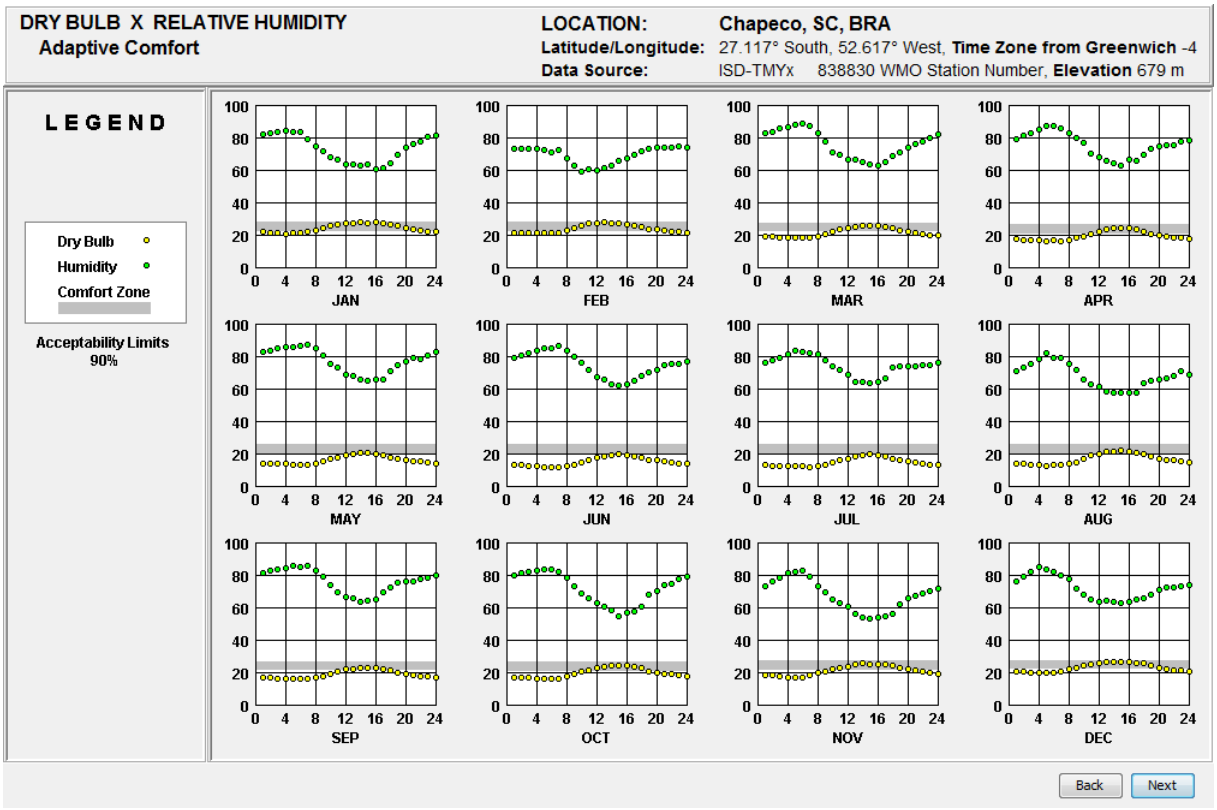
8d Chapecó-SC ZB3 G7



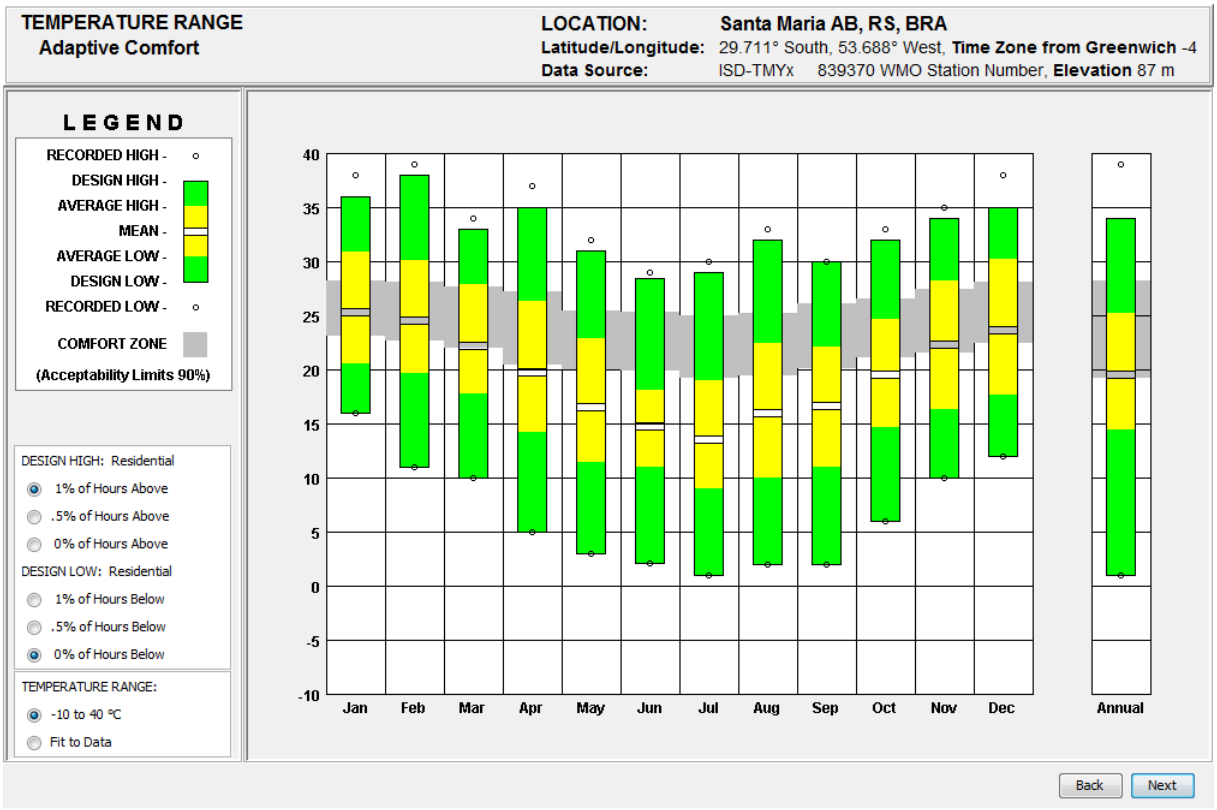
8e Chapecó-SC ZB3 G7



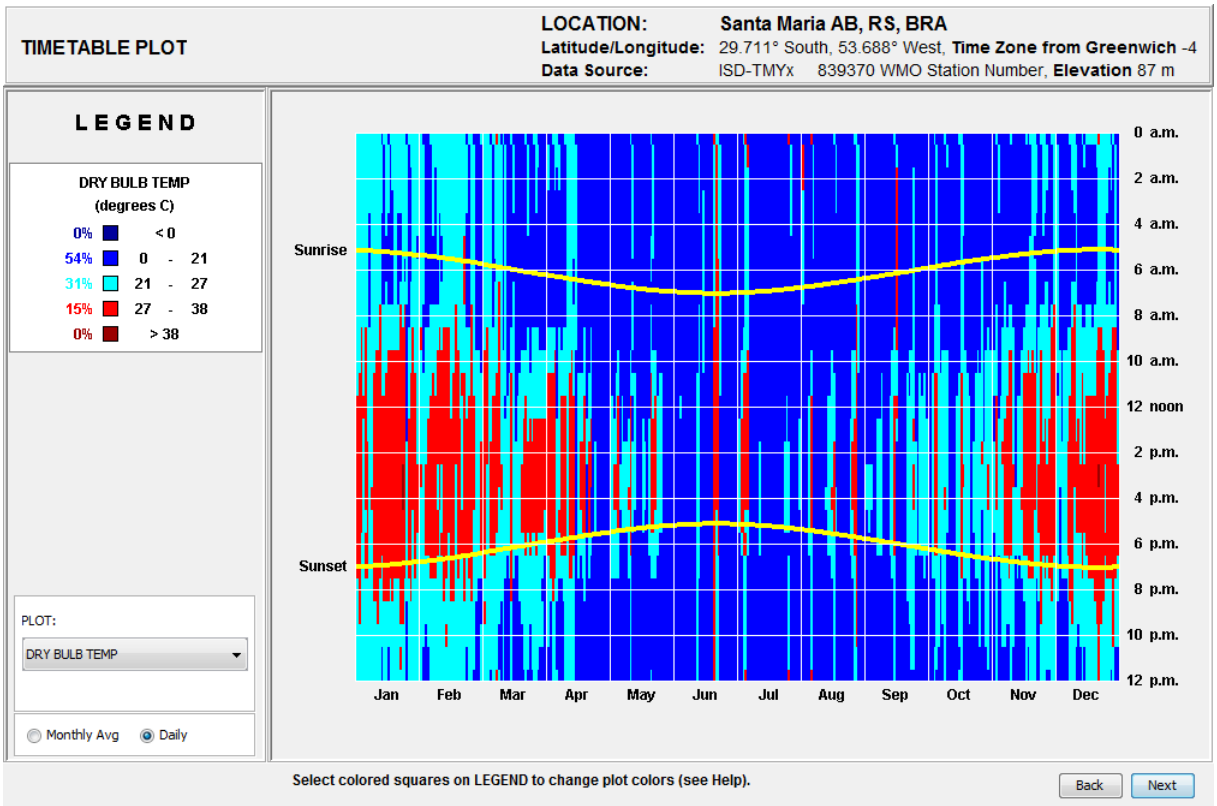
8f Chapecó-SC ZB3 G7



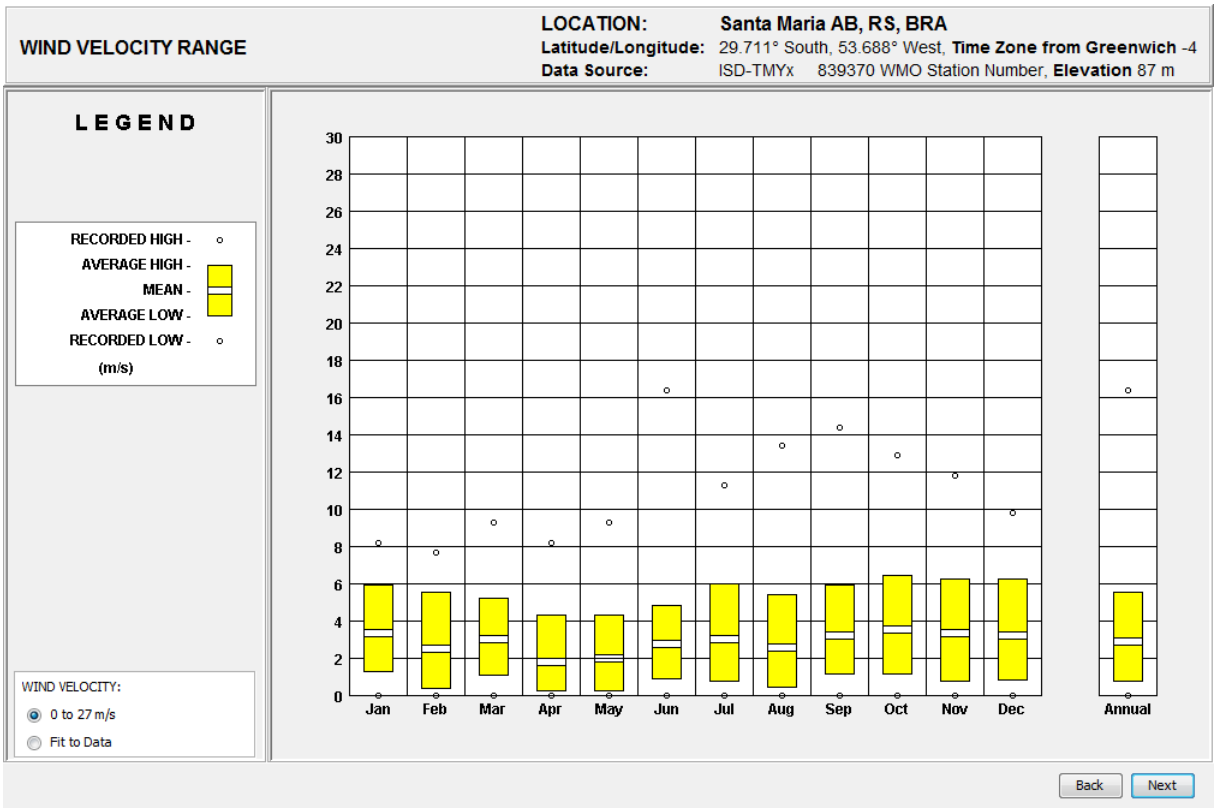
9a Santa Maria-RS ZB2 G8



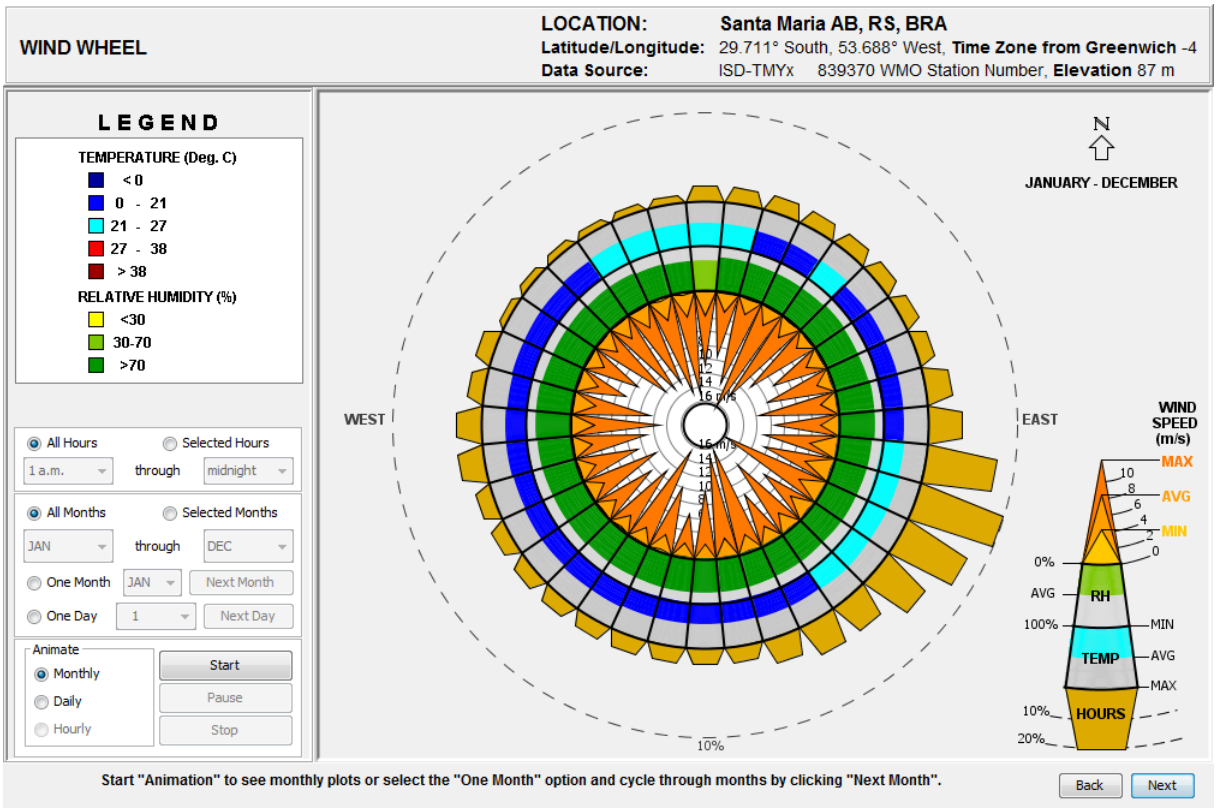
9b Santa Maria-RS ZB2 G8



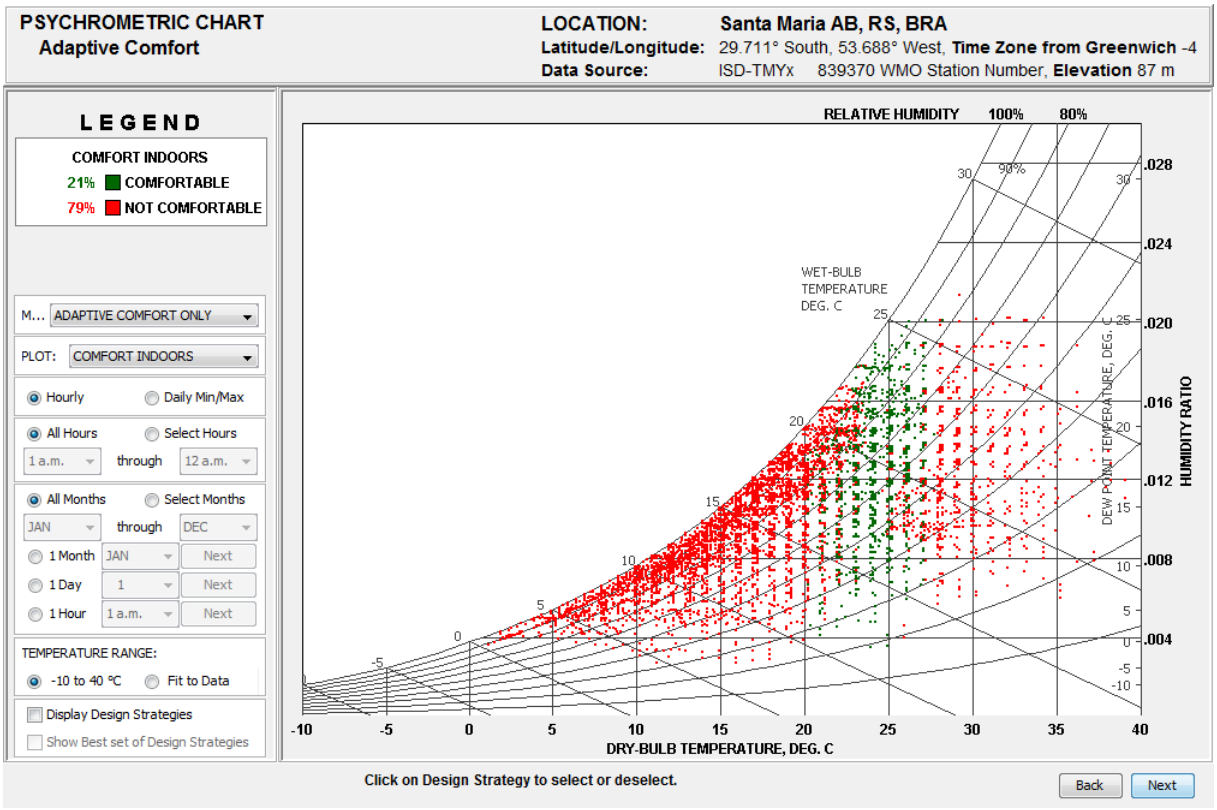
9c Santa Maria-RS ZB2 G8



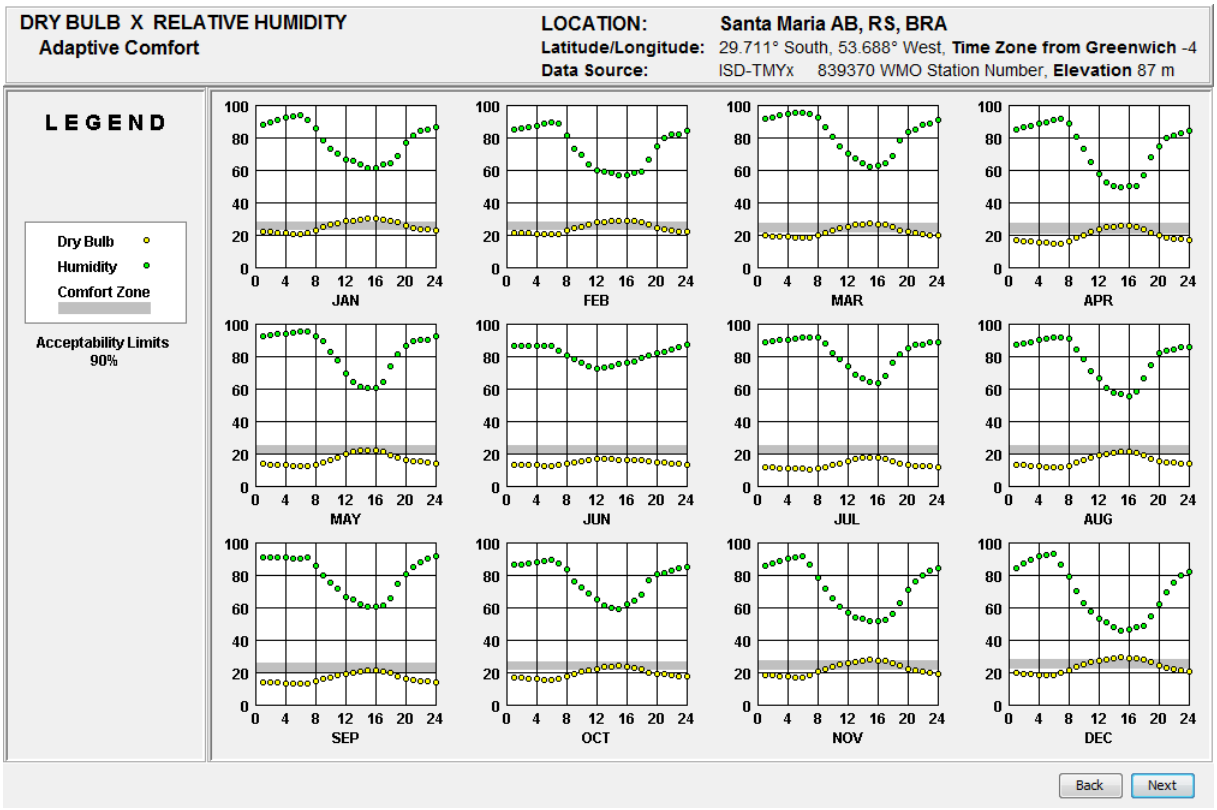
9d Santa Maria-RS ZB2 G8



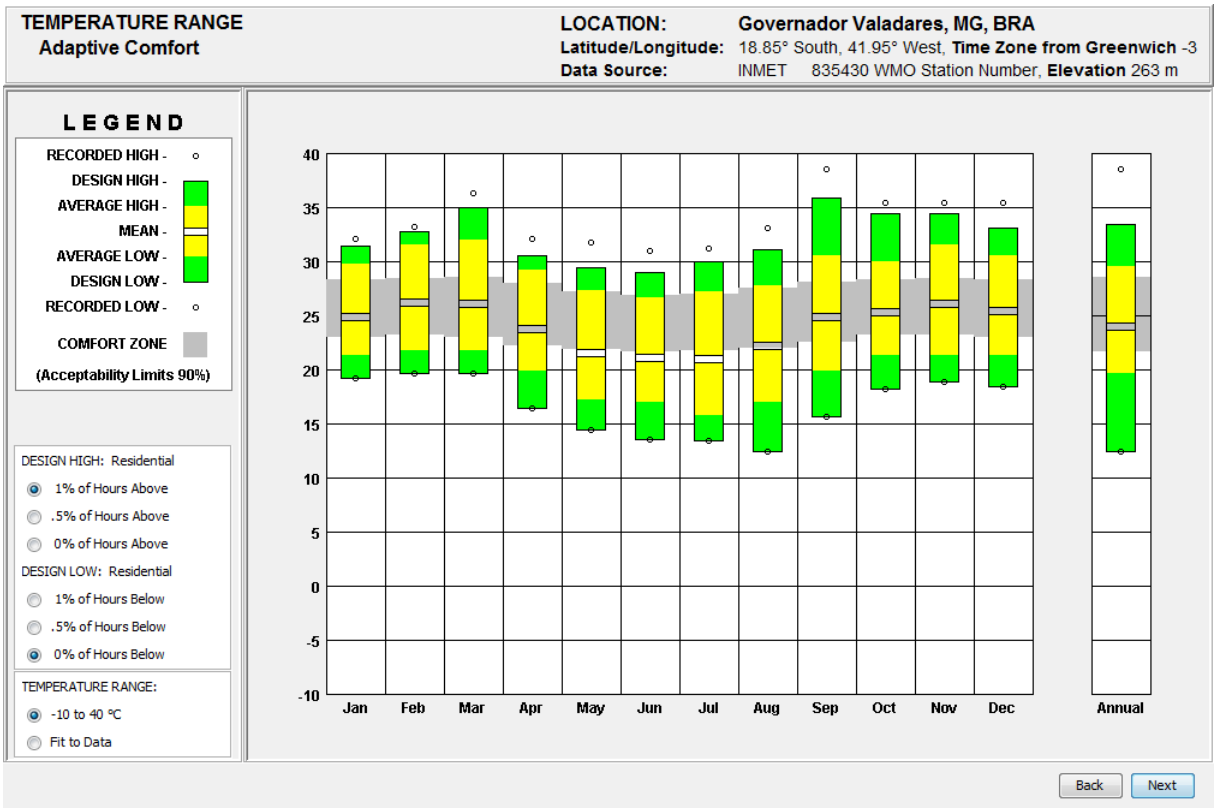
9e Santa Maria-RS ZB2 G8



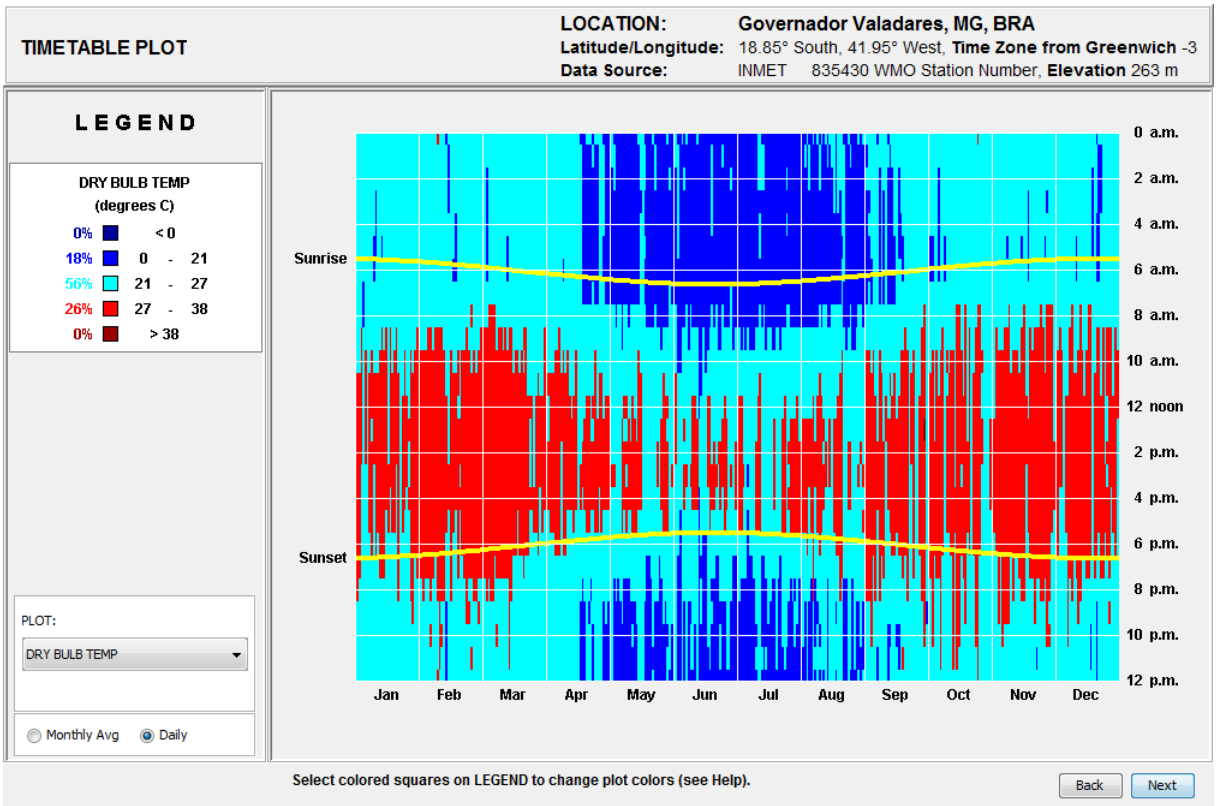
9f Santa Maria-RS ZB2 G8



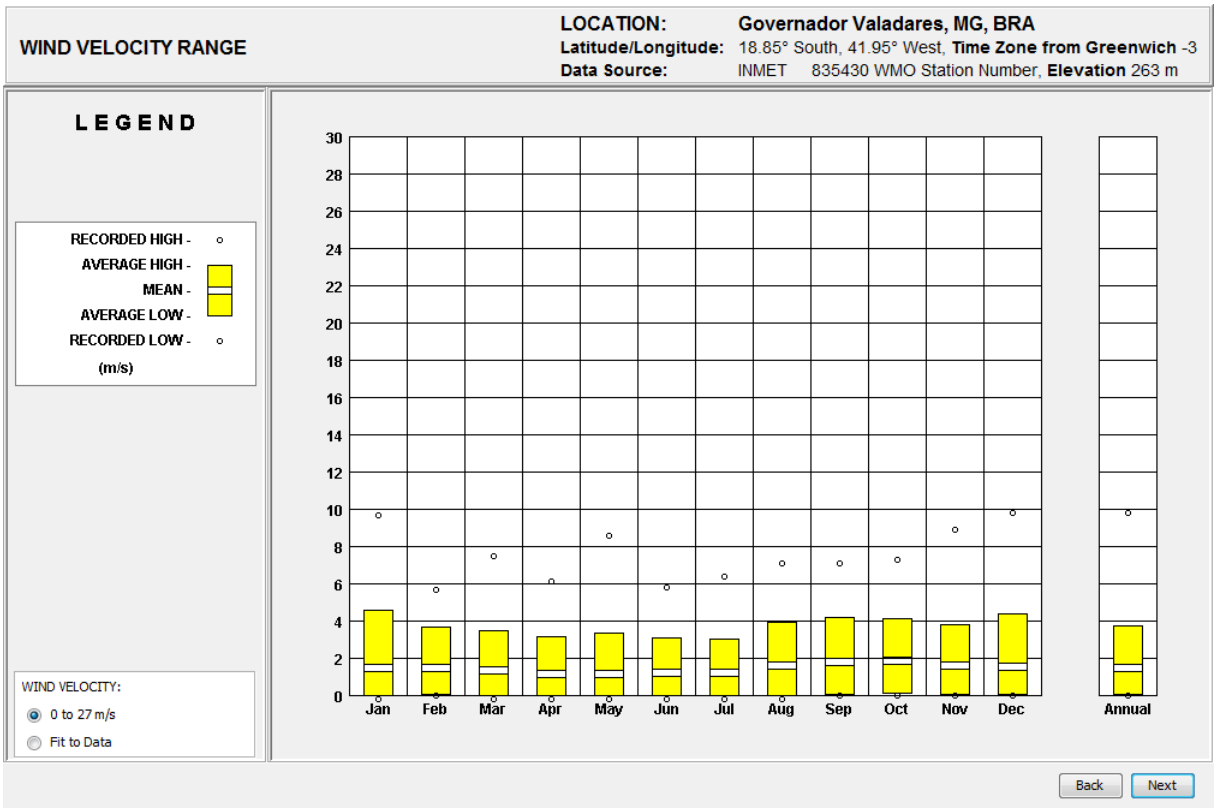
10a Governador Valadares-MG ZB5 G9



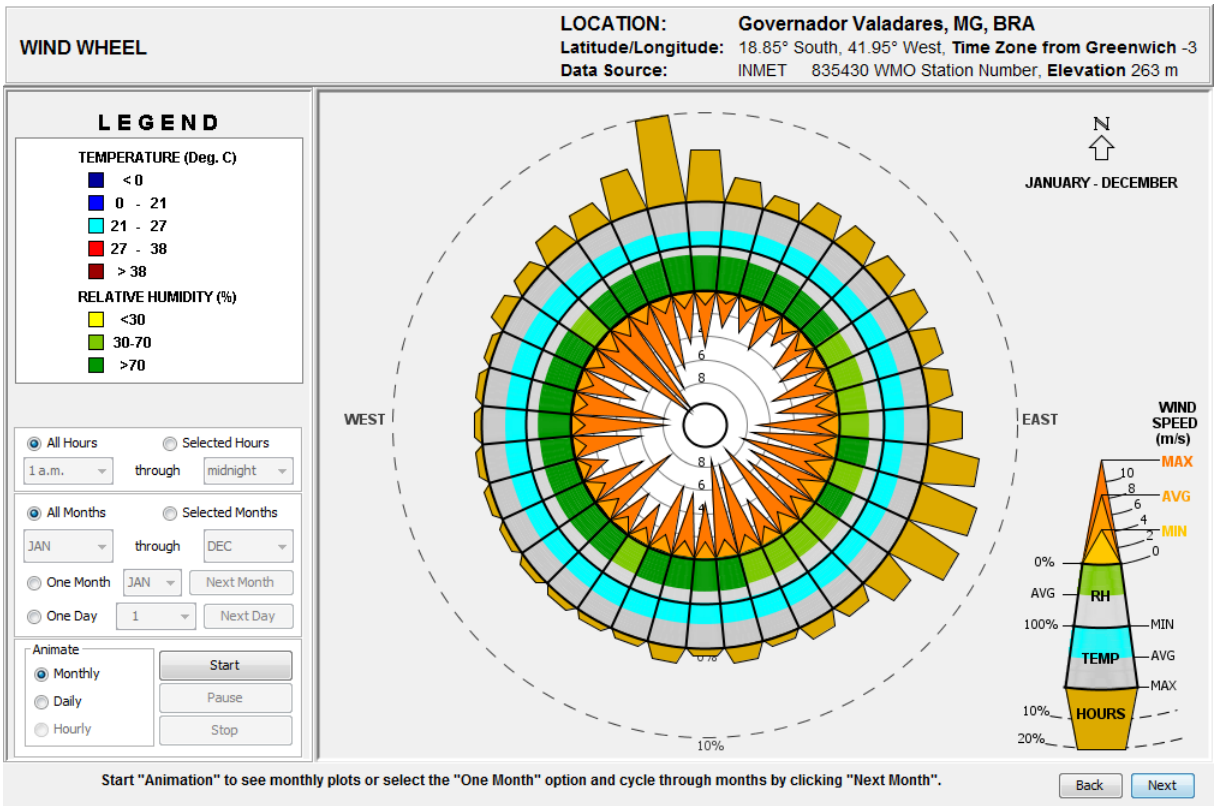
10b Governador Valadares-MG ZB5 G9



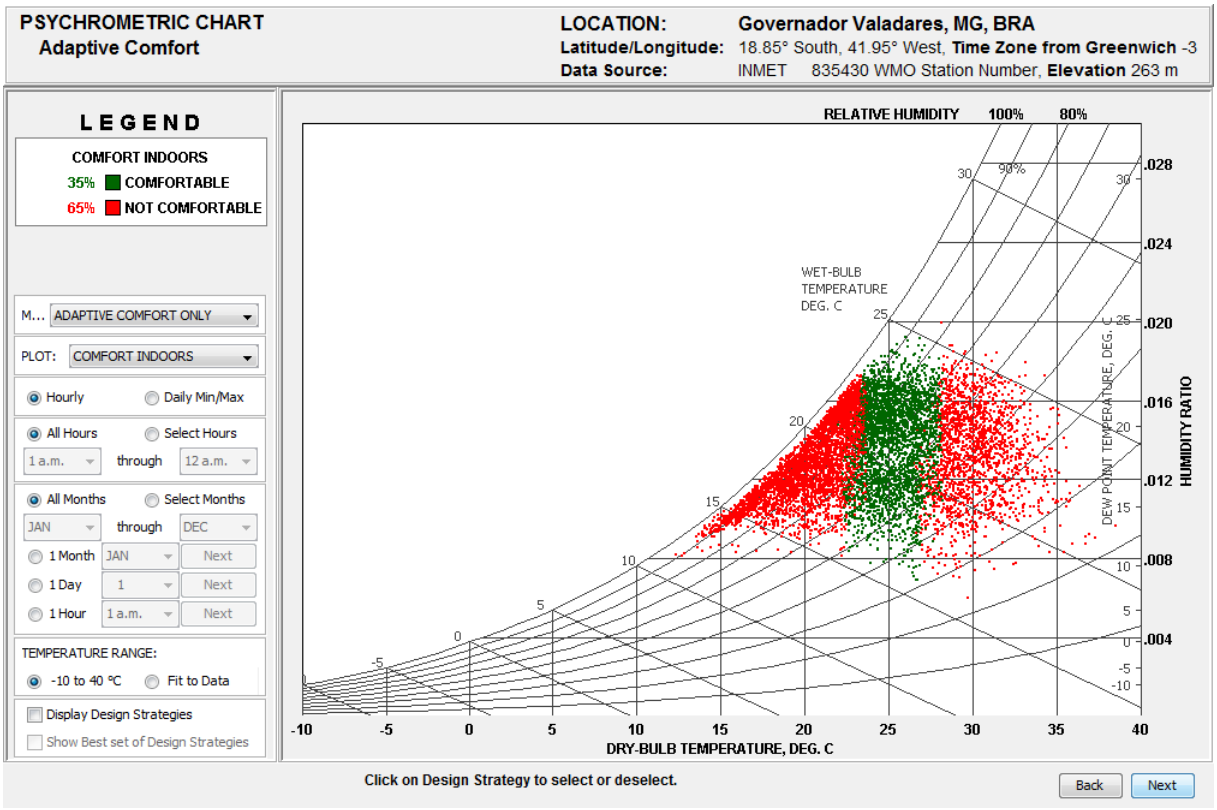
10c Governador Valadares-MG ZB5 G9



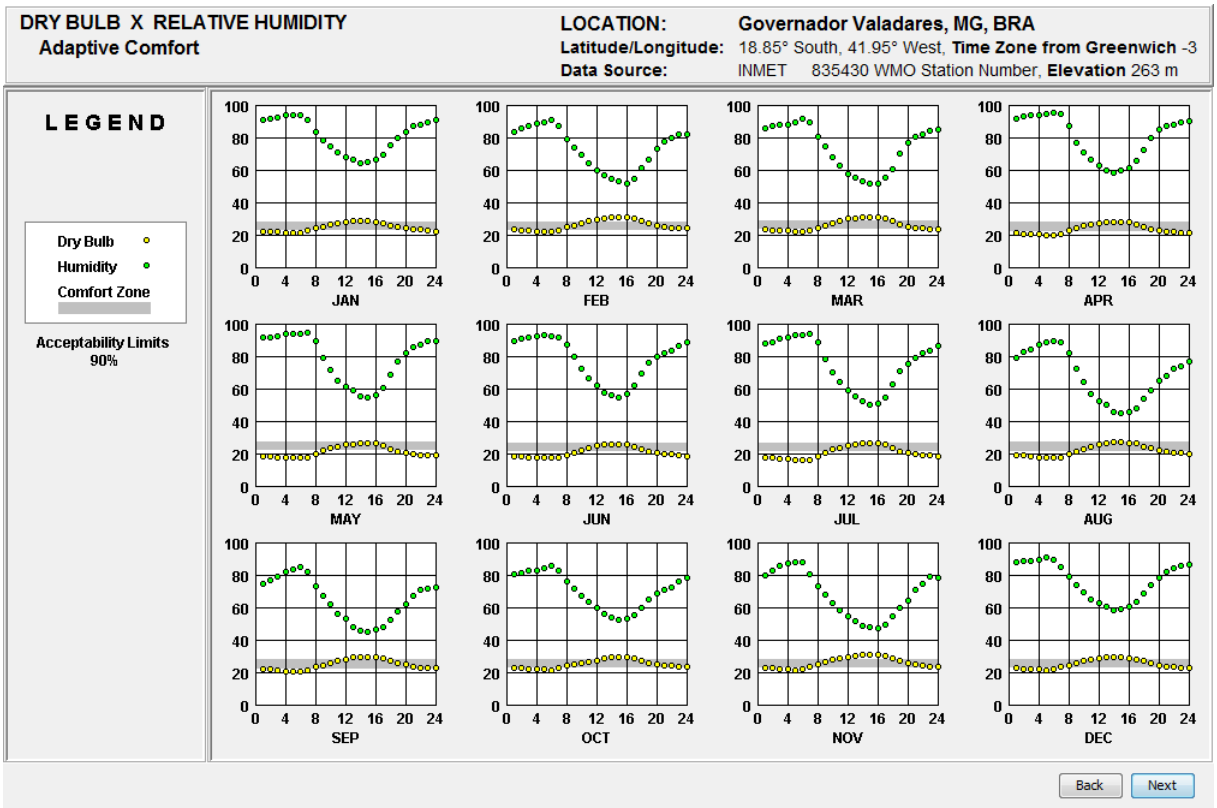
10d Governador Valadares-MG ZB5 G9



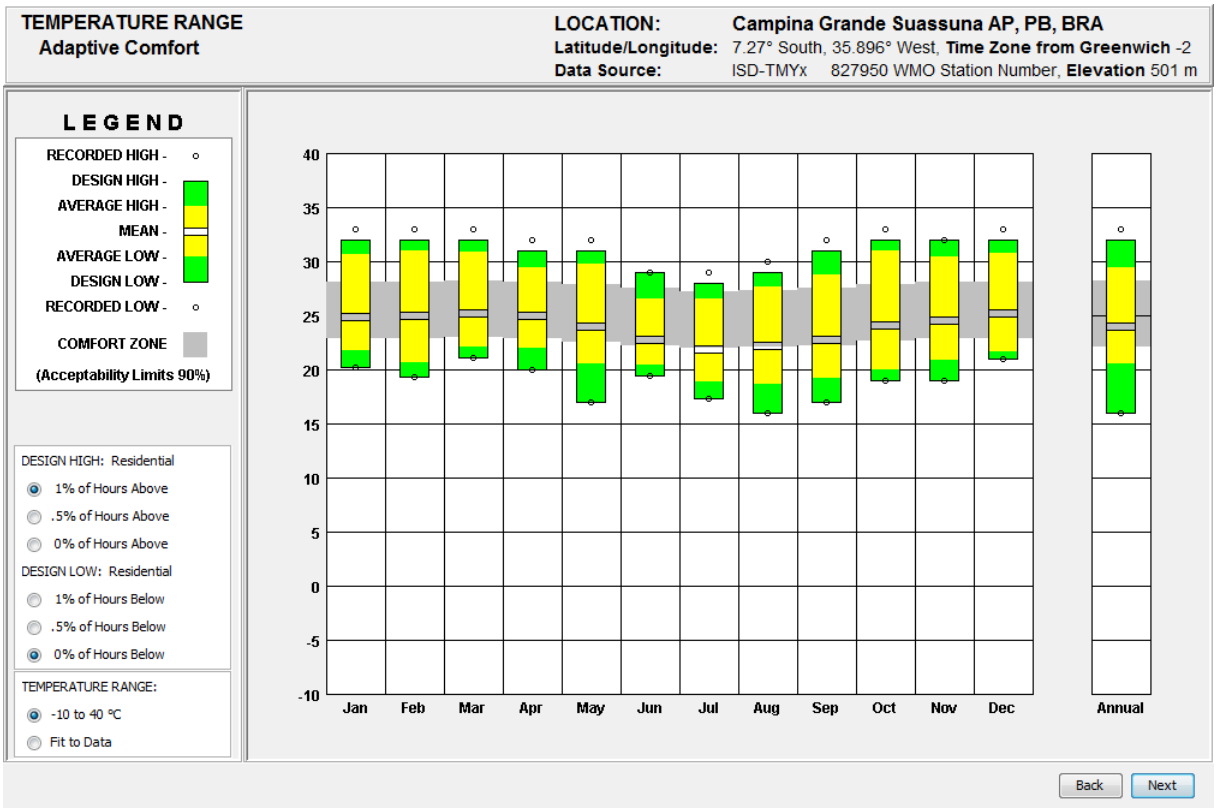
10e Governador Valadares-MG ZB5 G9



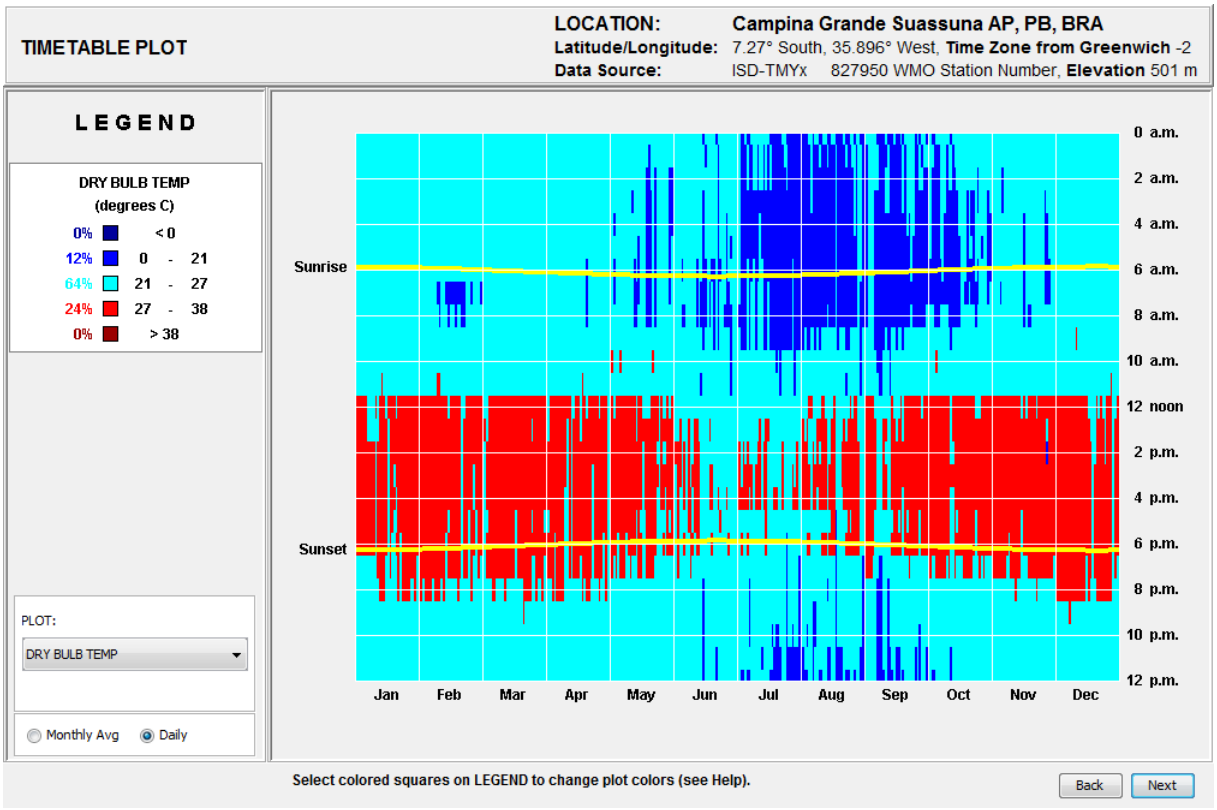
10f Governador Valadares-MG ZB5 G9



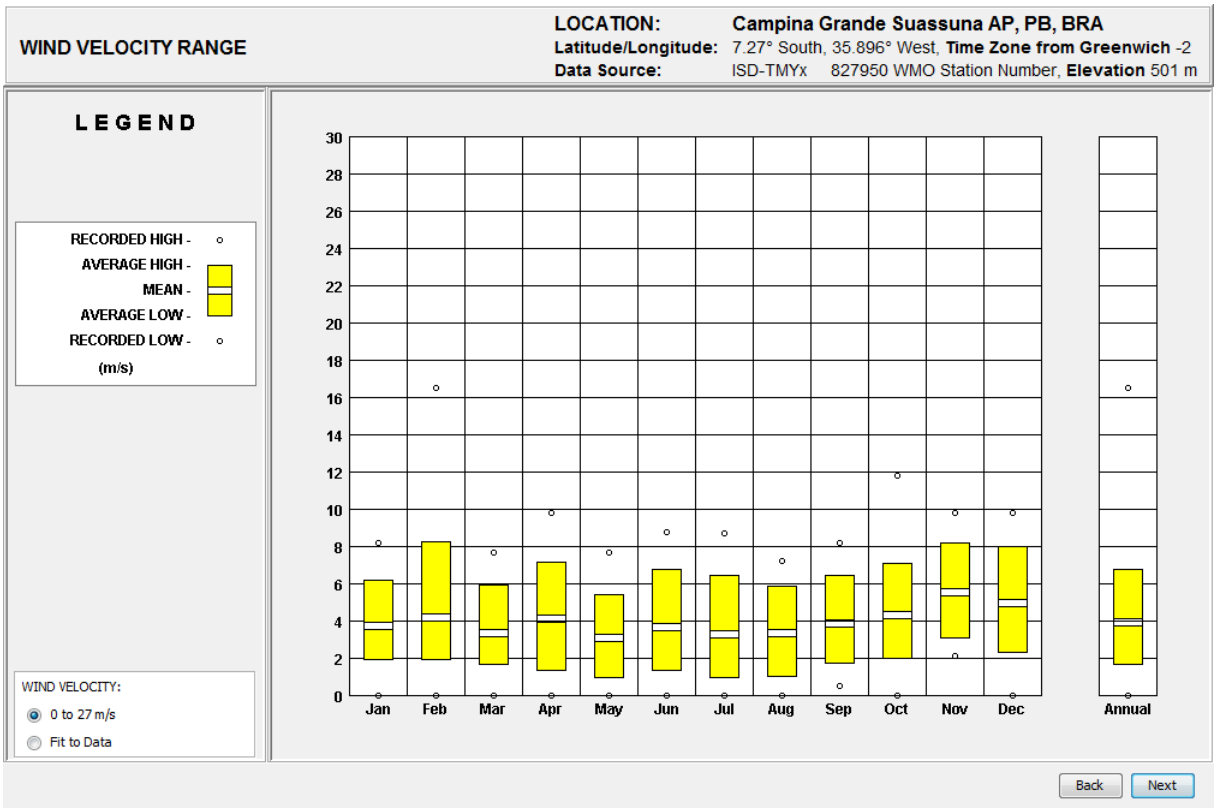
11a Campina Grande-PB ZB8 G10



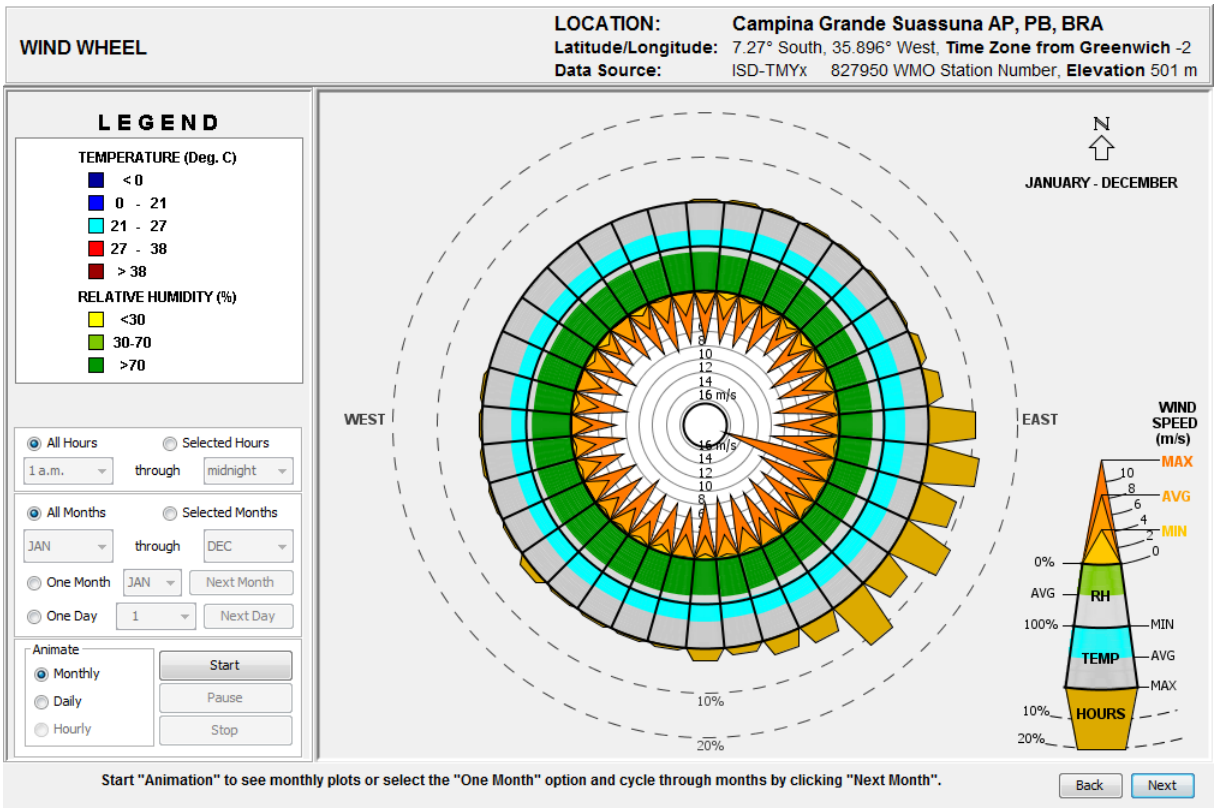
11b Campina Grande-PB ZB8 G10



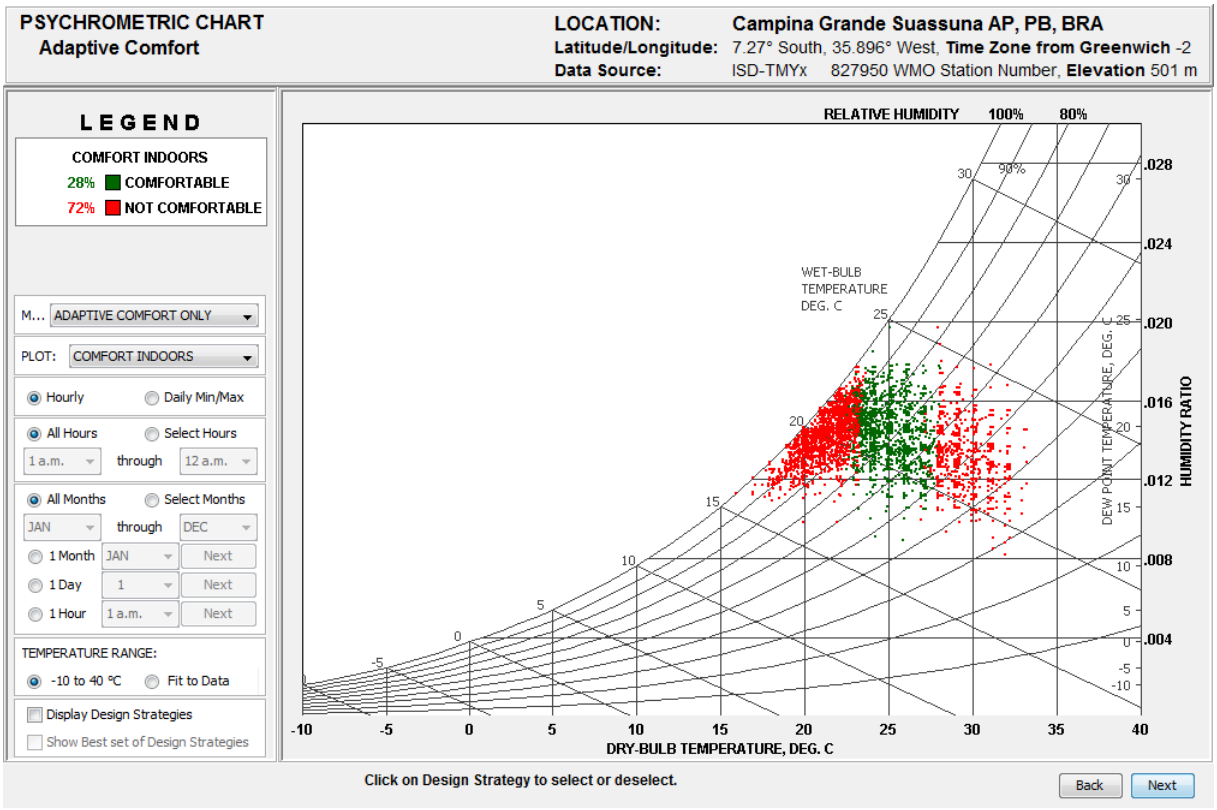
11c Campina Grande-PB ZB8 G10



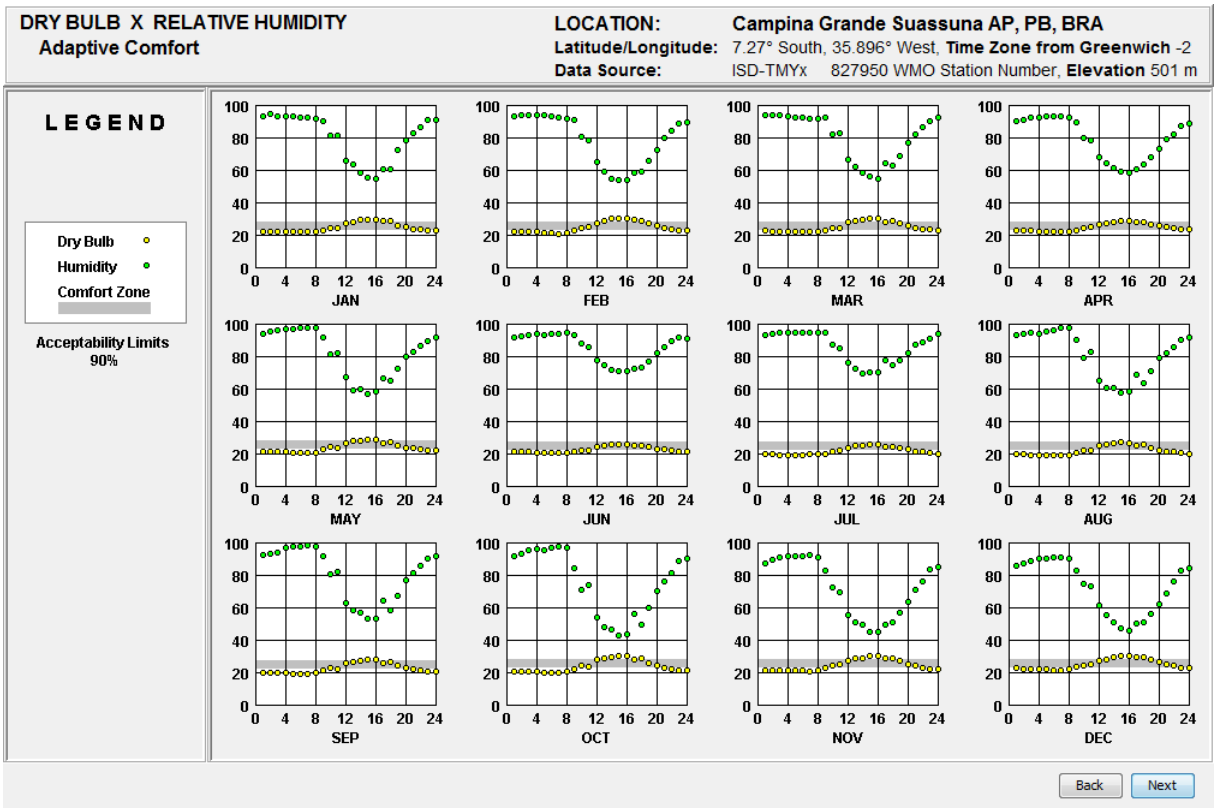
11d Campina Grande-PB ZB8 G10



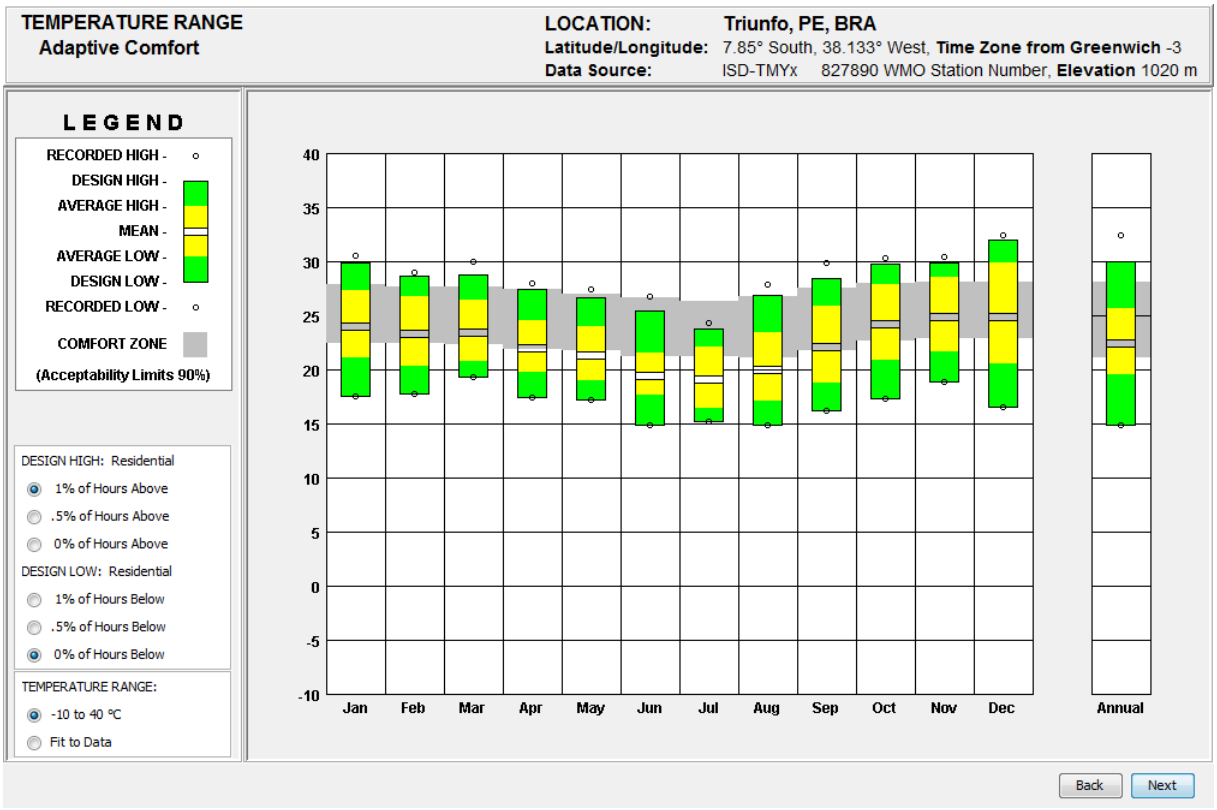
11e Campina Grande-PB ZB8 G10



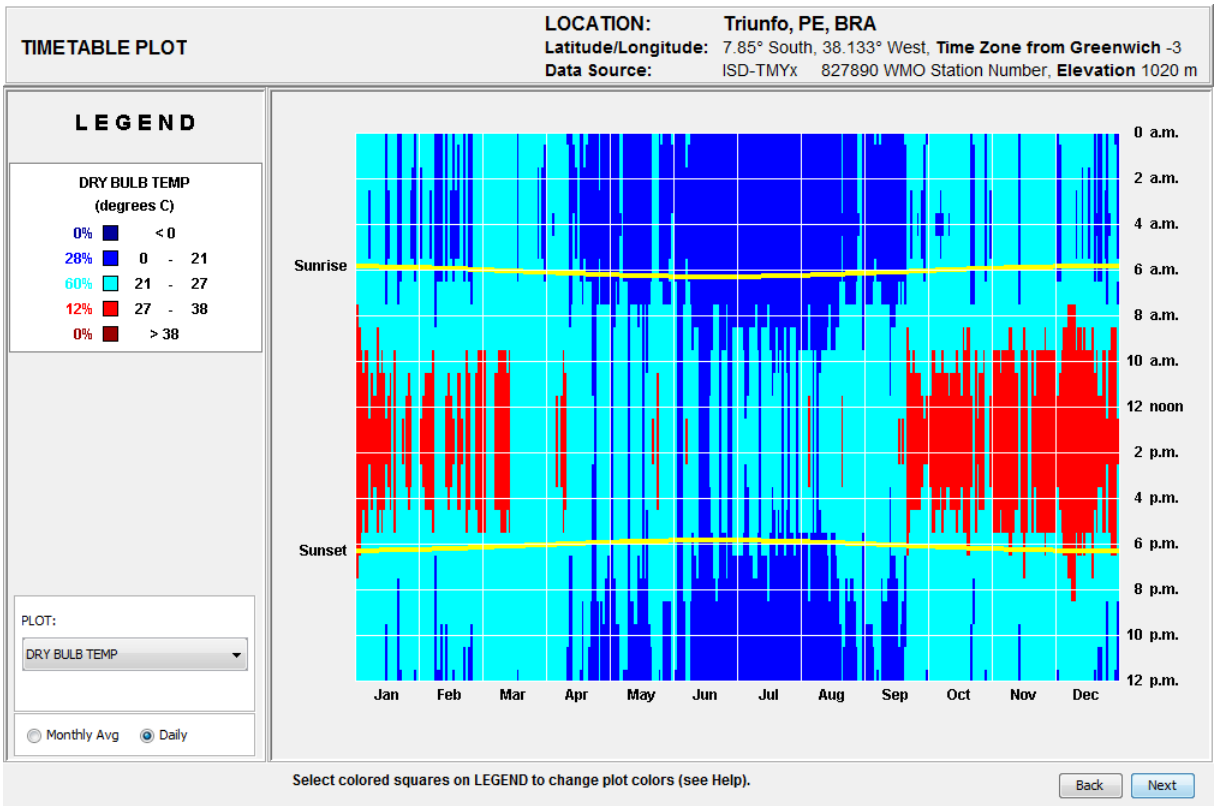
11f Campina Grande-PB ZB8 G10



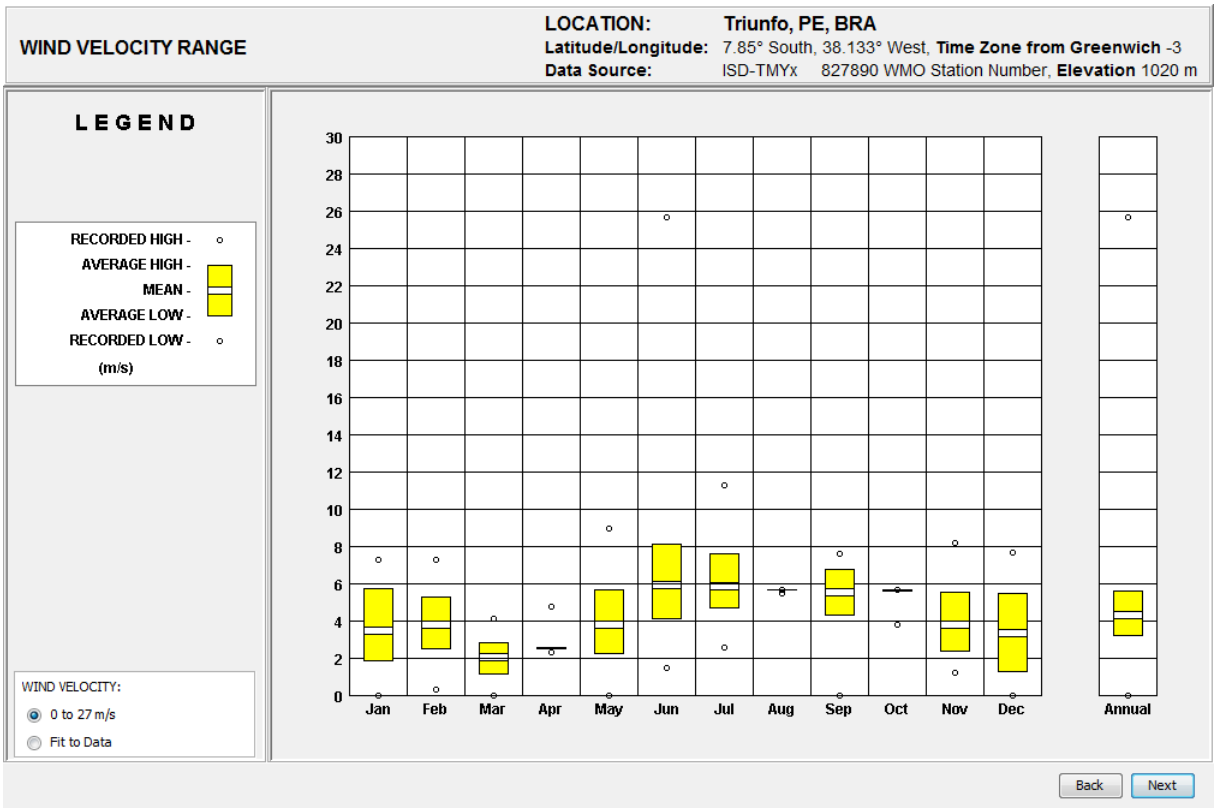
12a Triunfo-PE ZB6 G11



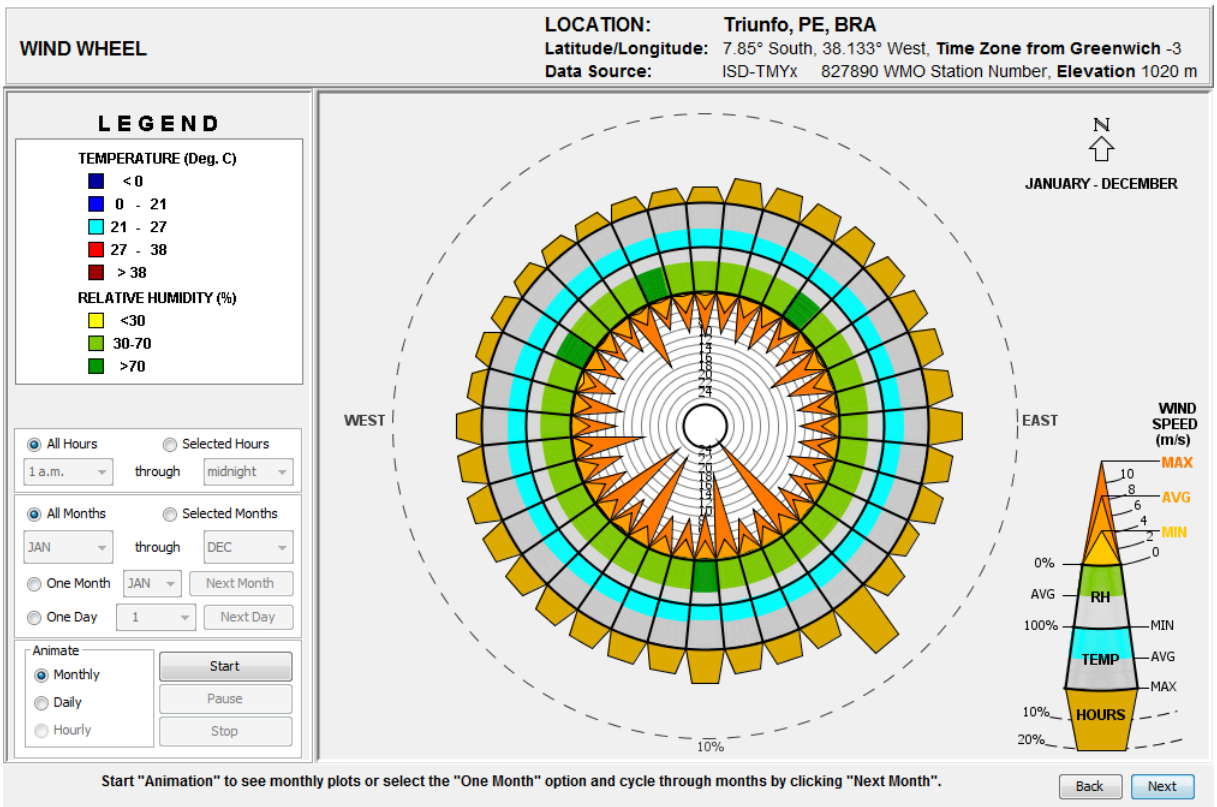
12b Triunfo-PE ZB6 G11



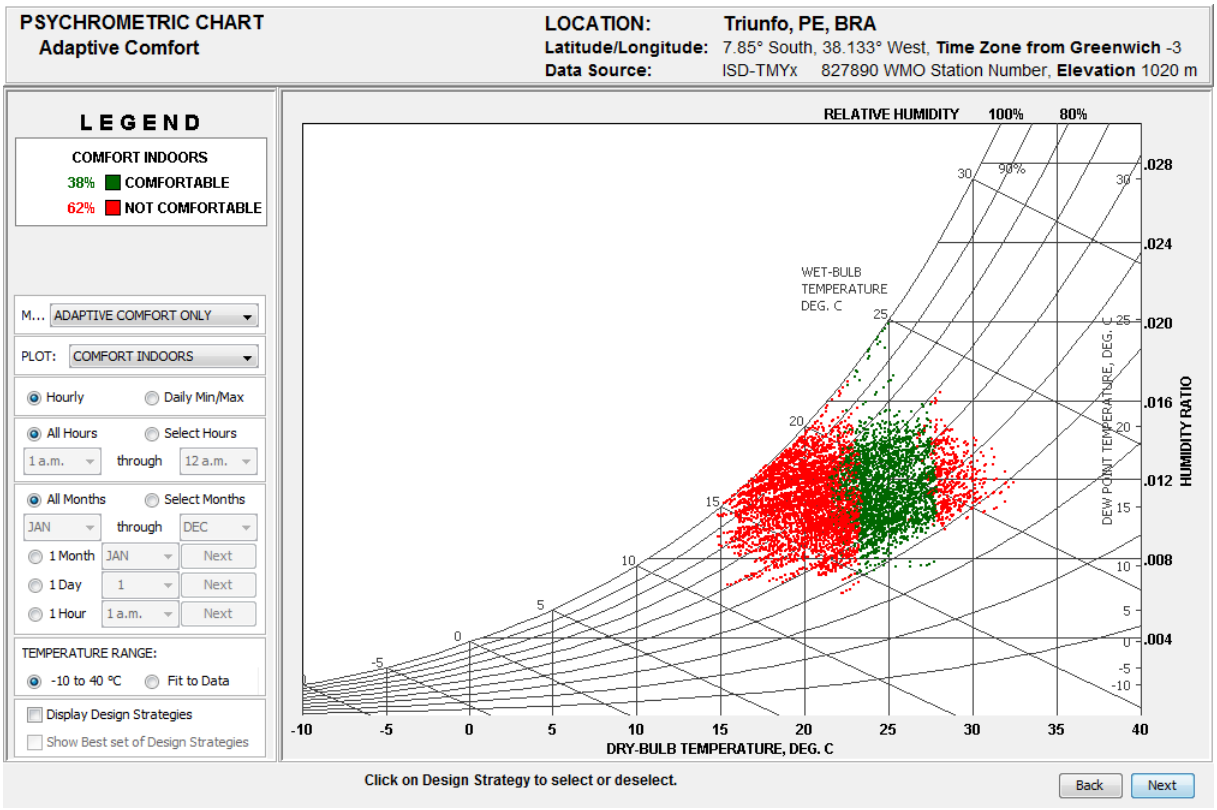
12c Triunfo-PE ZB6 G11



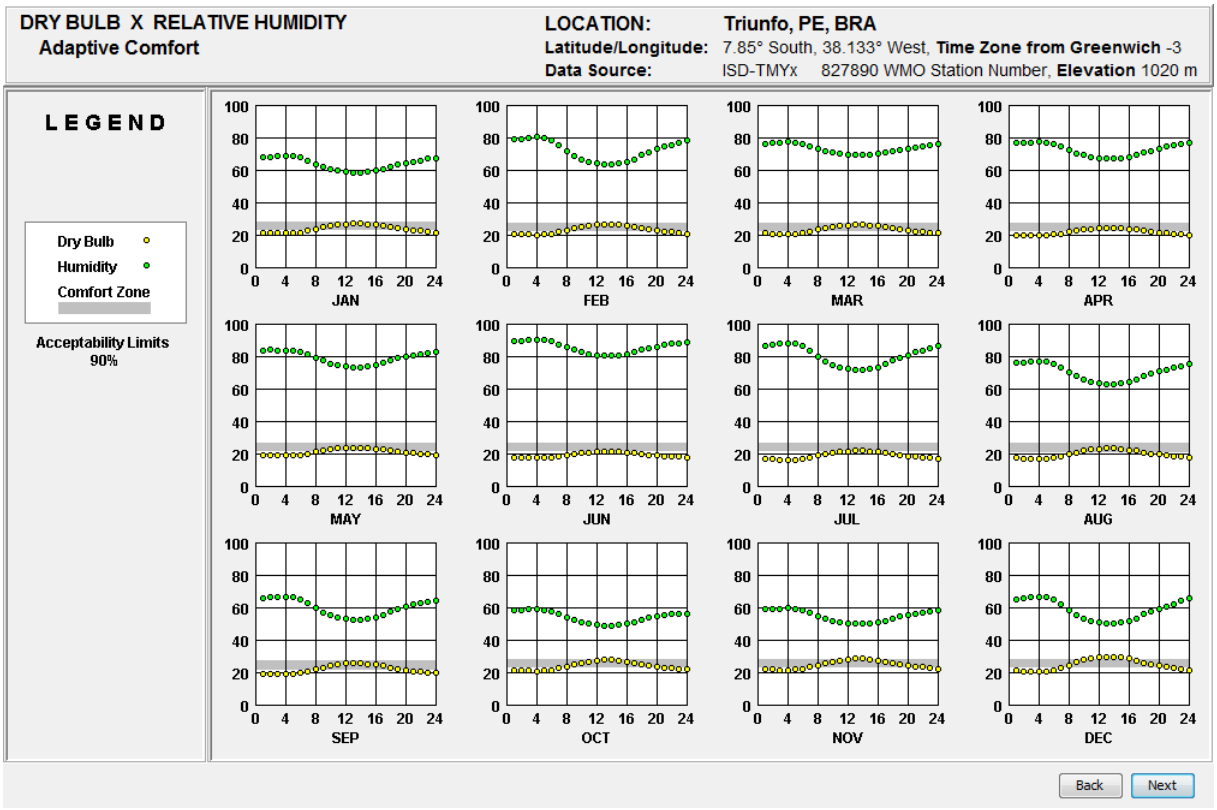
12d Triunfo-PE ZB6 G11



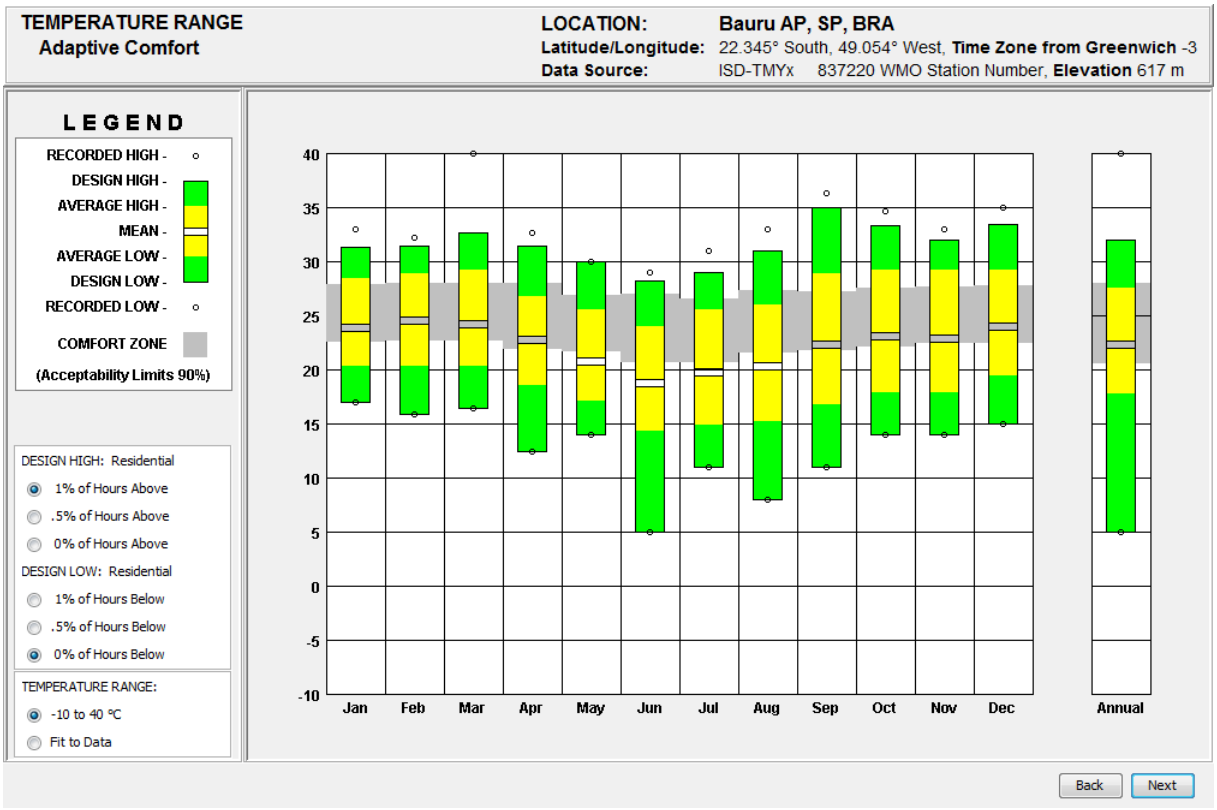
12e Triunfo-PE ZB6 G11



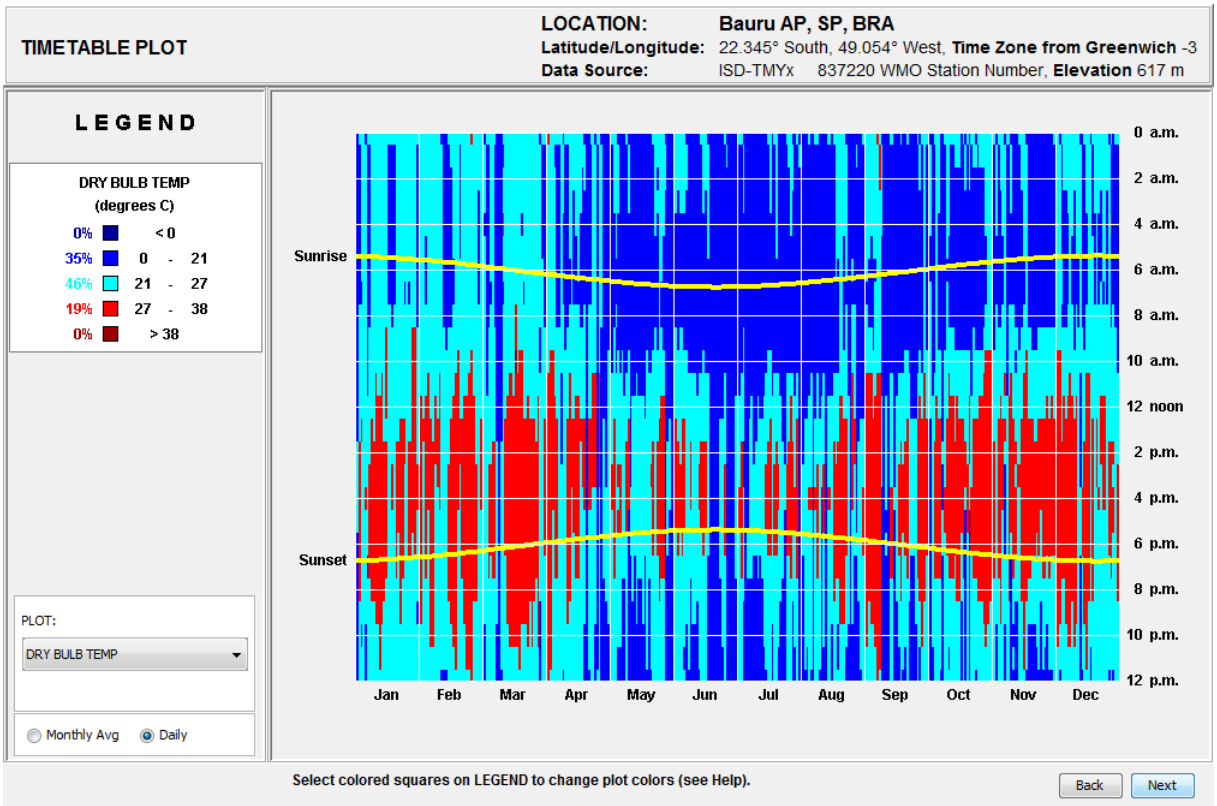
12f Triunfo-PE ZB6 G11



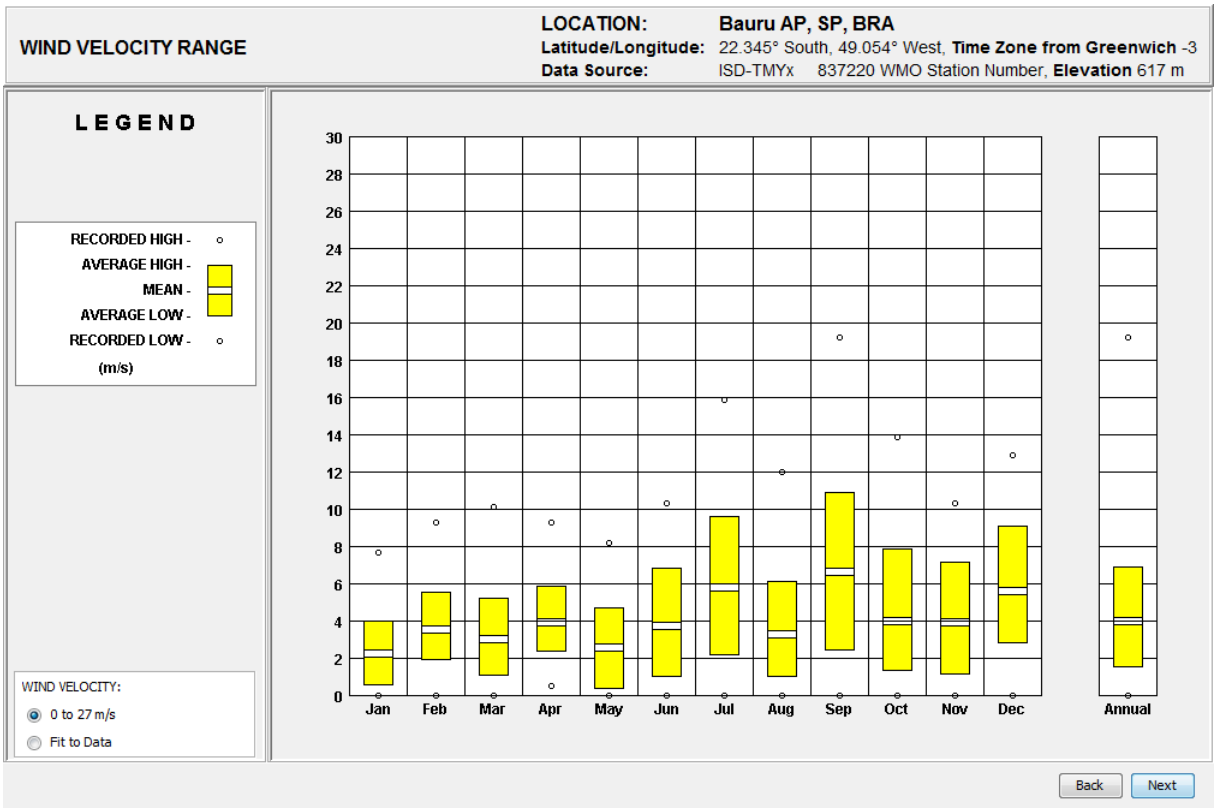
13a Bauru-SP ZB4 G12



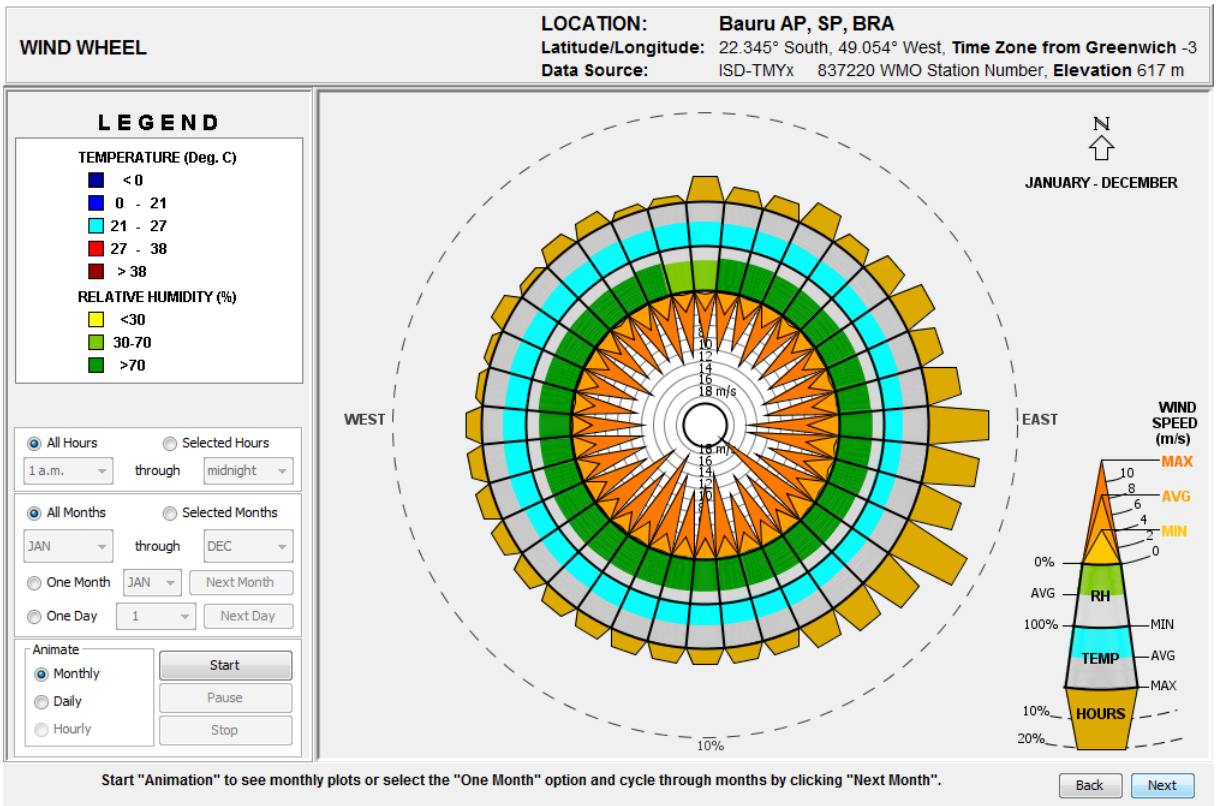
13b Bauru-SP ZB4 G12



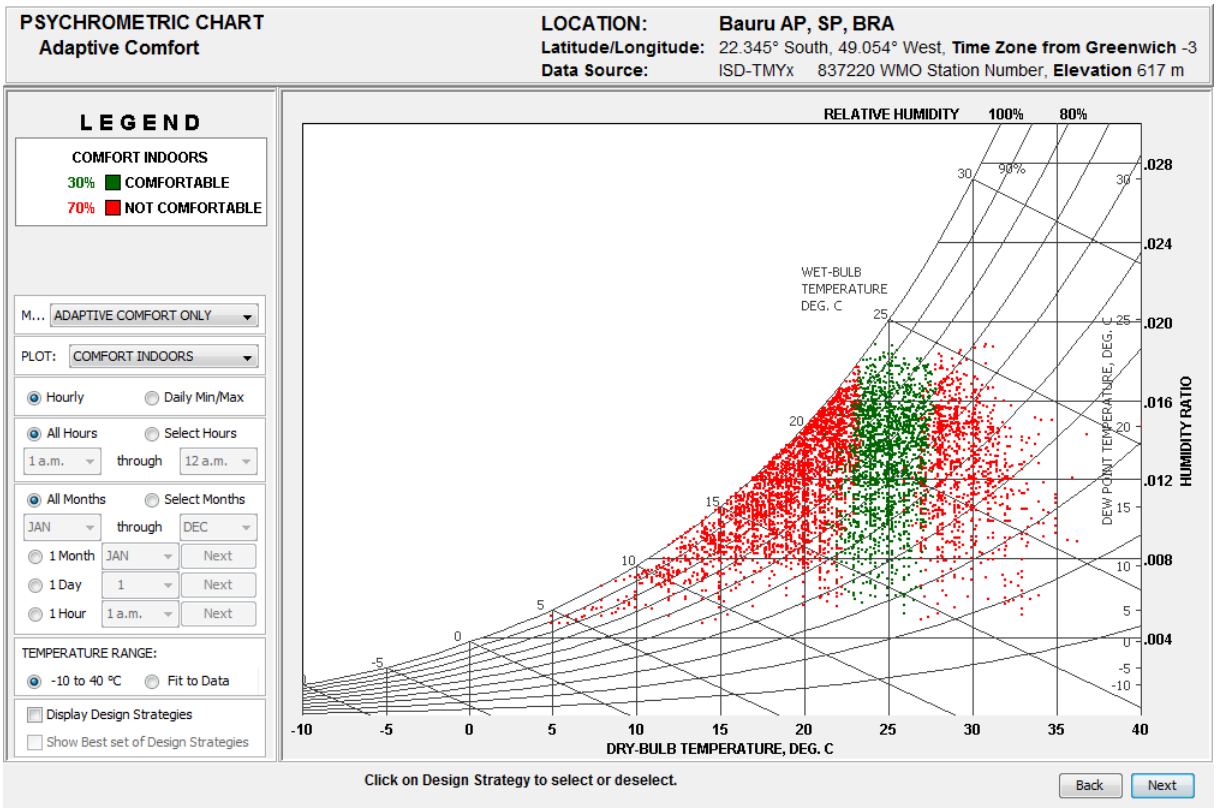
13c Bauru-SP ZB4 G12



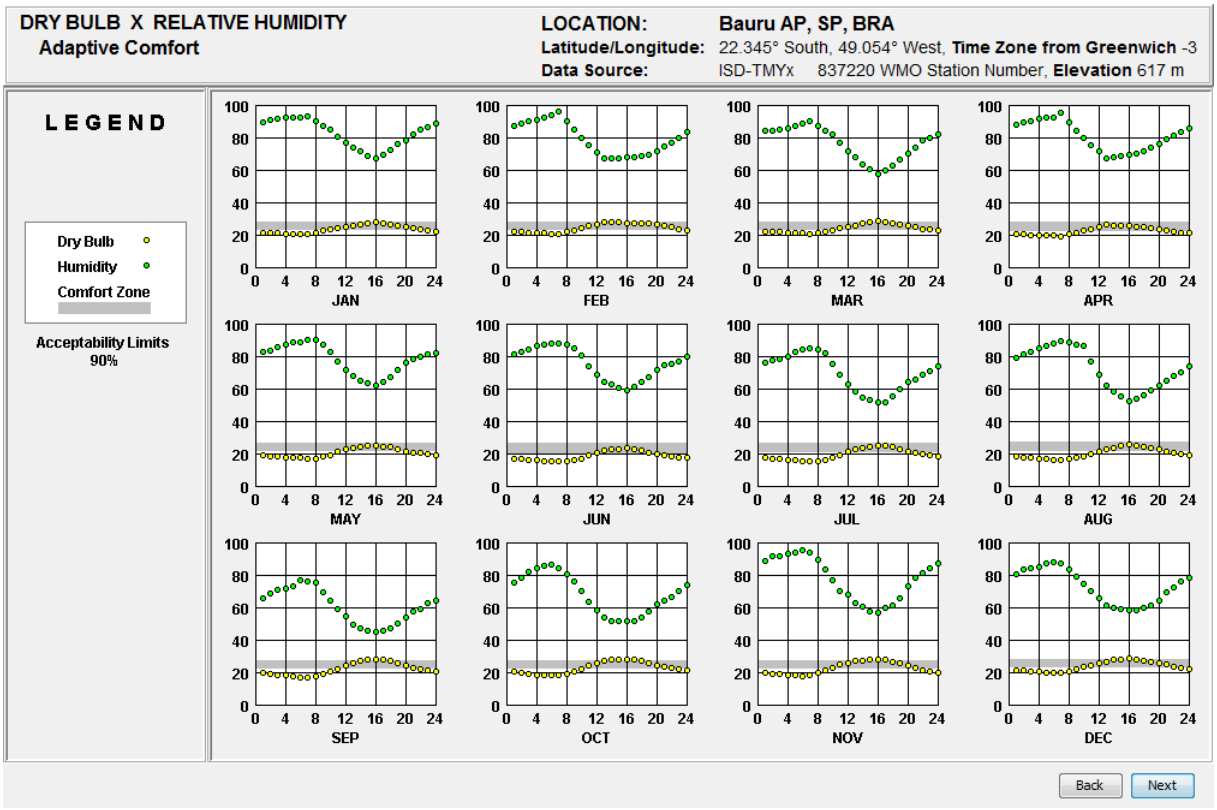
13d Bauru-SP ZB4 G12



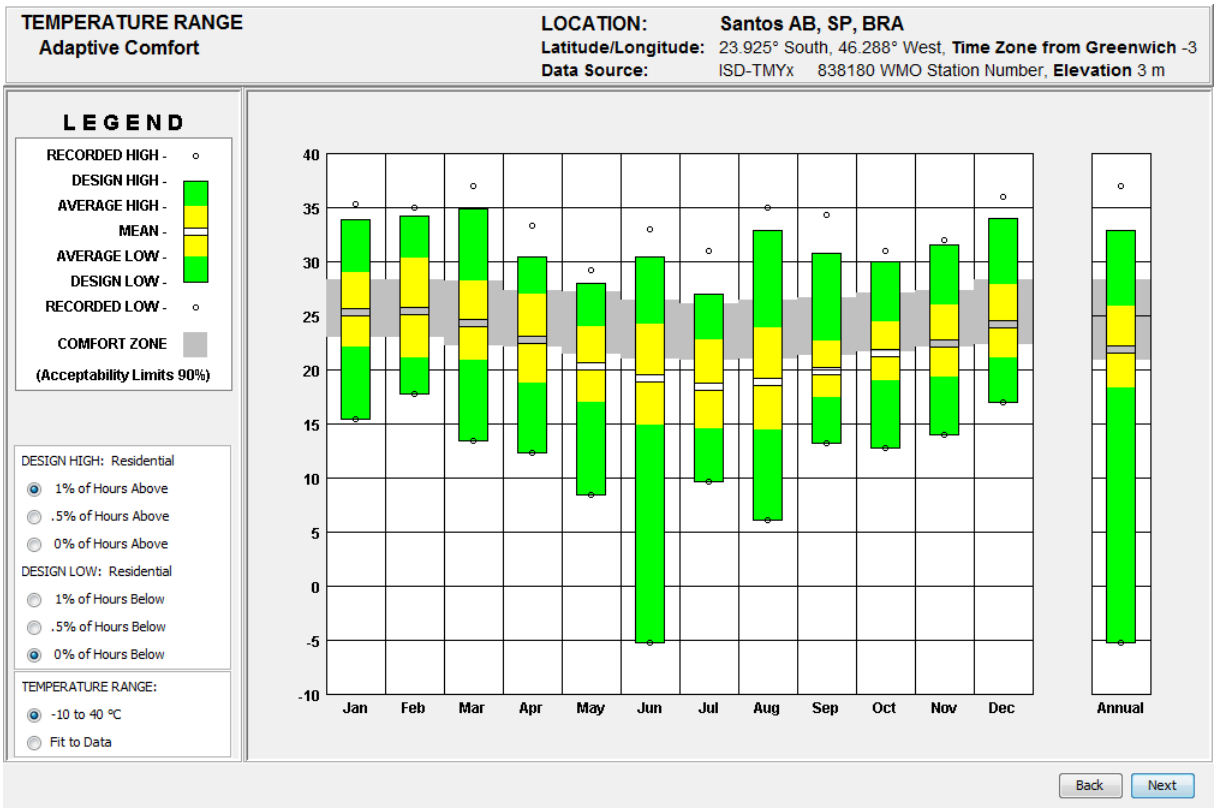
13e Bauru-SP ZB4 G12



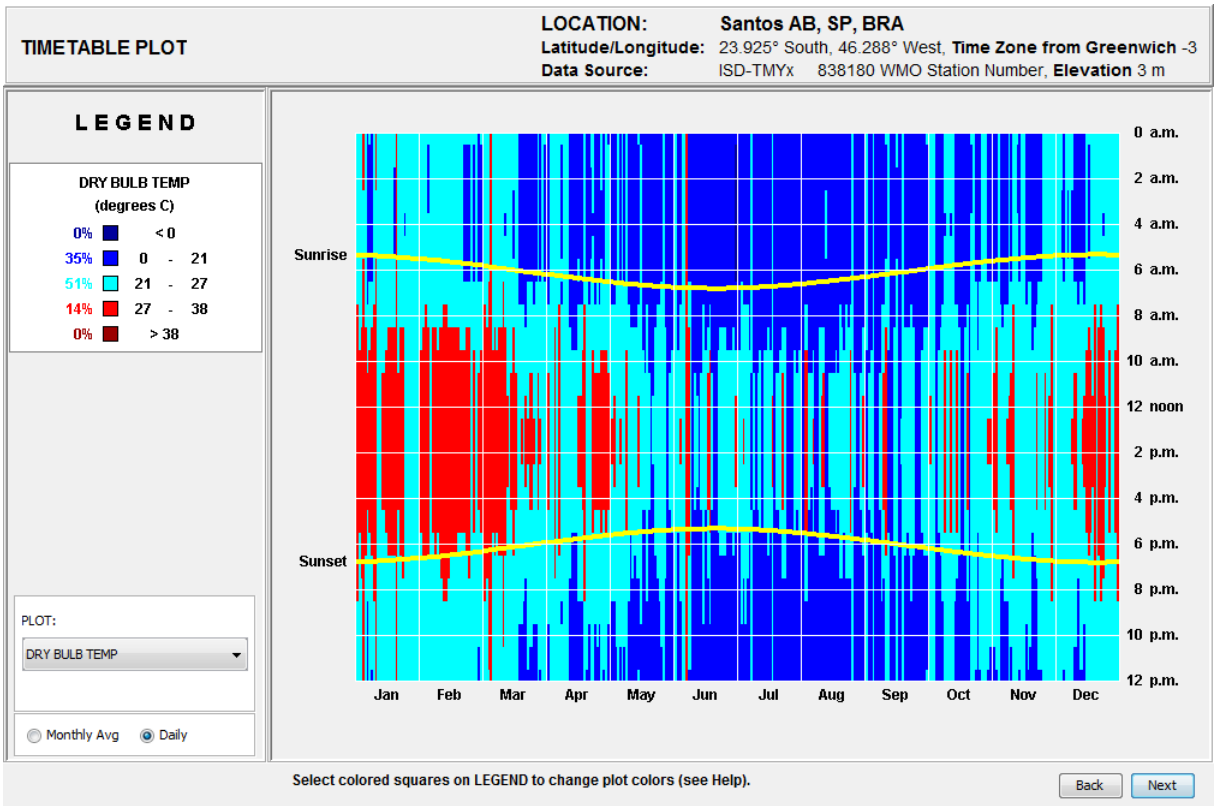
13f Bauru-SP ZB4 G12



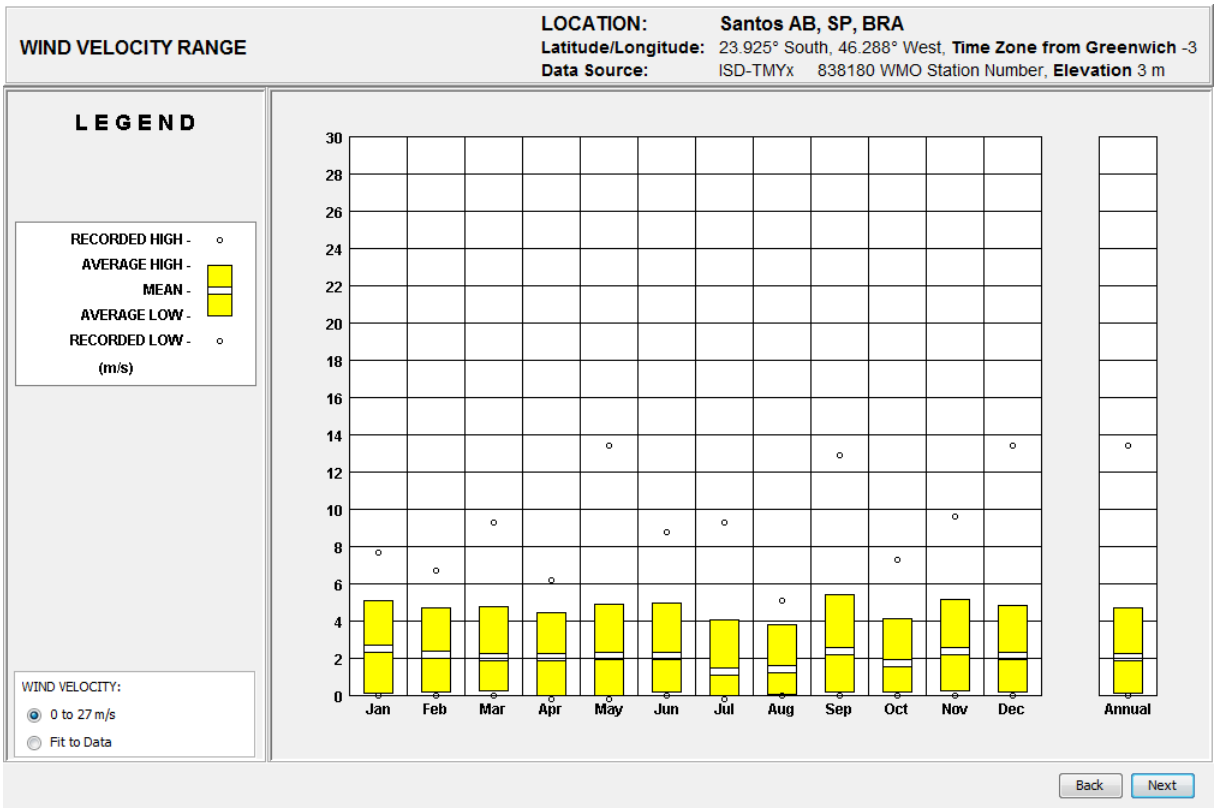
14a Santos-SP ZB5 G13



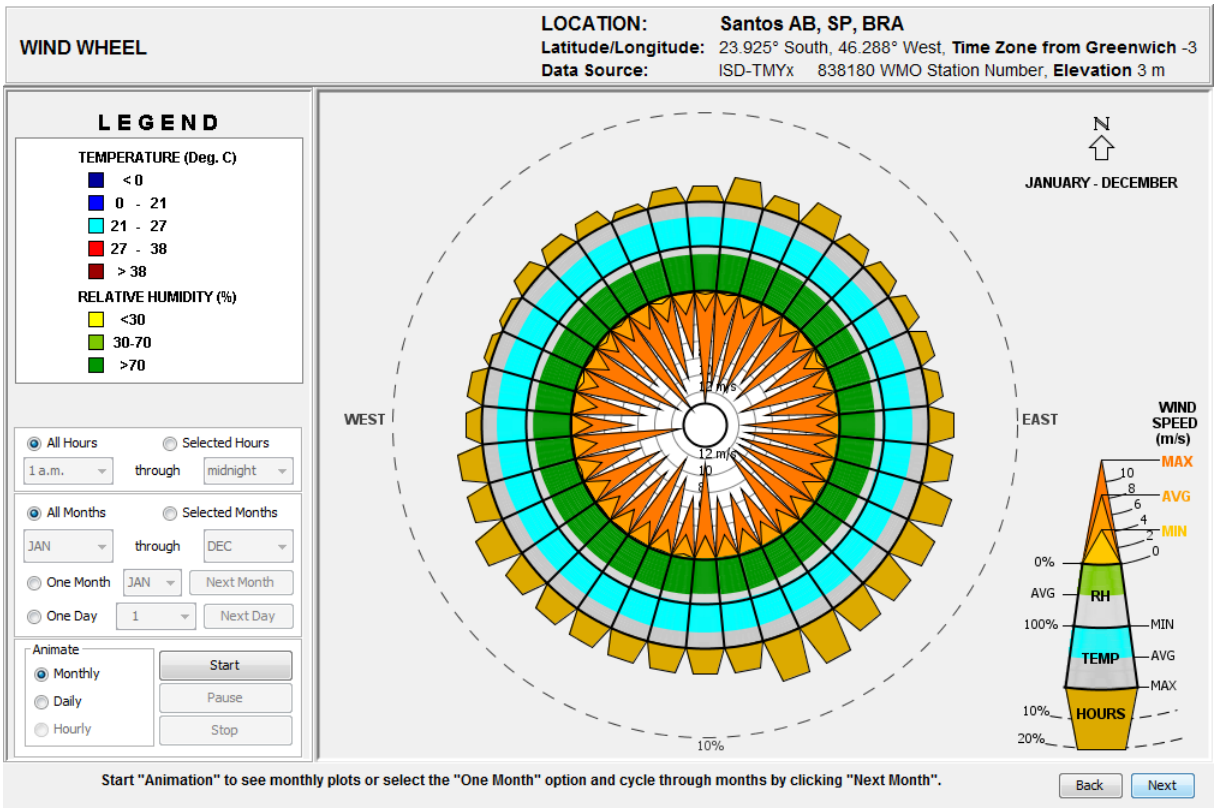
14b Santos-SP ZB5 G13



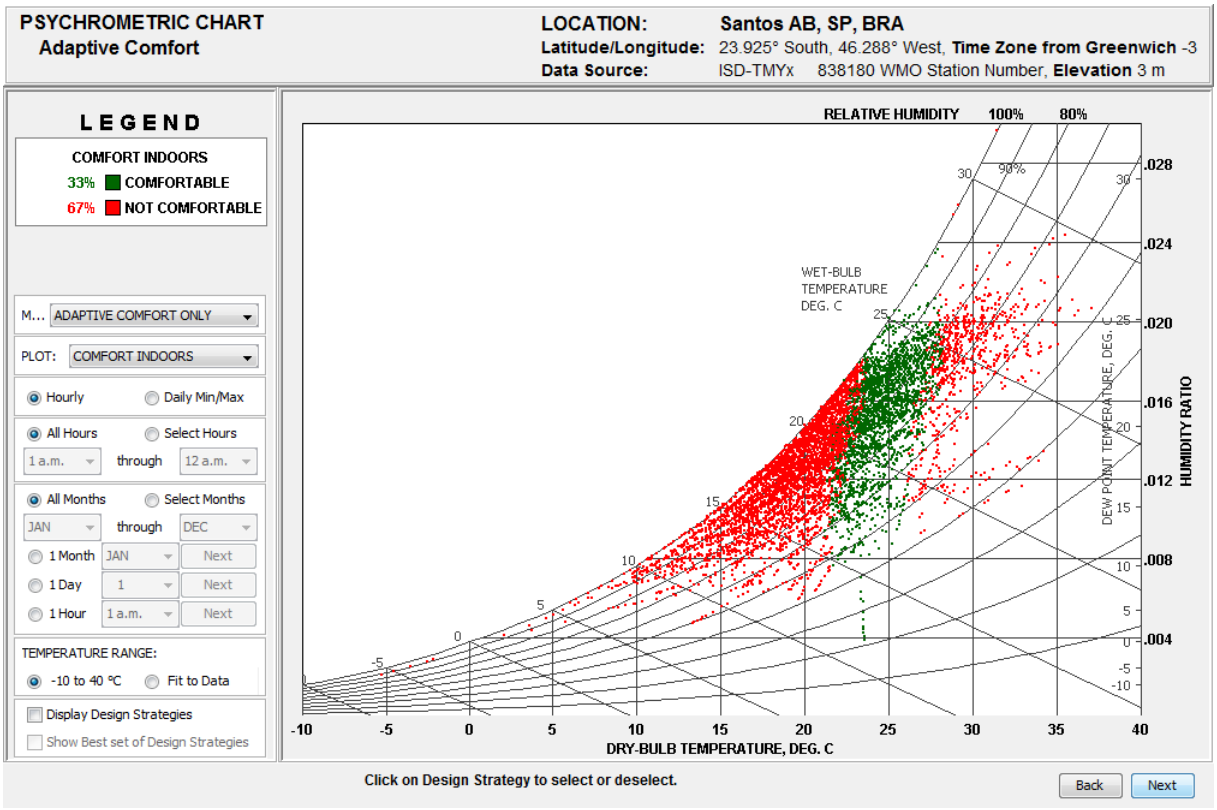
14c Santos-SP ZB5 G13



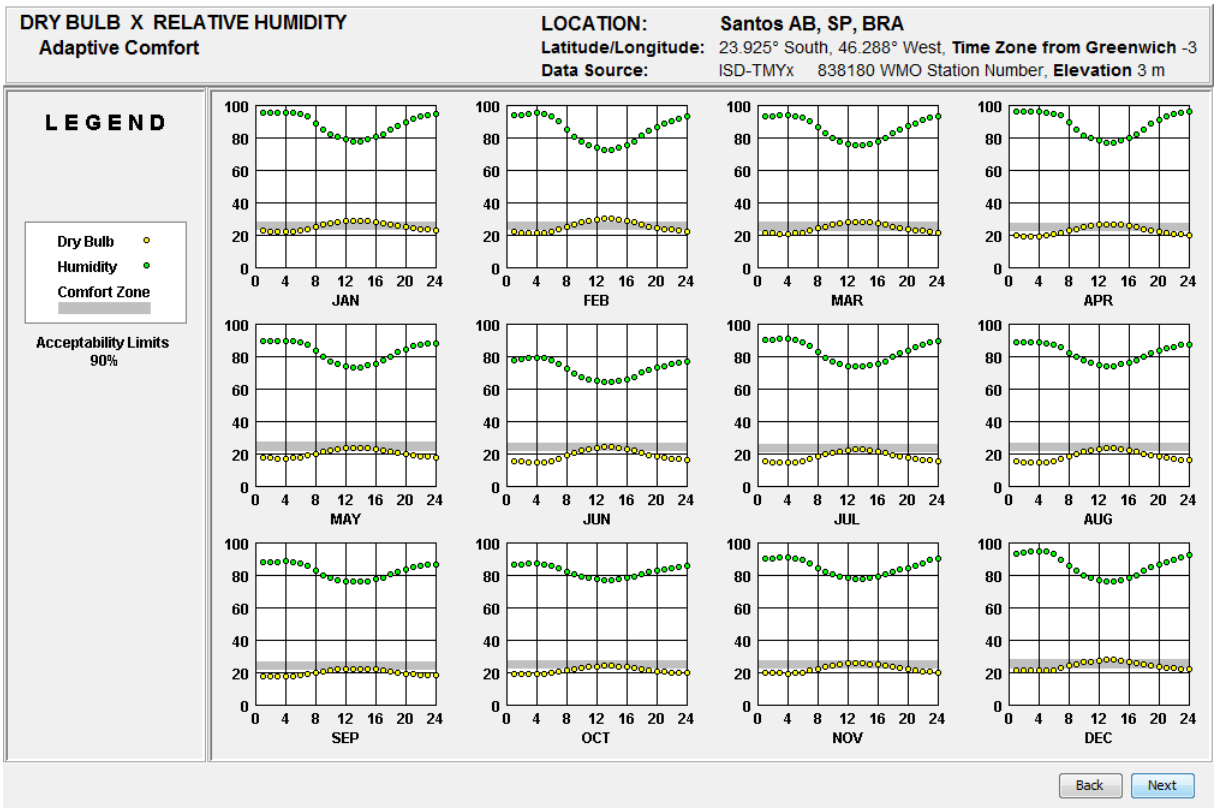
14d Santos-SP ZB5 G13



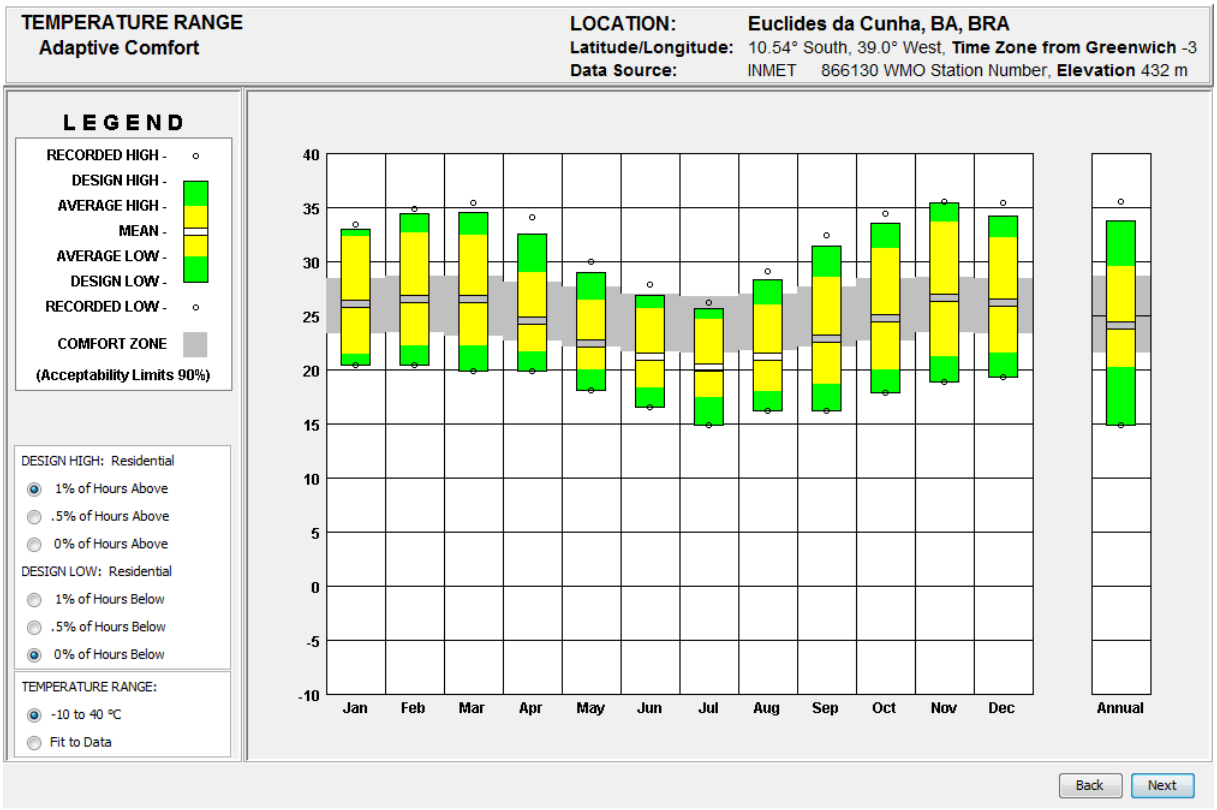
14e Santos-SP ZB5 G13



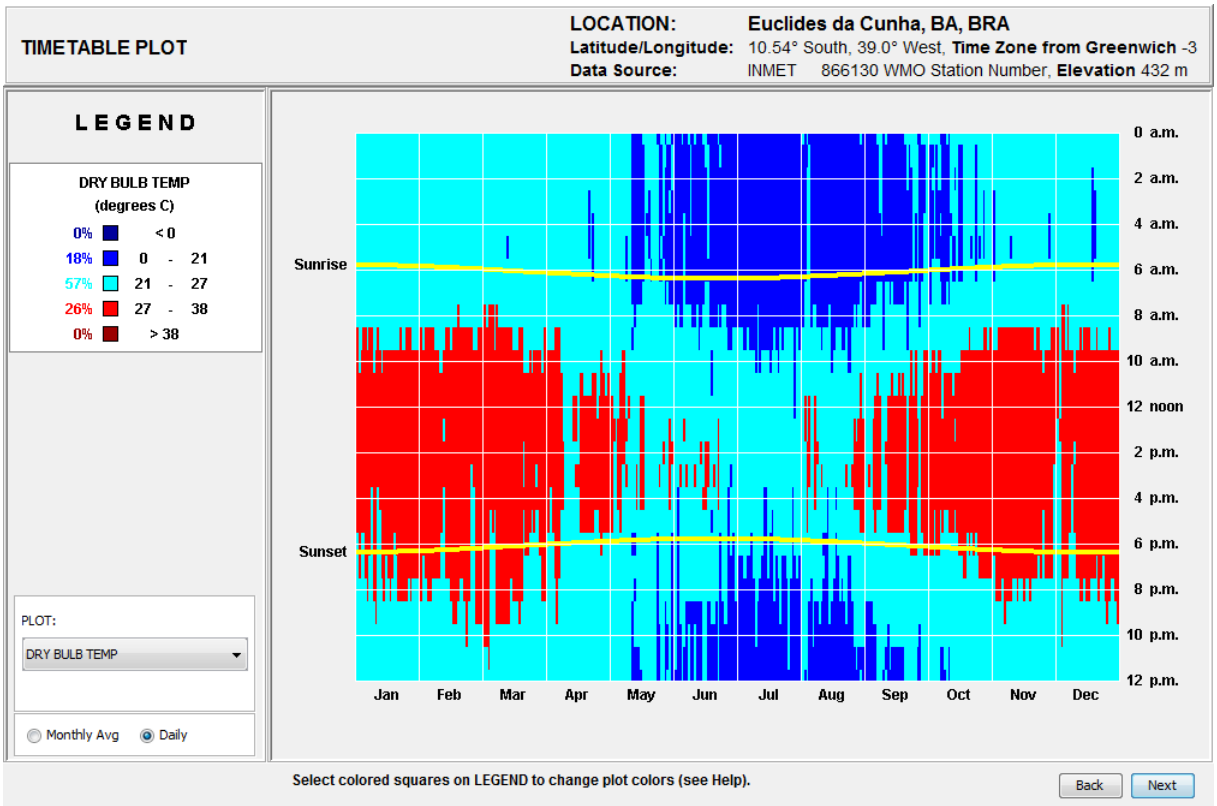
14f Santos-SP ZB5 G13



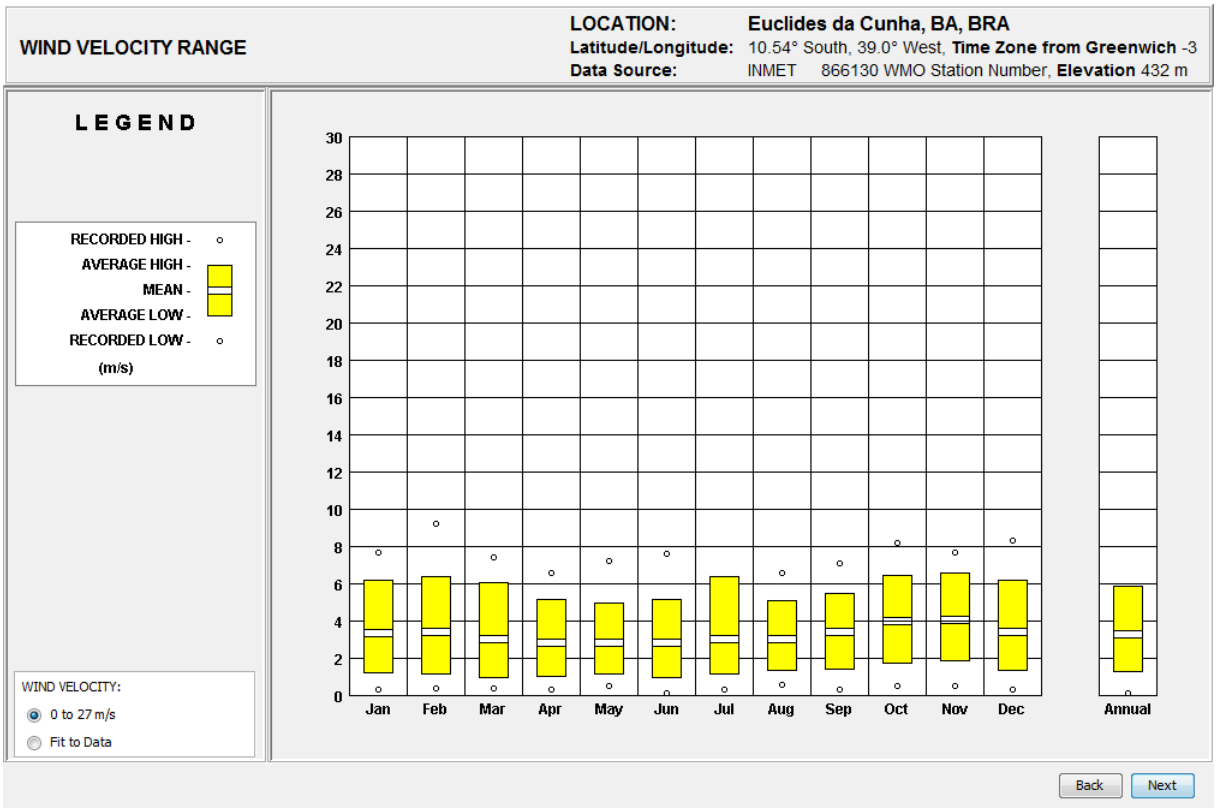
15a Euclides da Cunha-BA ZB7 G14



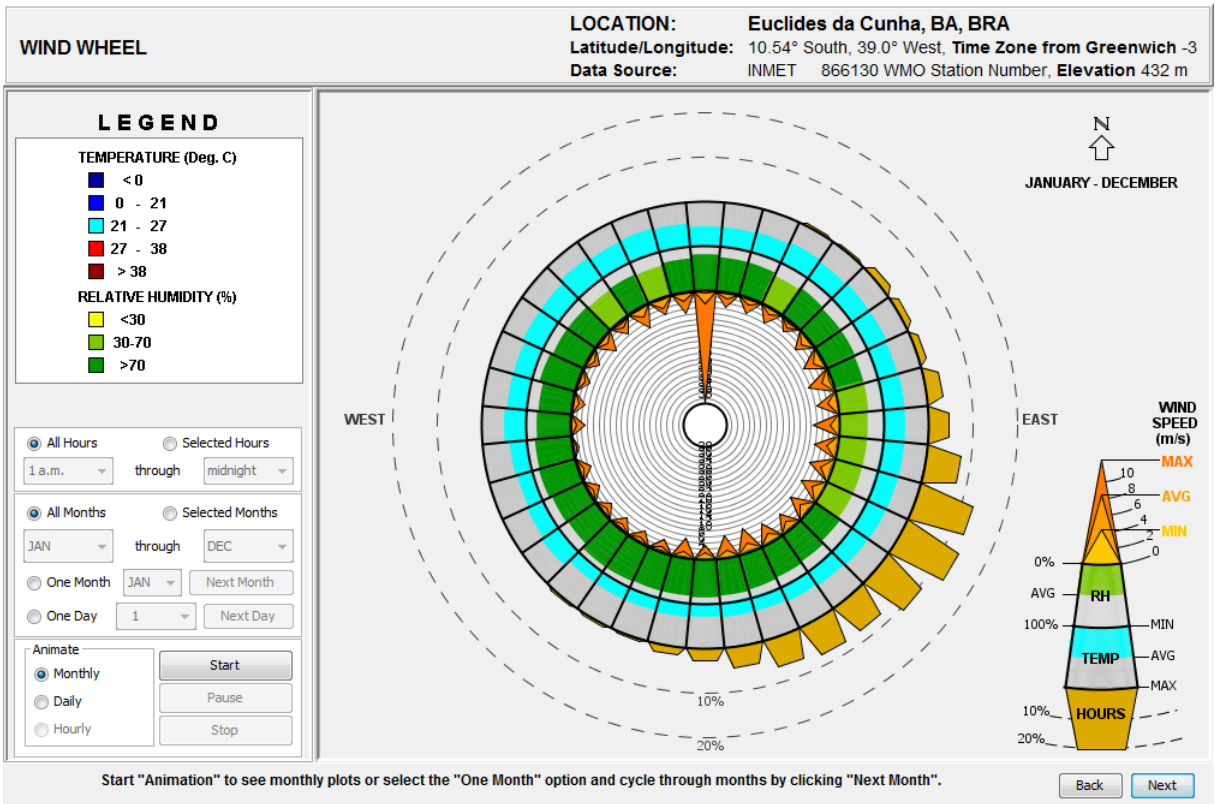
15b Euclides da Cunha-BA ZB7 G14



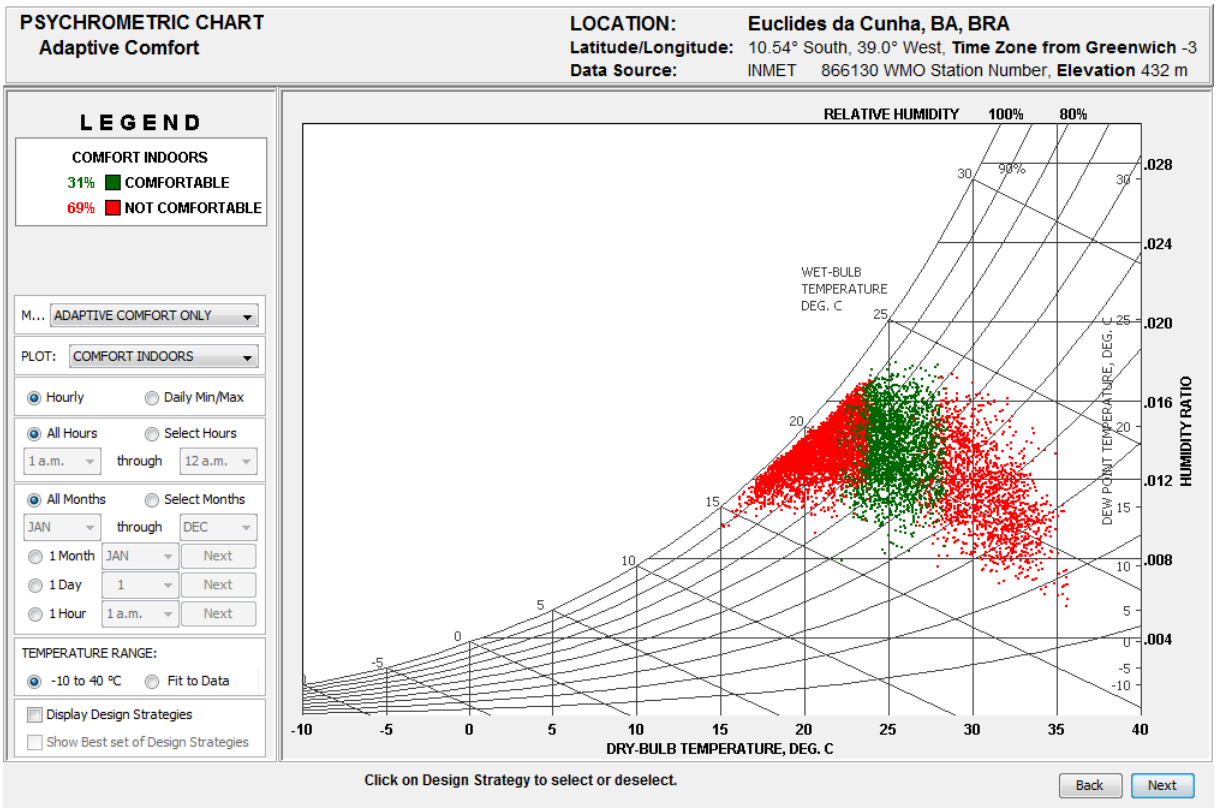
15c Euclides da Cunha-BA ZB7 G14



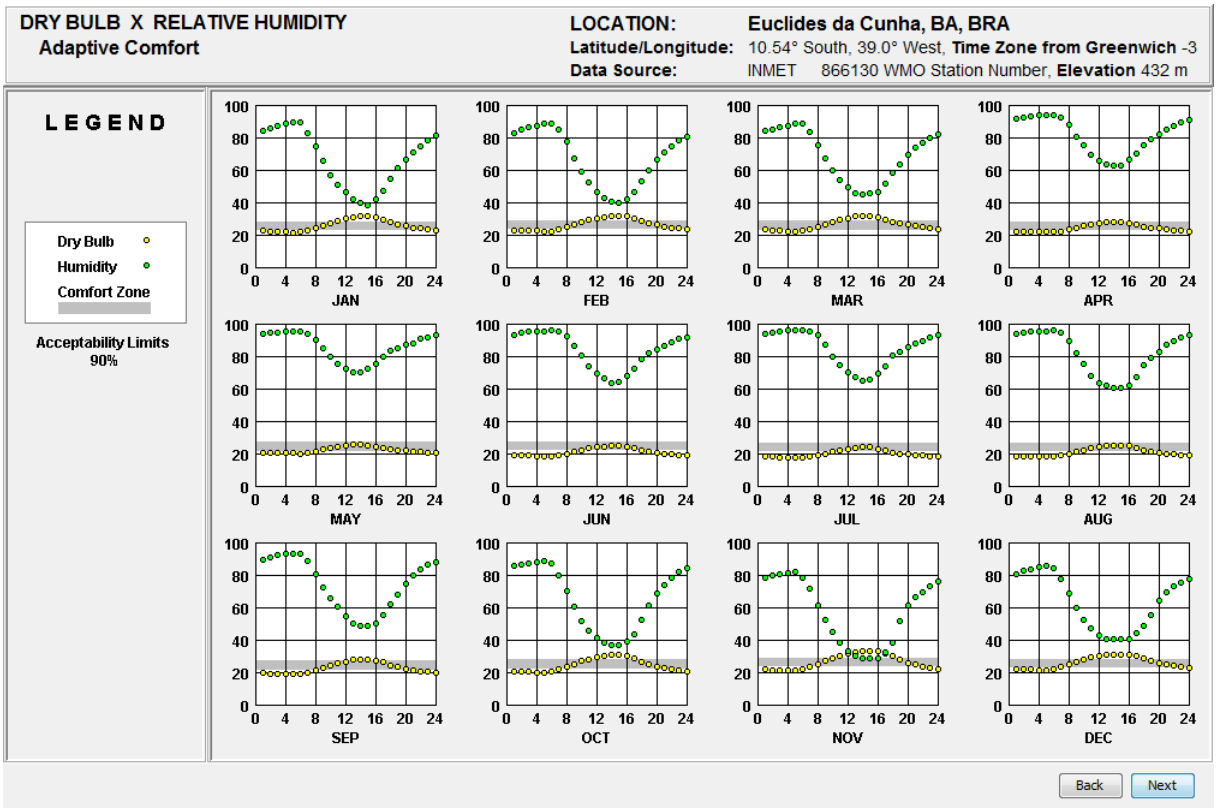
15d Euclides da Cunha-BA ZB7 G14



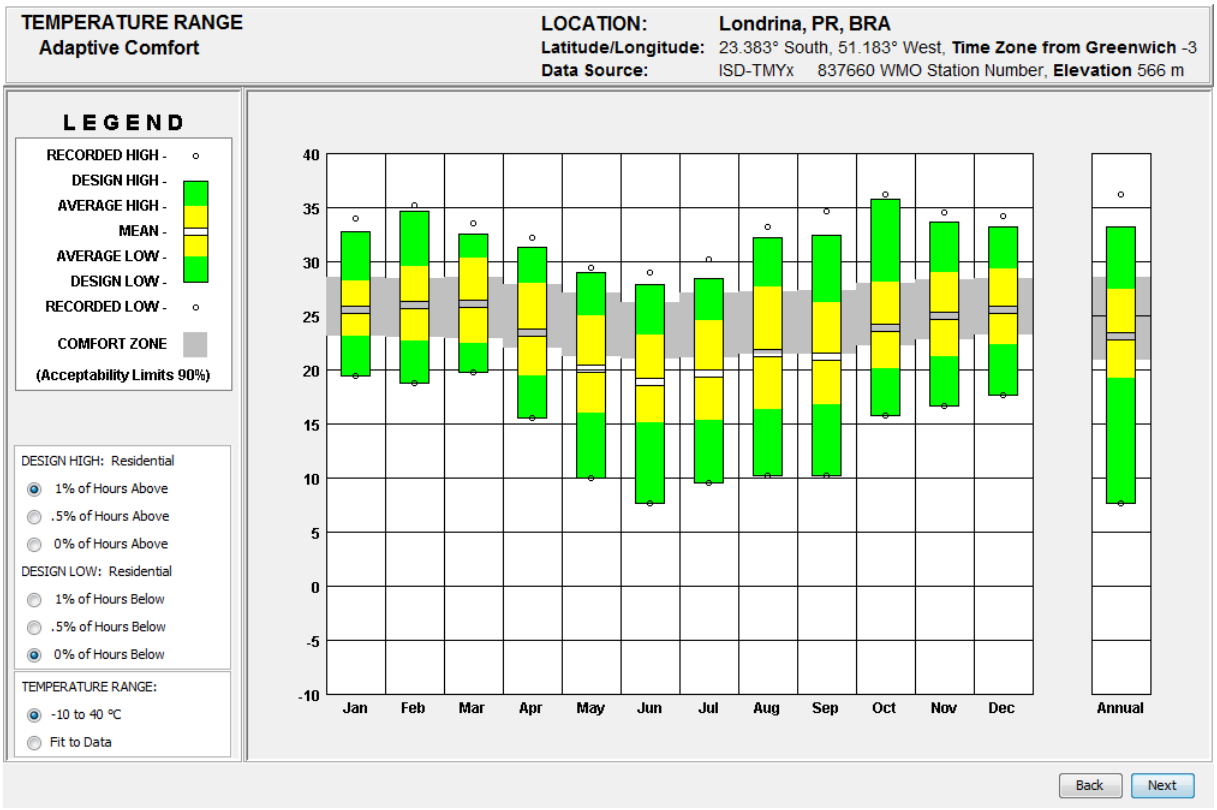
15e Euclides da Cunha-BA ZB7 G14



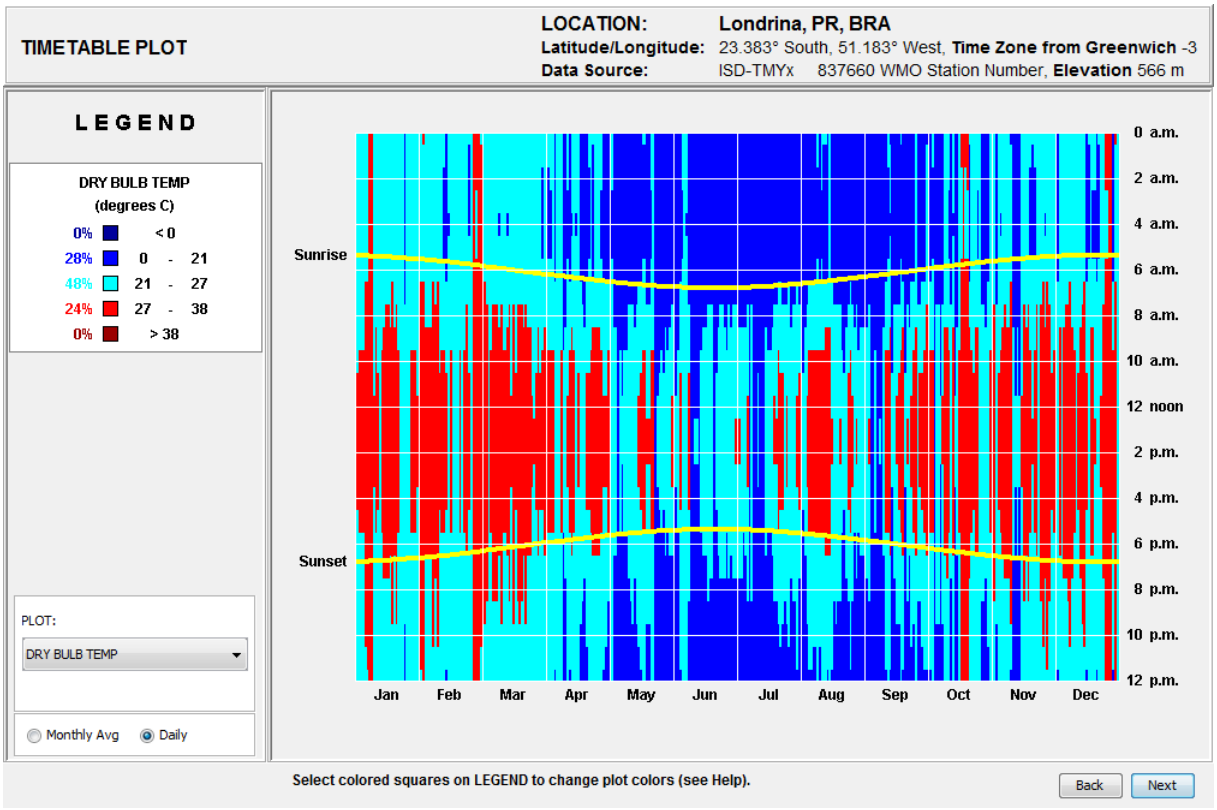
15f Euclides da Cunha-BA ZB7 G14



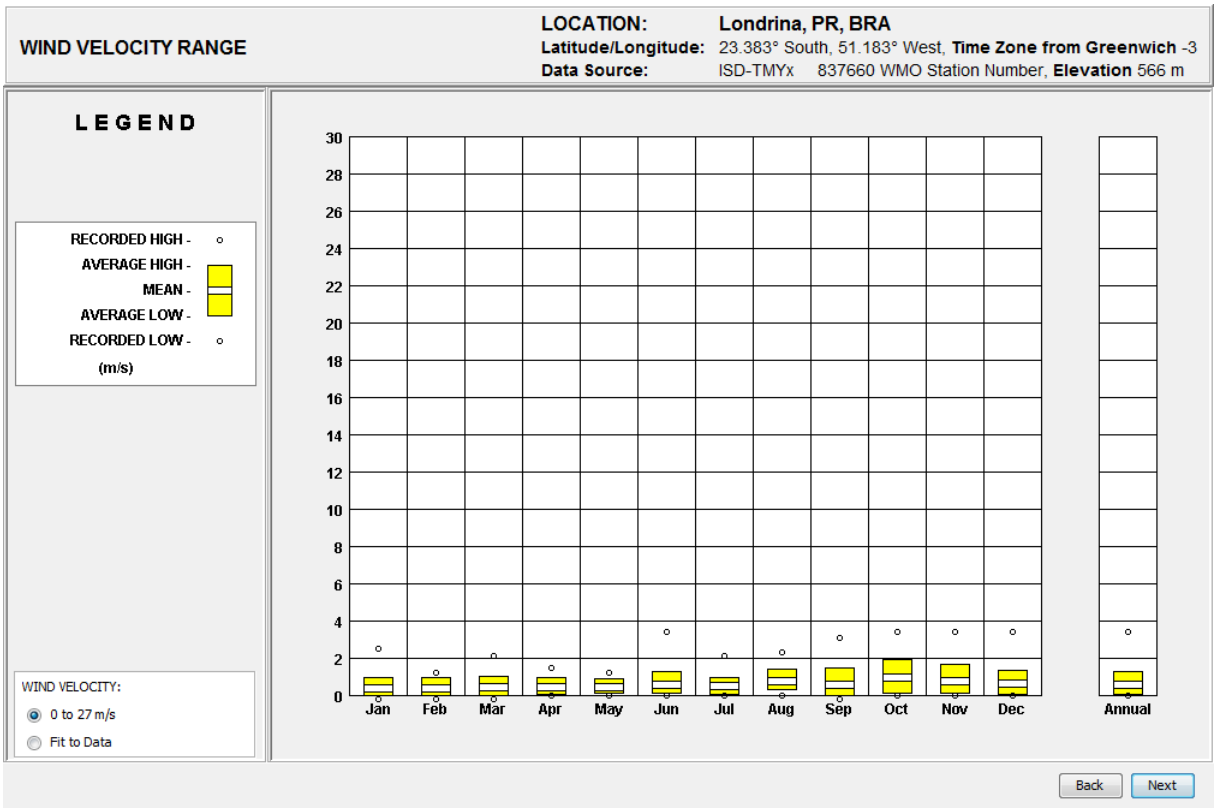
16a Londrina-PR ZB3 G15



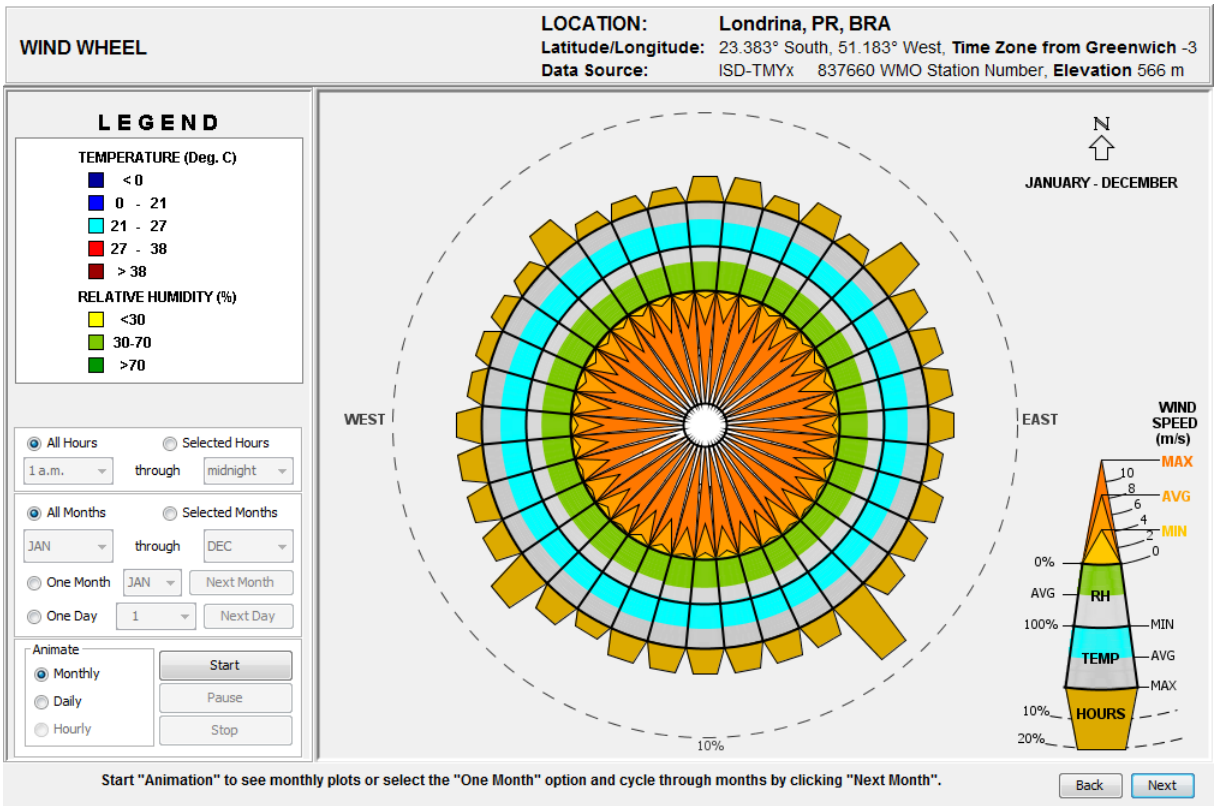
16b Londrina-PR ZB3 G15



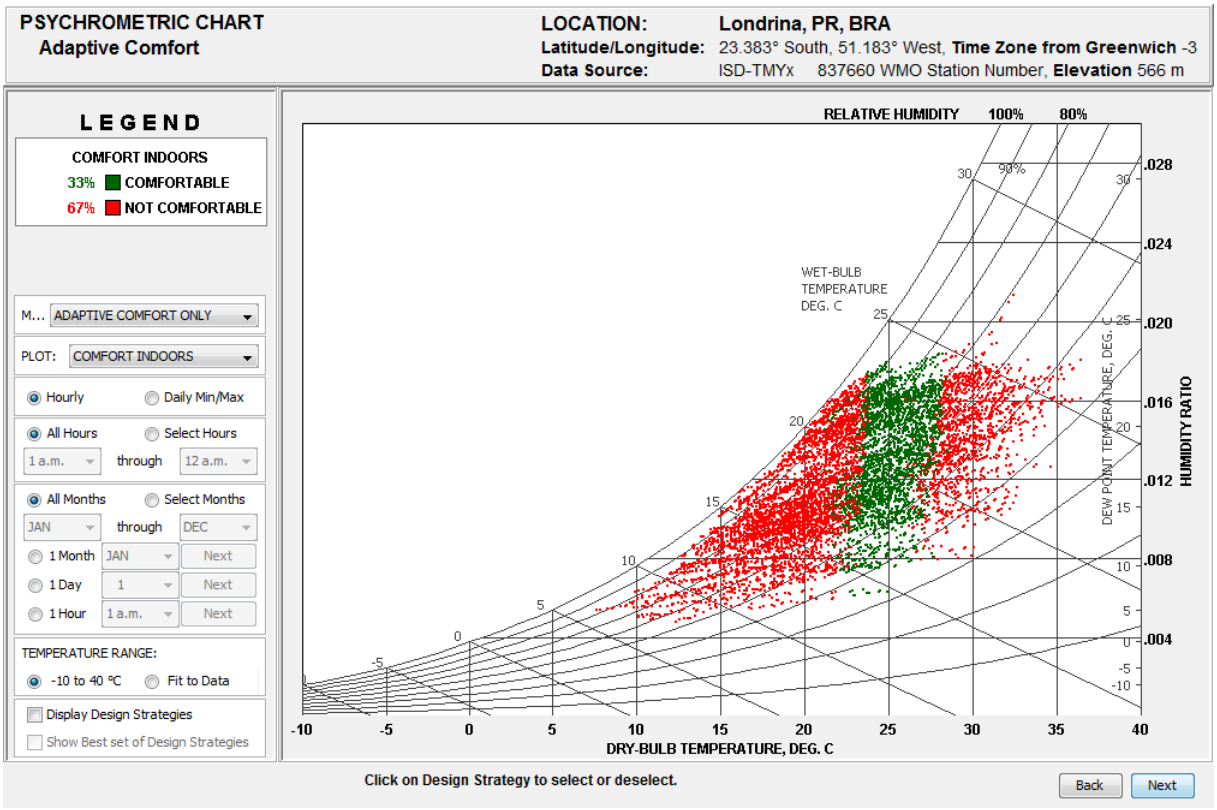
16c Londrina-PR ZB3 G15



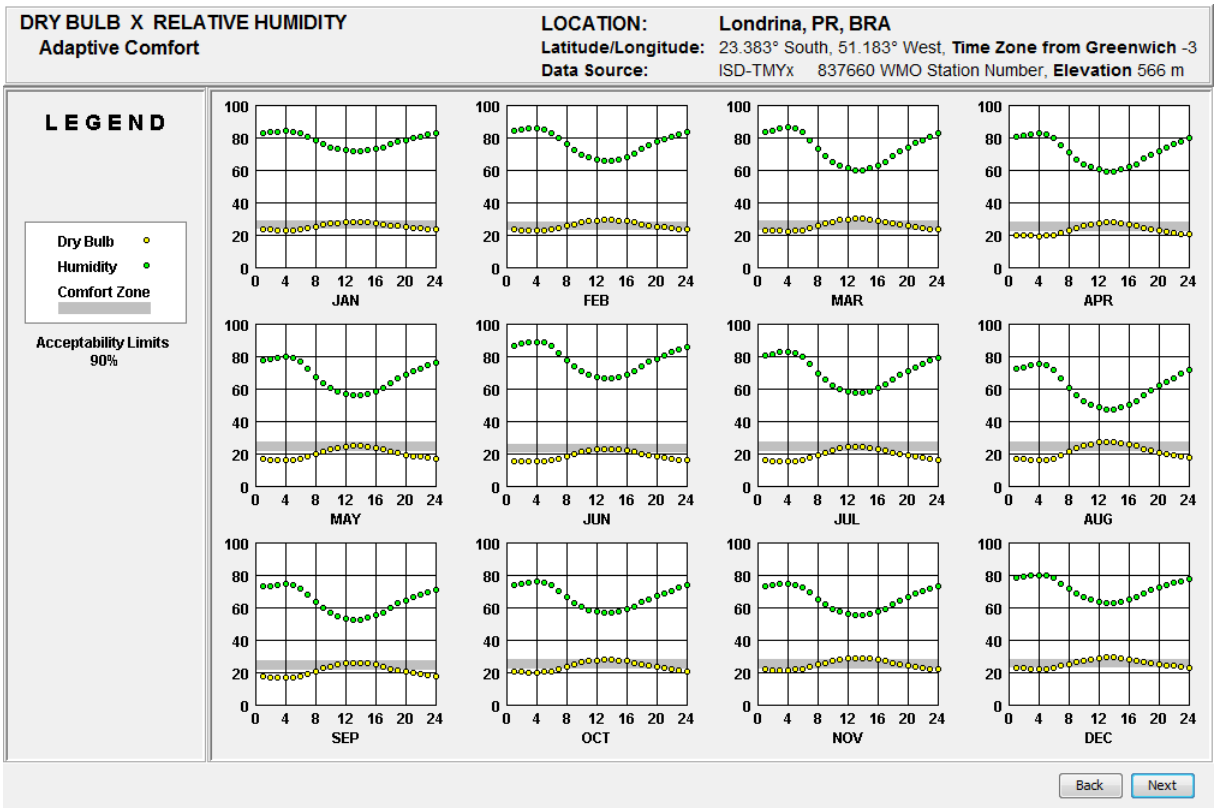
16d Londrina-PR ZB3 G15



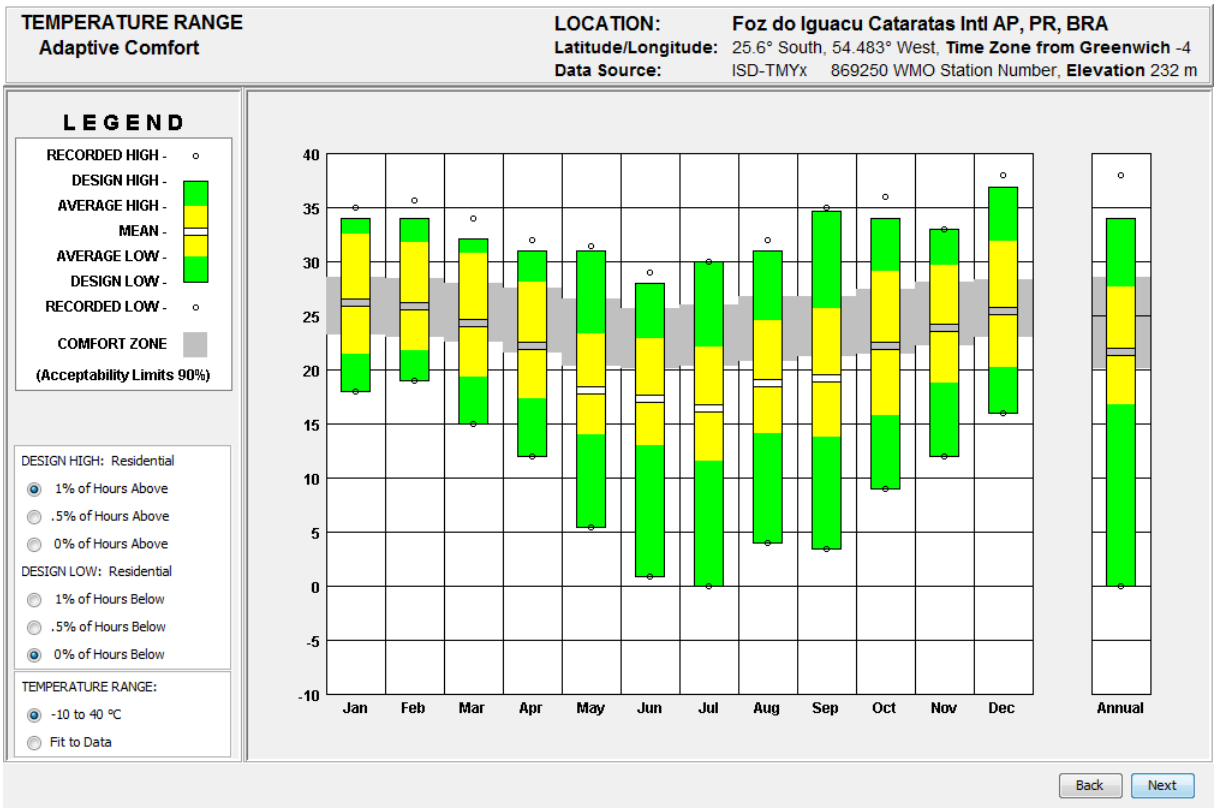
16e Londrina-PR ZB3 G15



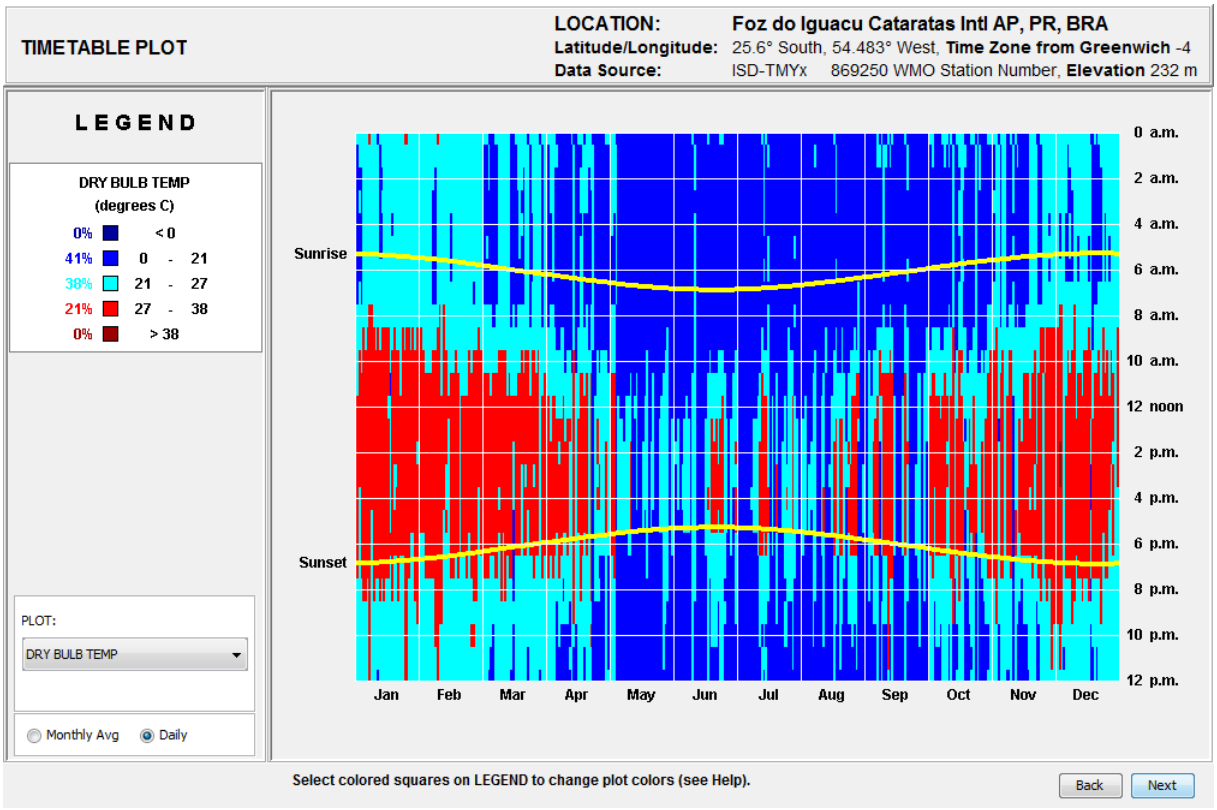
16f Londrina-PR ZB3 G15



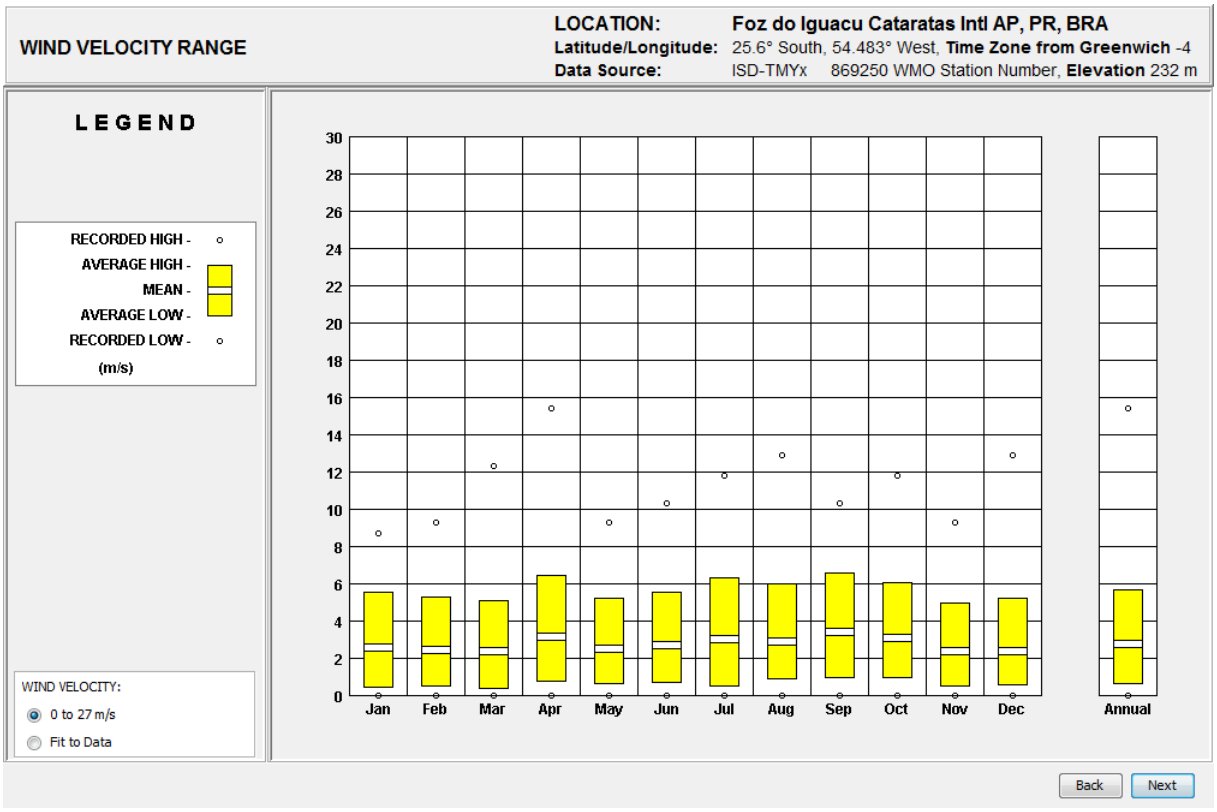
17a Foz do Iguaçu-PR ZB3 G16



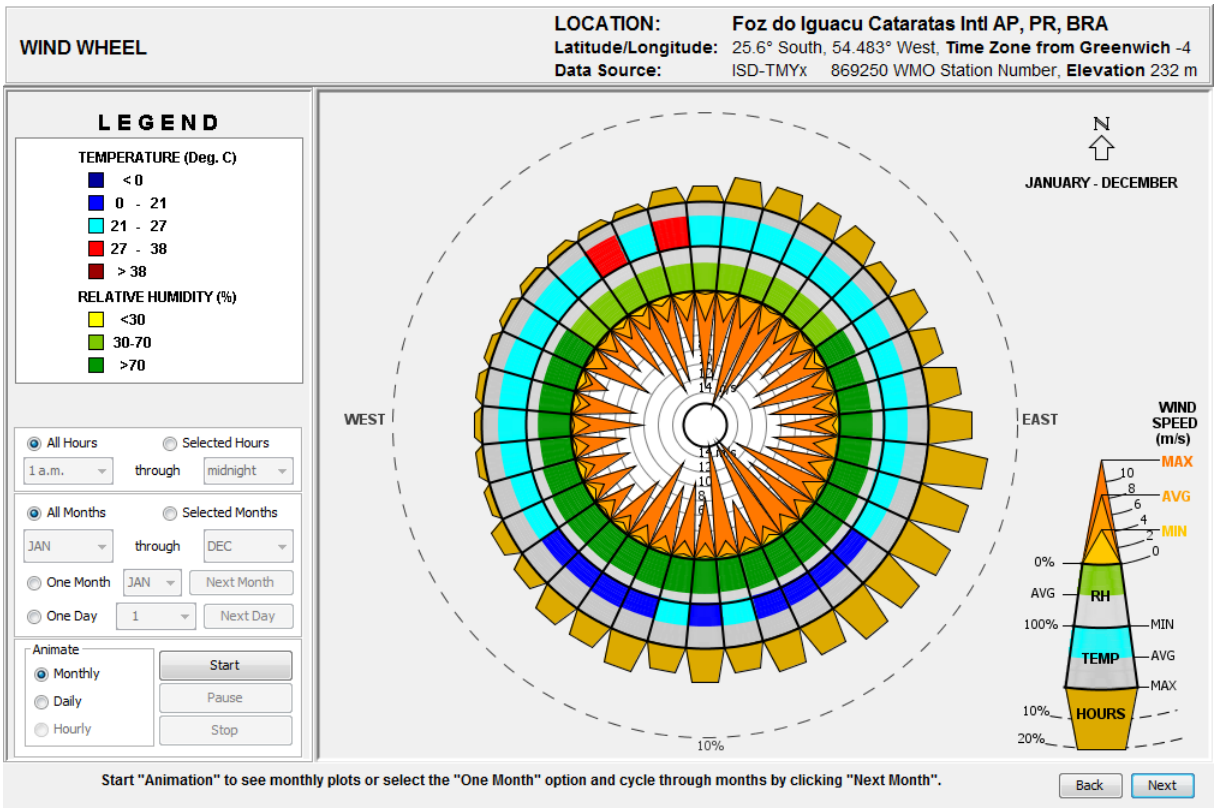
17b Foz do Iguaçu-PR ZB3 G16



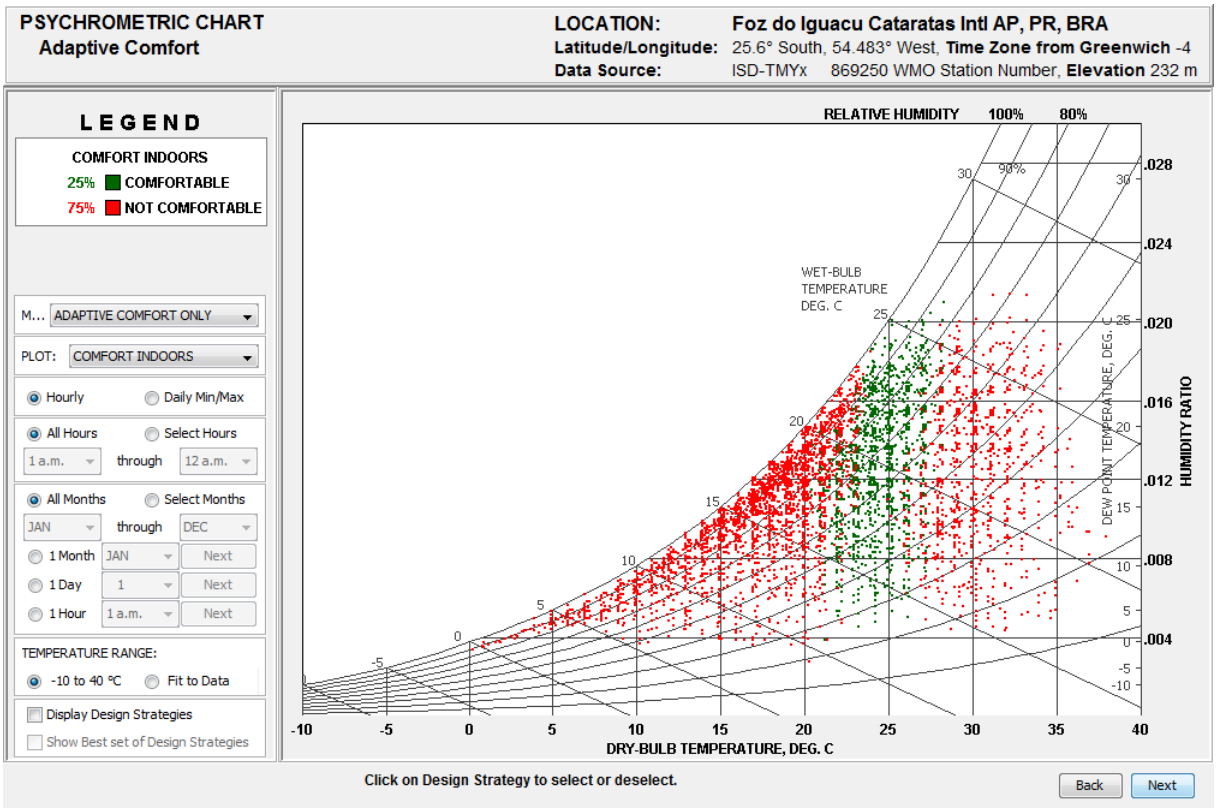
17c Foz do Iguaçu-PR ZB3 G16



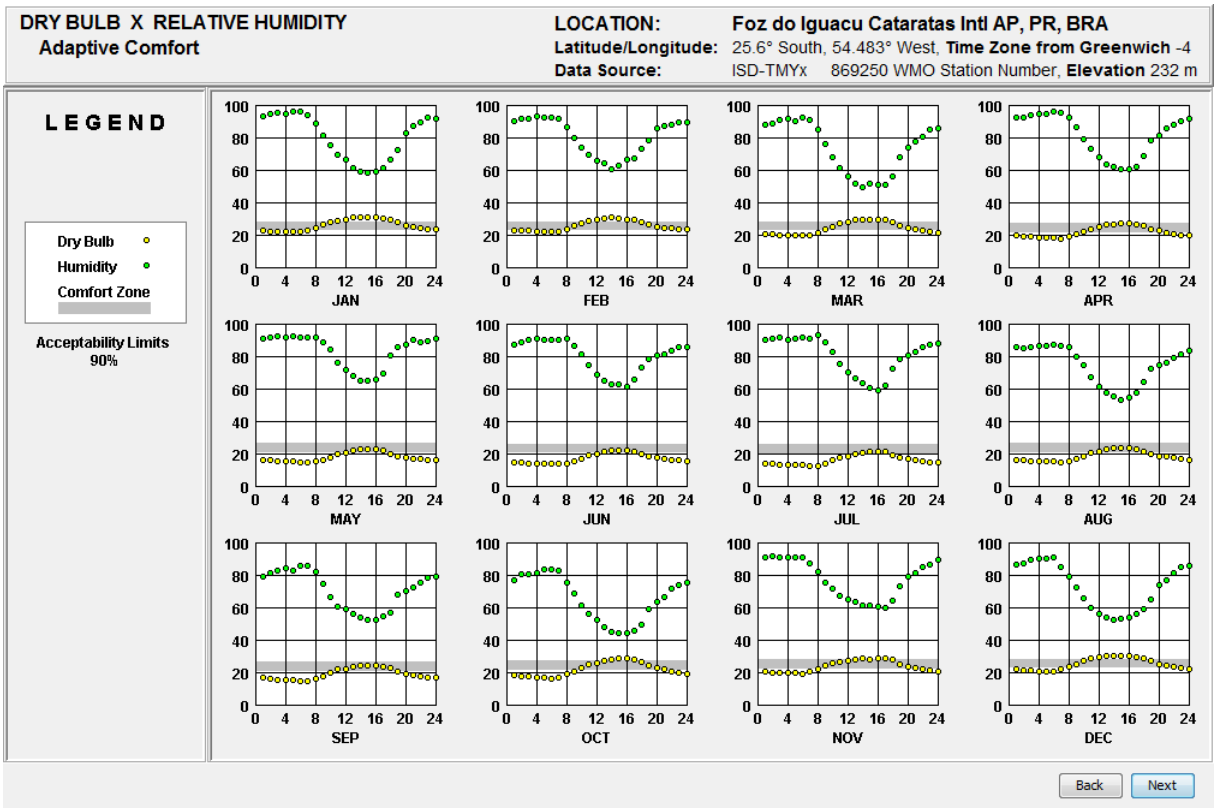
17d Foz do Iguaçu-PR ZB3 G16



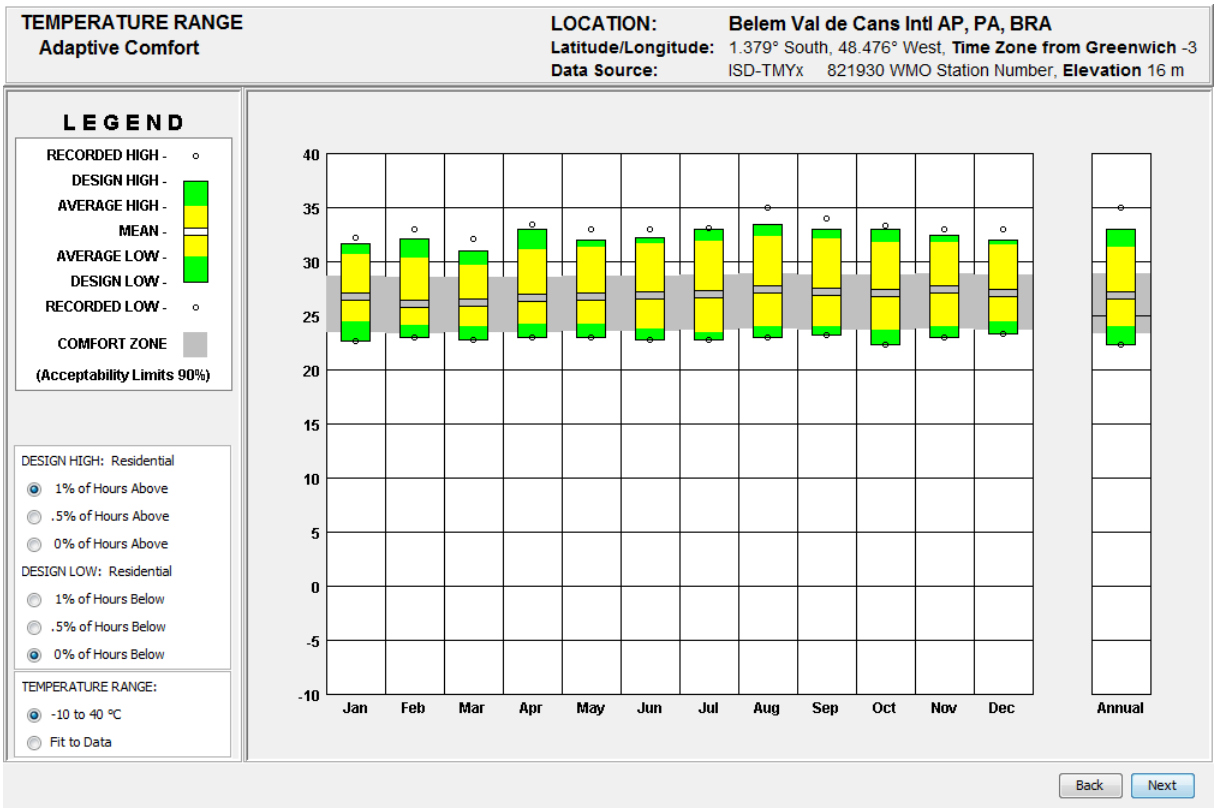
17e Foz do Iguaçu-PR ZB3 G16



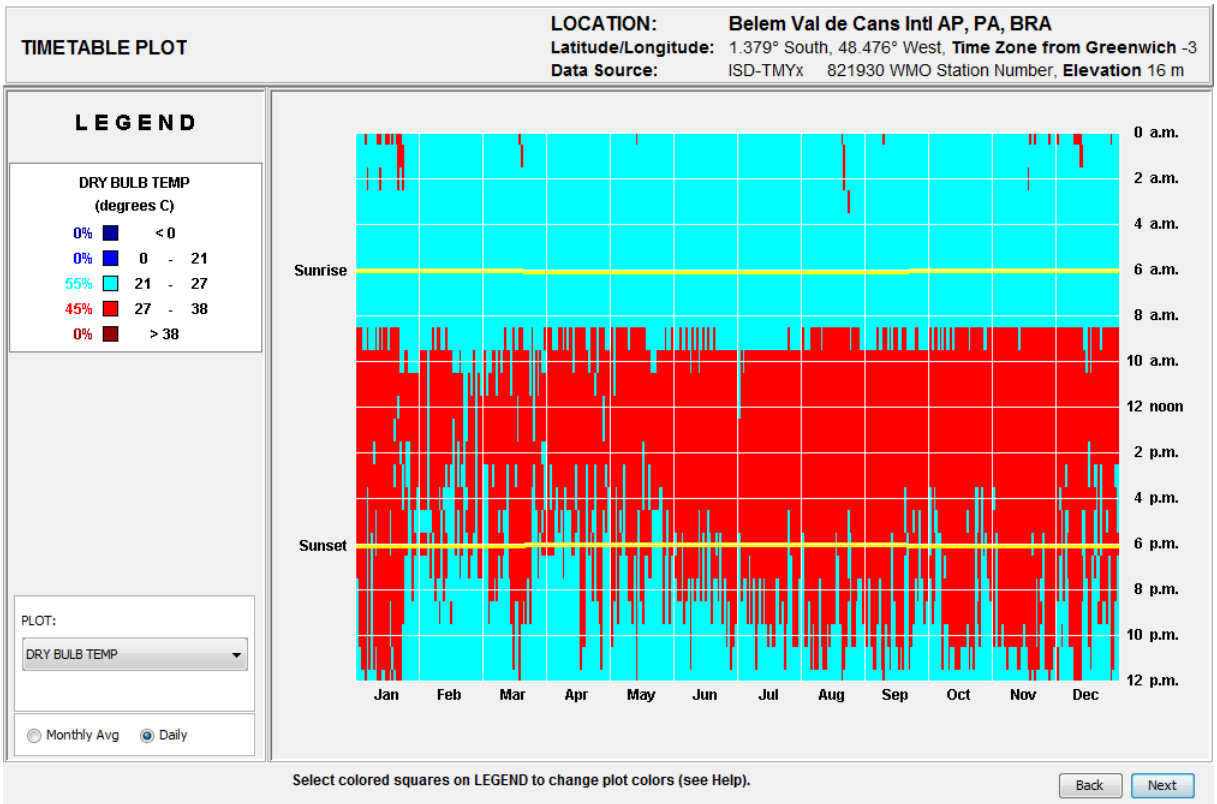
17f Foz do Iguaçu-PR ZB3 G16



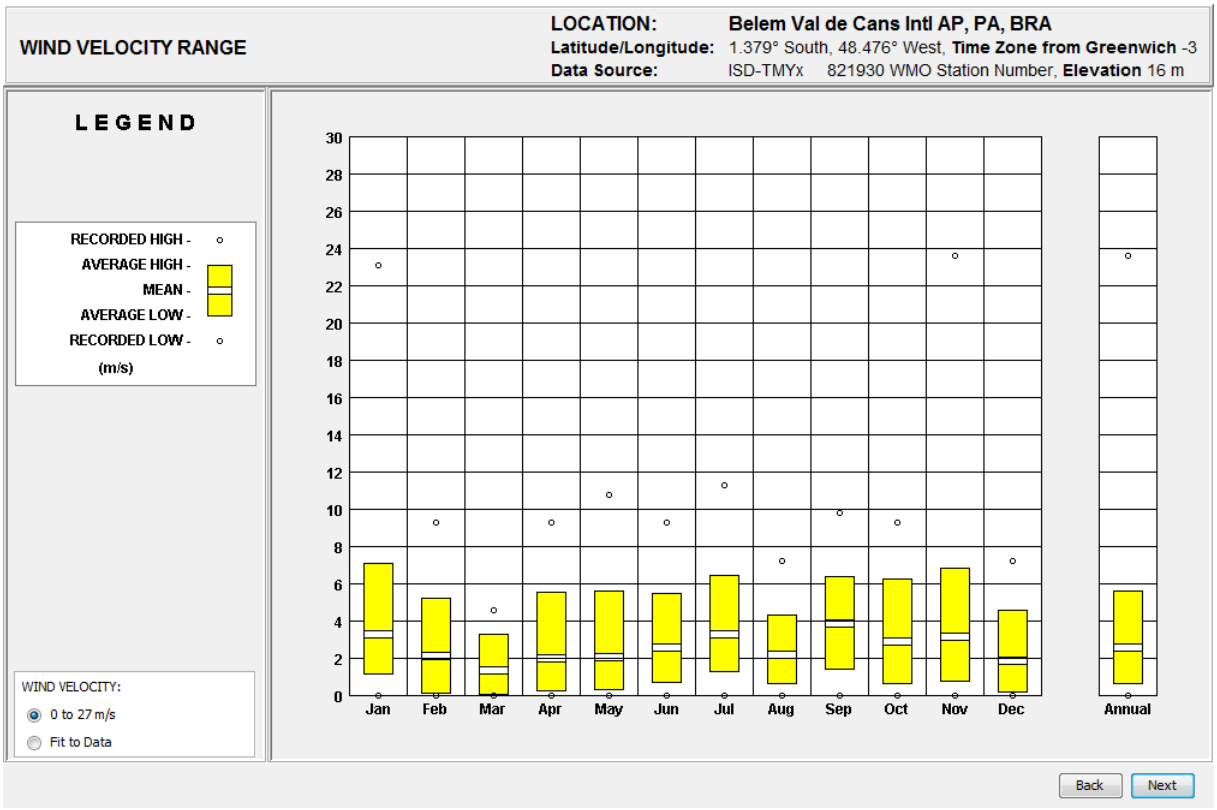
18a Belém-PA ZB8 G17



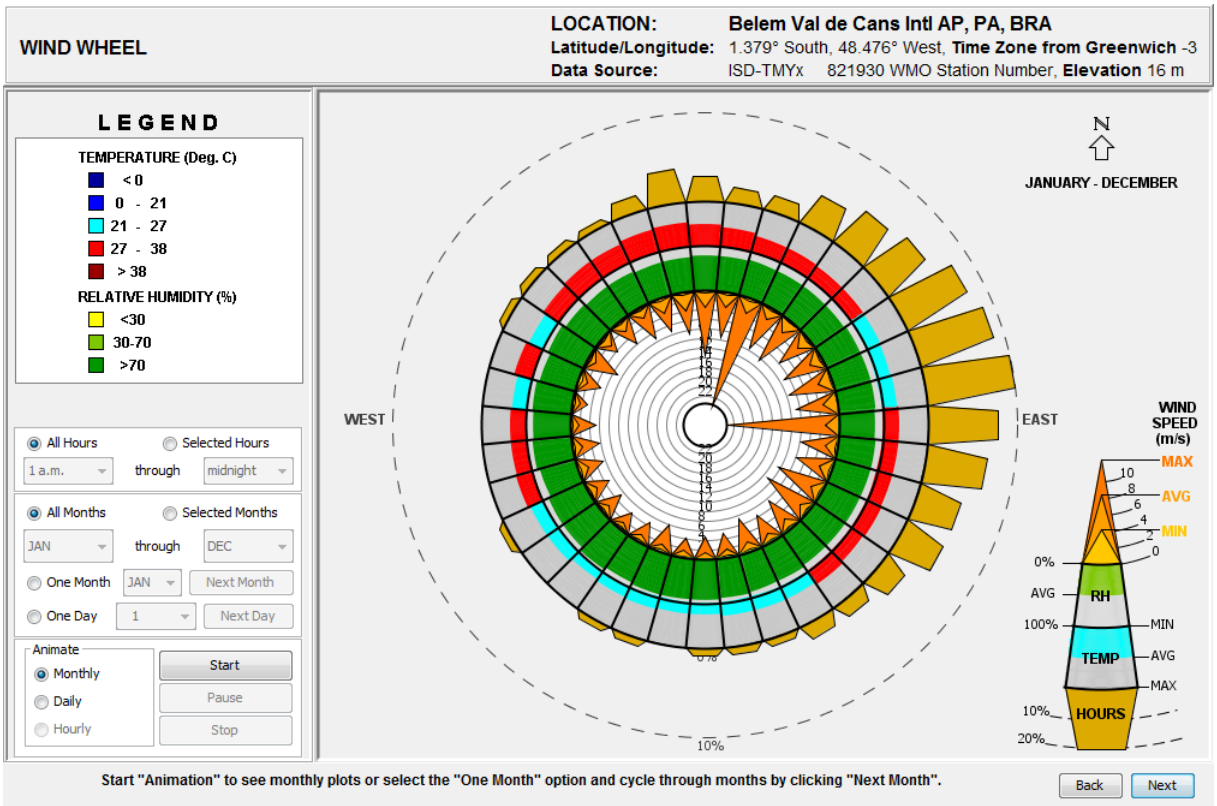
18b Belém-PA ZB8 G17



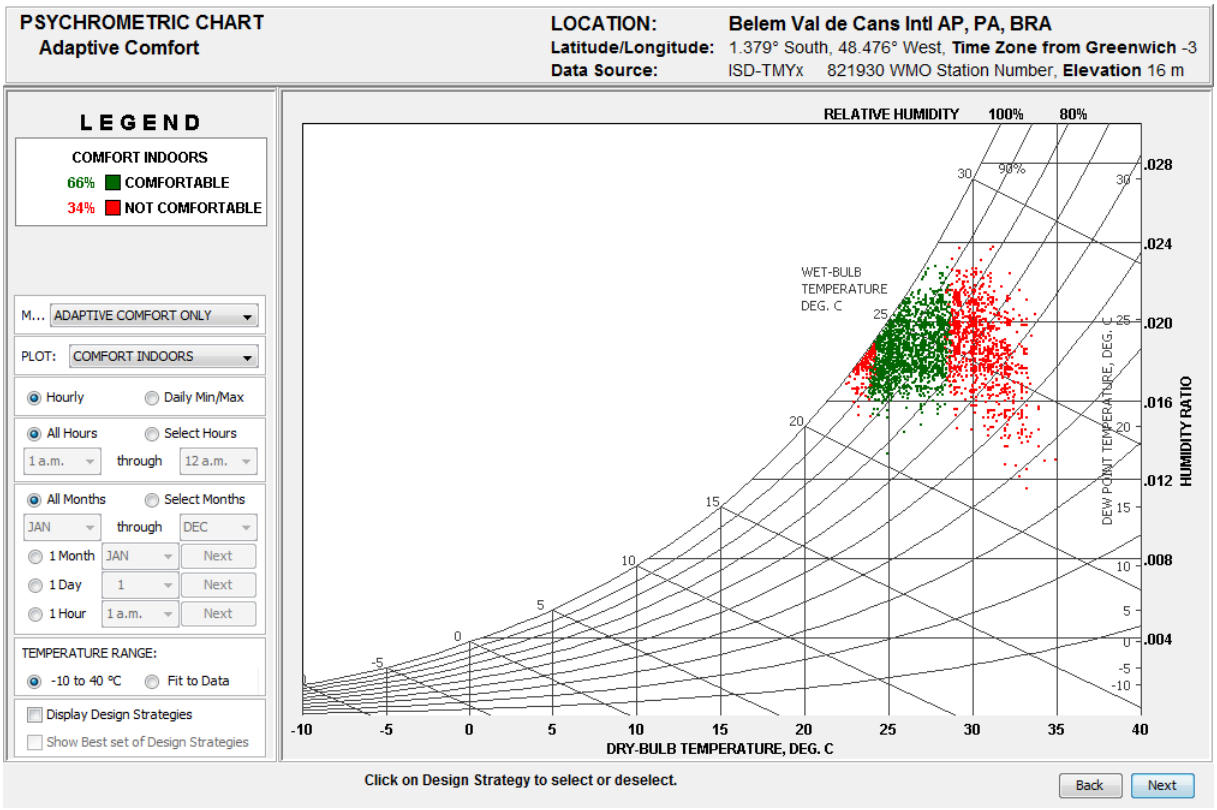
18c Belém-PA ZB8 G17



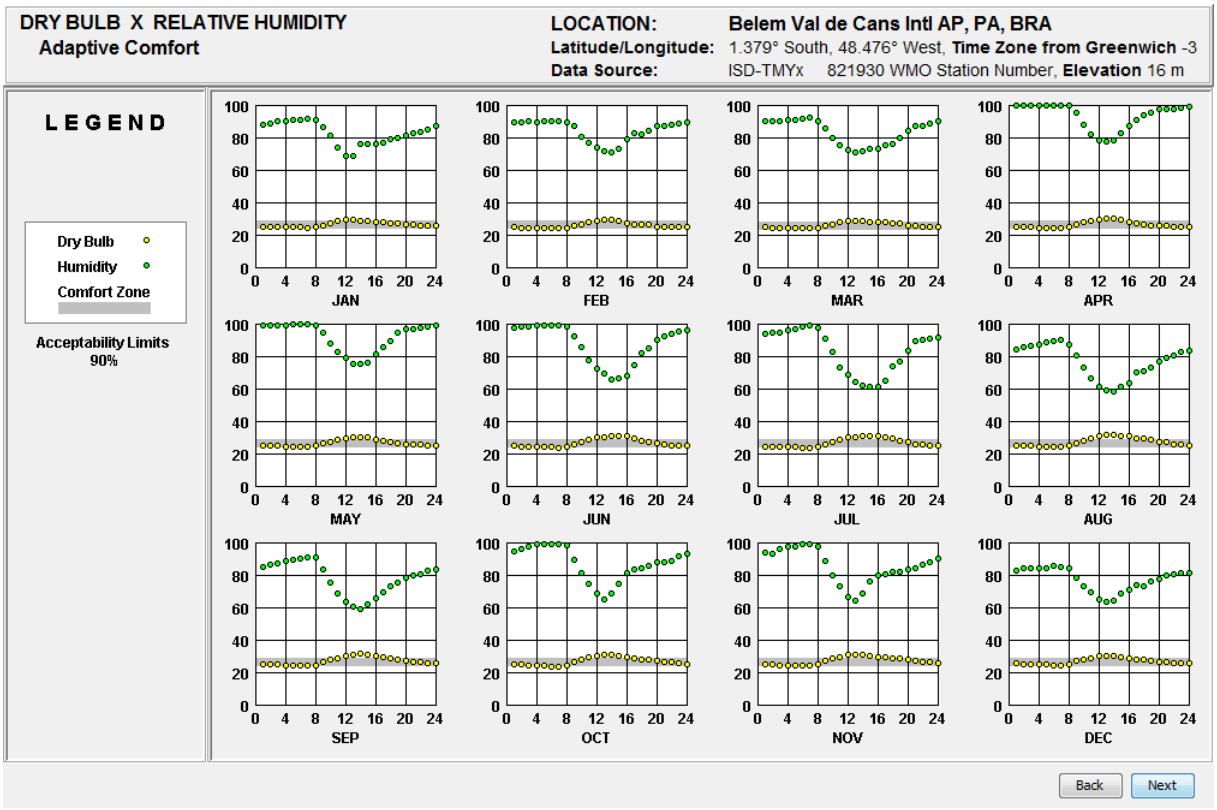
18d Belém-PA ZB8 G17



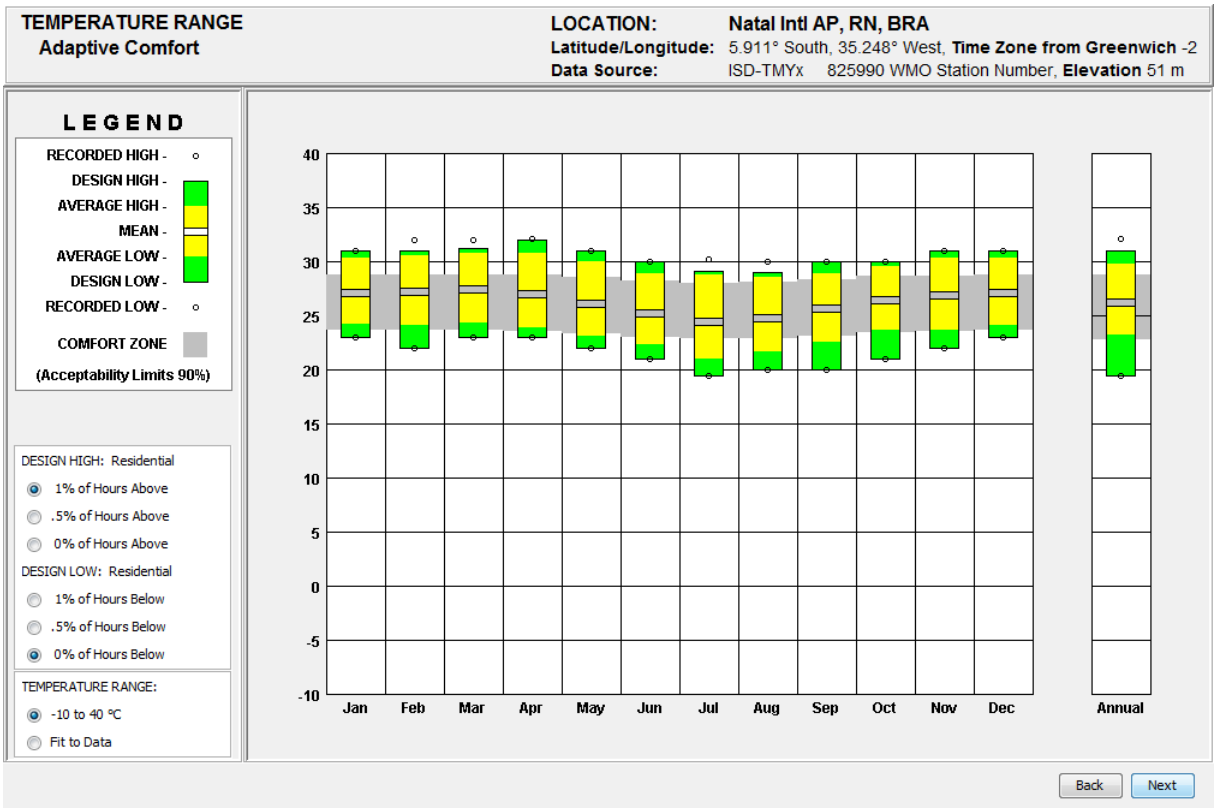
18e Belém-PA ZB8 G17



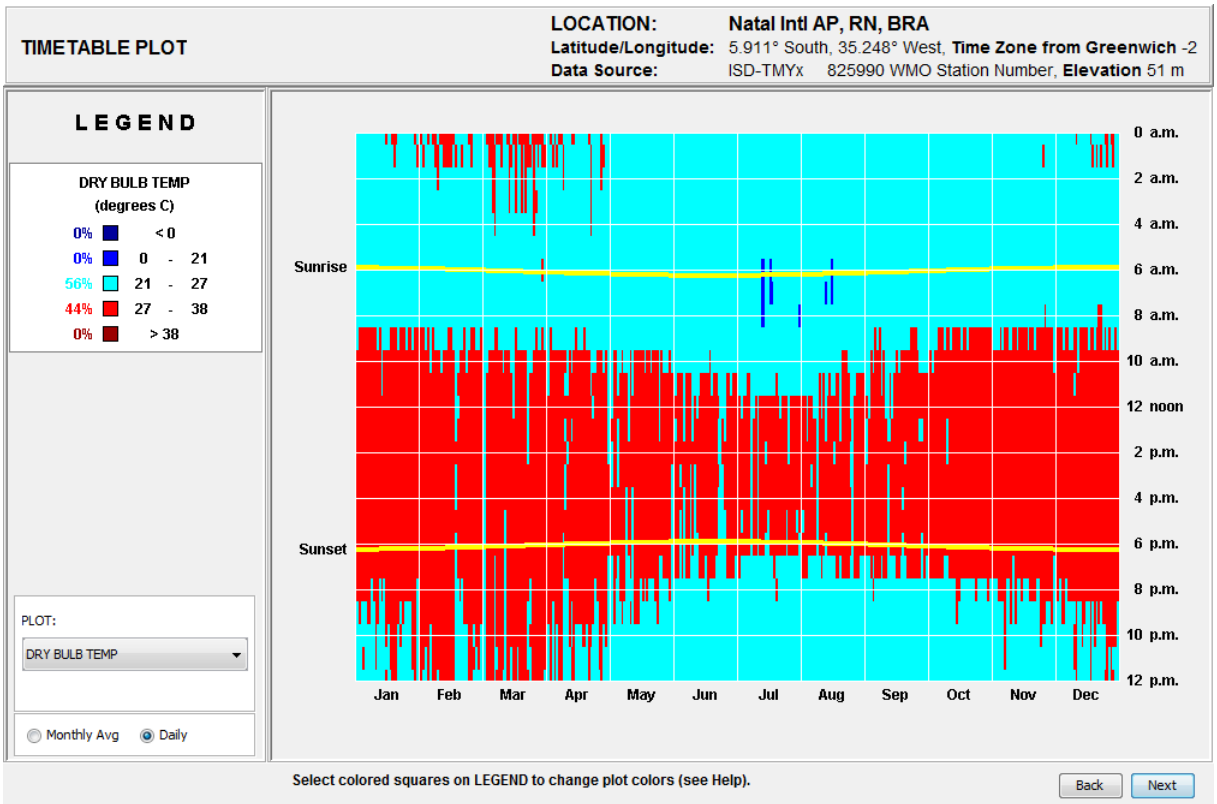
18f Belém-PA ZB8 G17



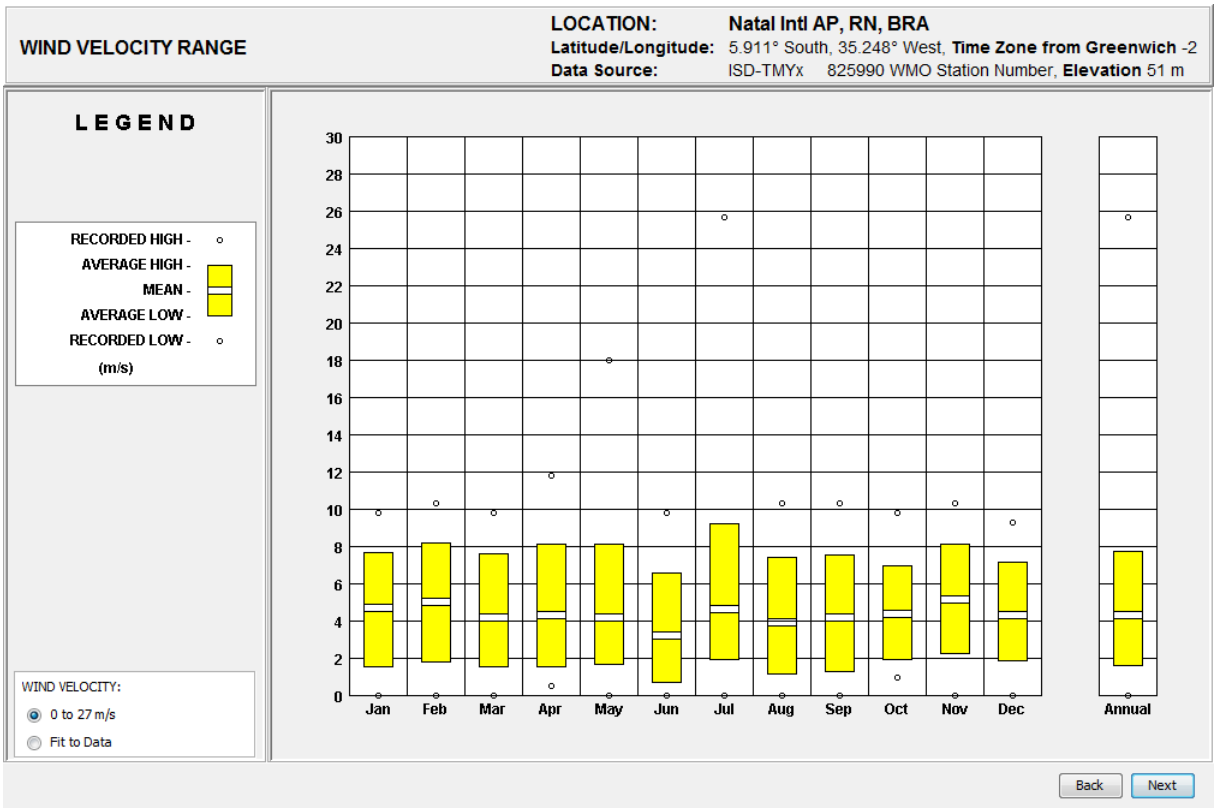
19a Natal-RN ZB8 G18



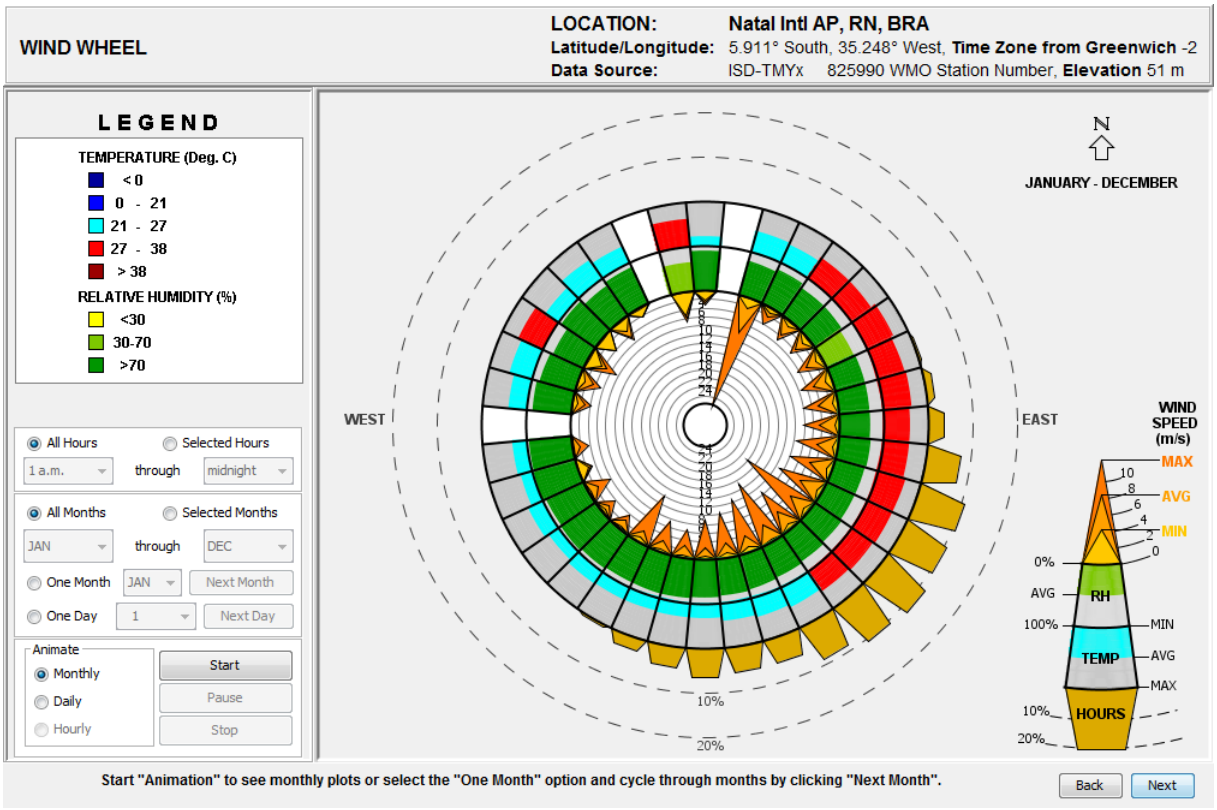
19b Natal-RN ZB8 G18



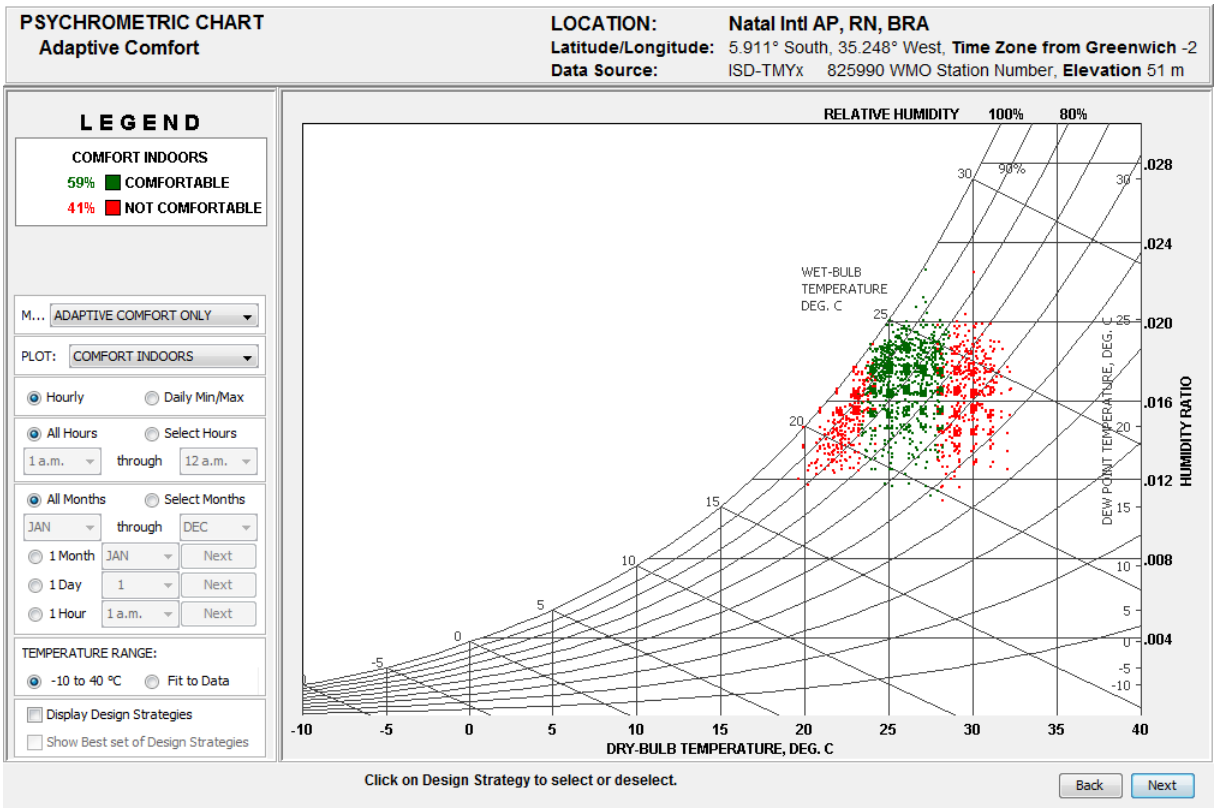
19c Natal-RN ZB8 G18



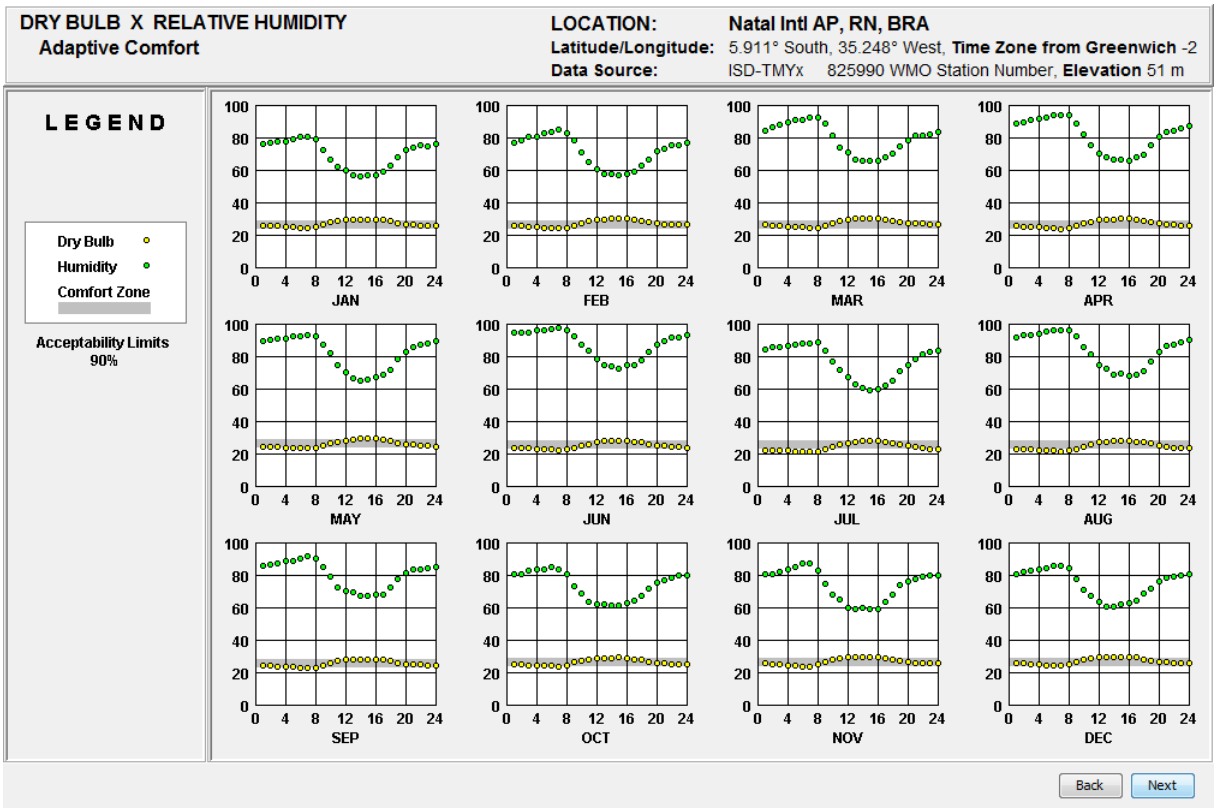
19d Natal-RN ZB8 G18



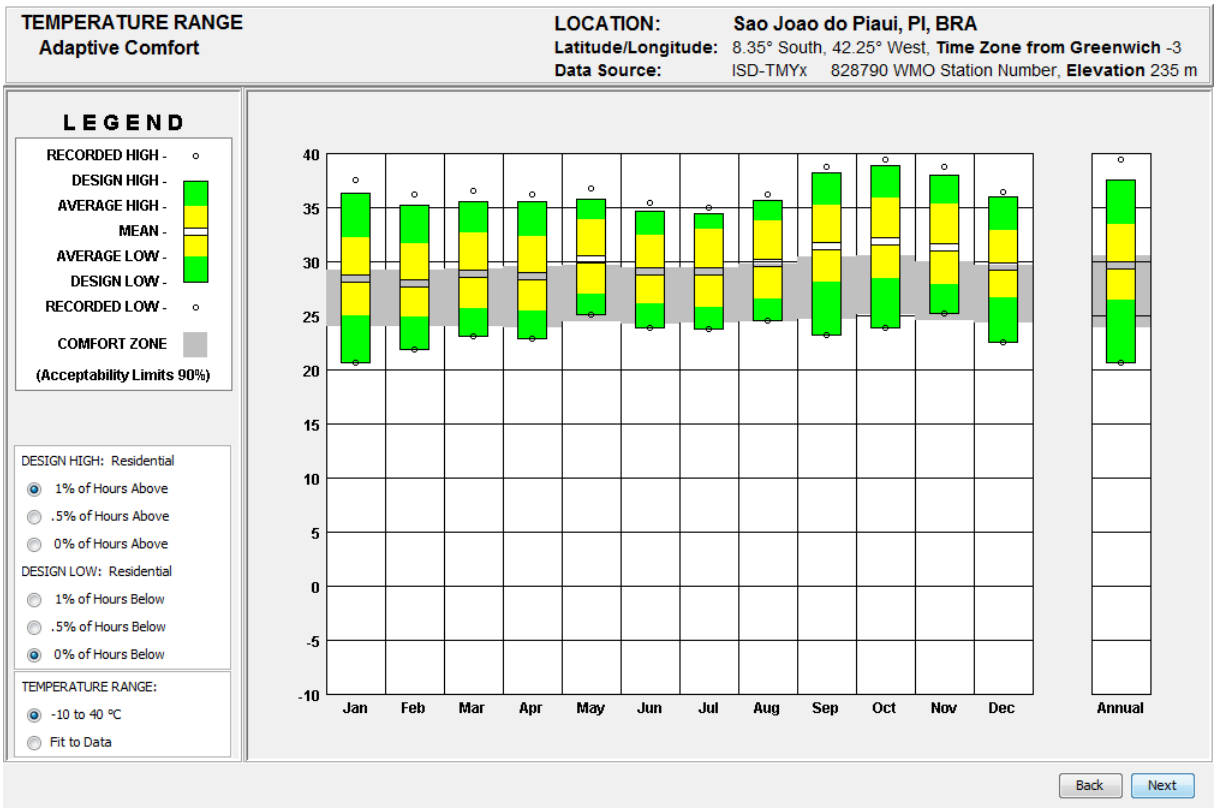
19e Natal-RN ZB8 G18



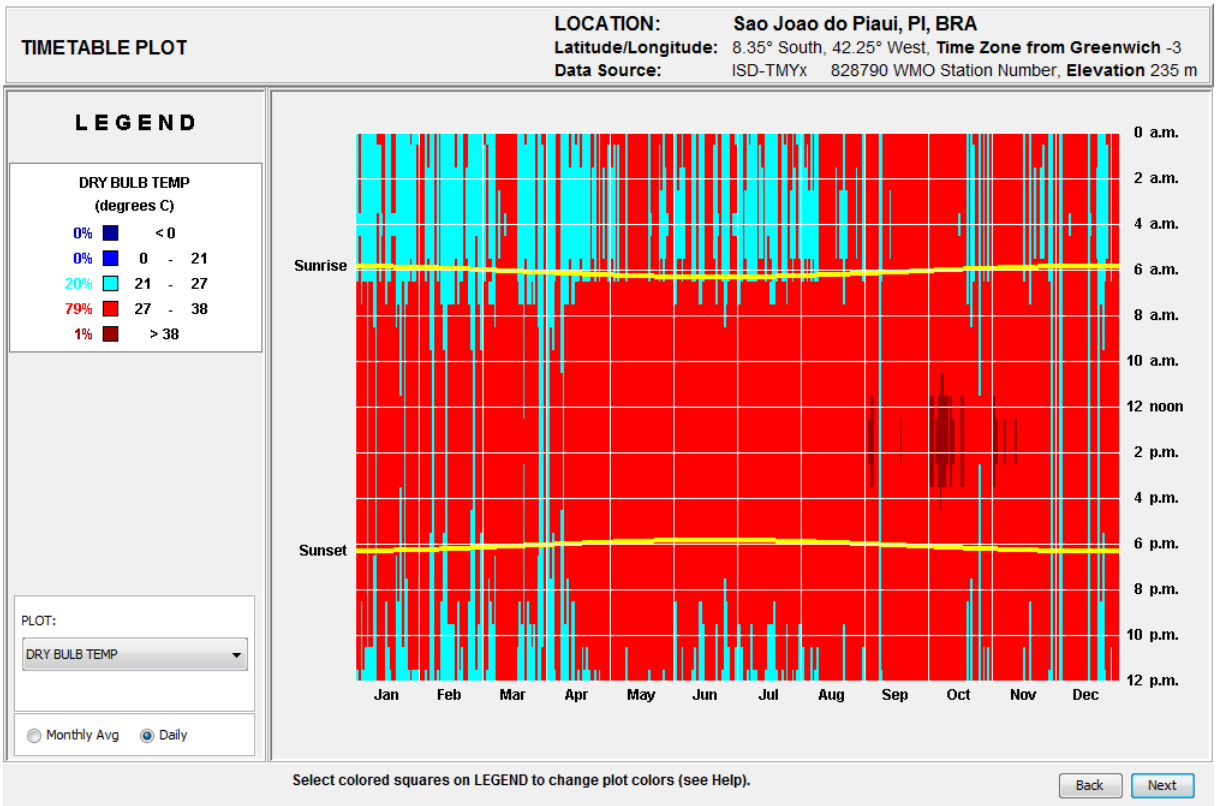
19f Natal-RN ZB8 G18



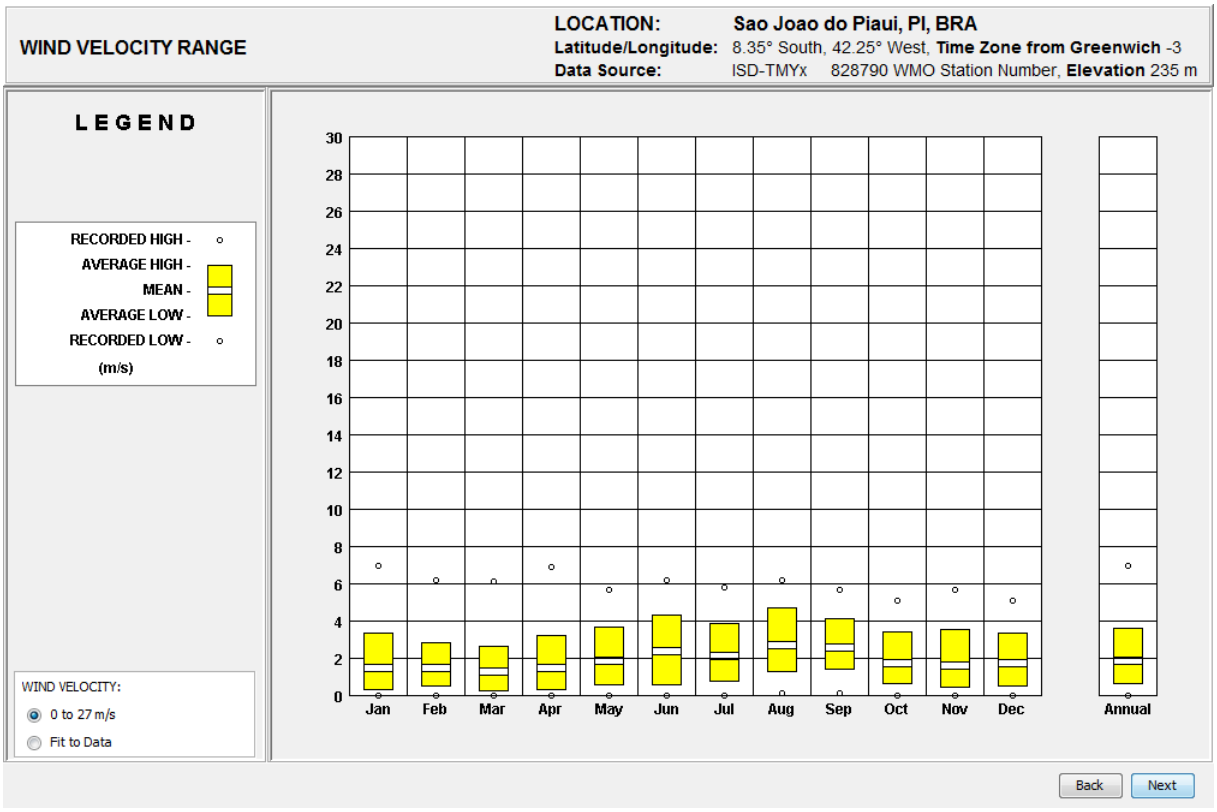
20a São João do Piauí-PI ZB7 G19



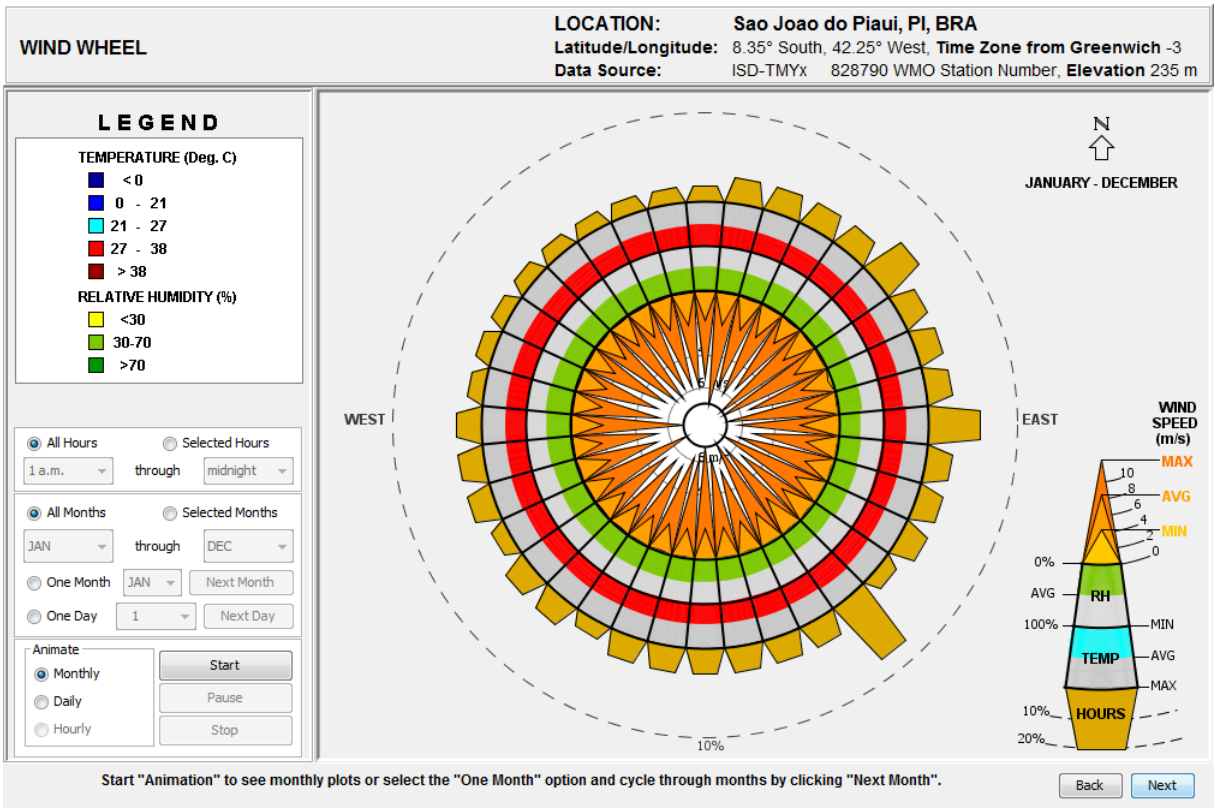
20b São João do Piauí-PI ZB7 G19



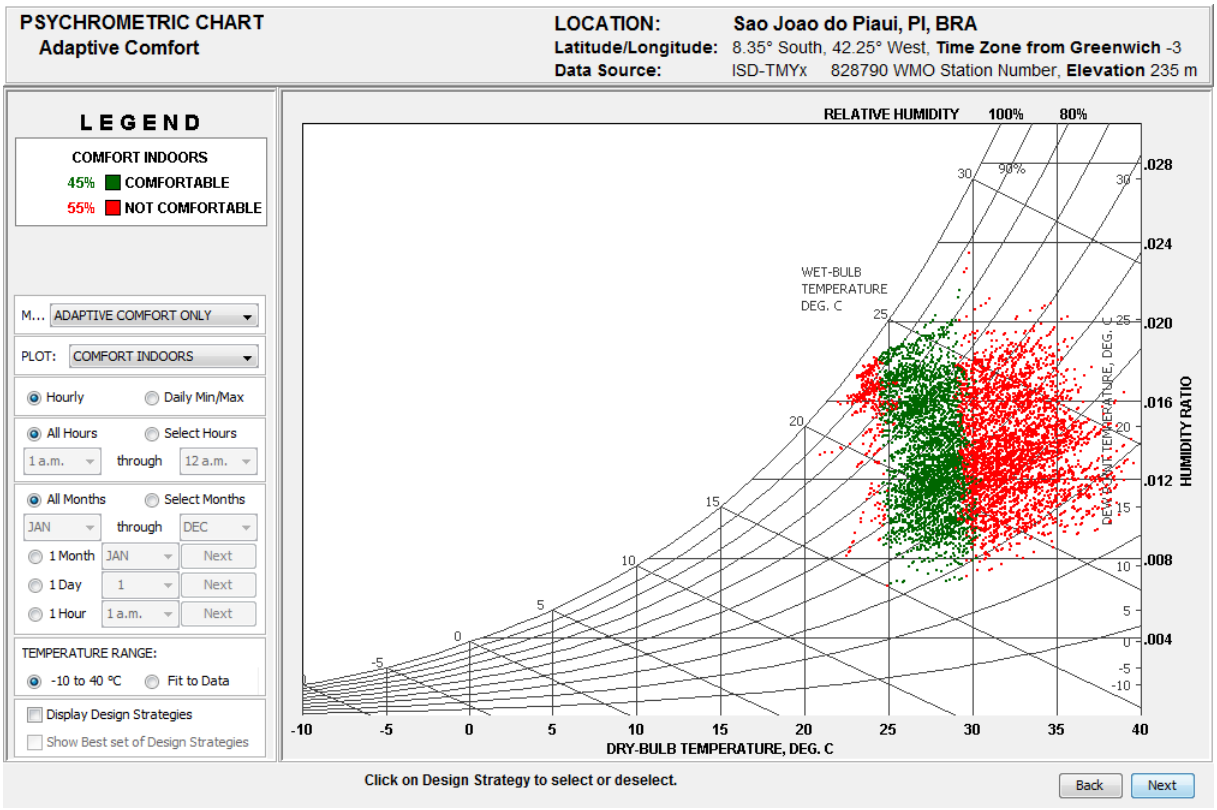
20c São João do Piauí-PI ZB7 G19



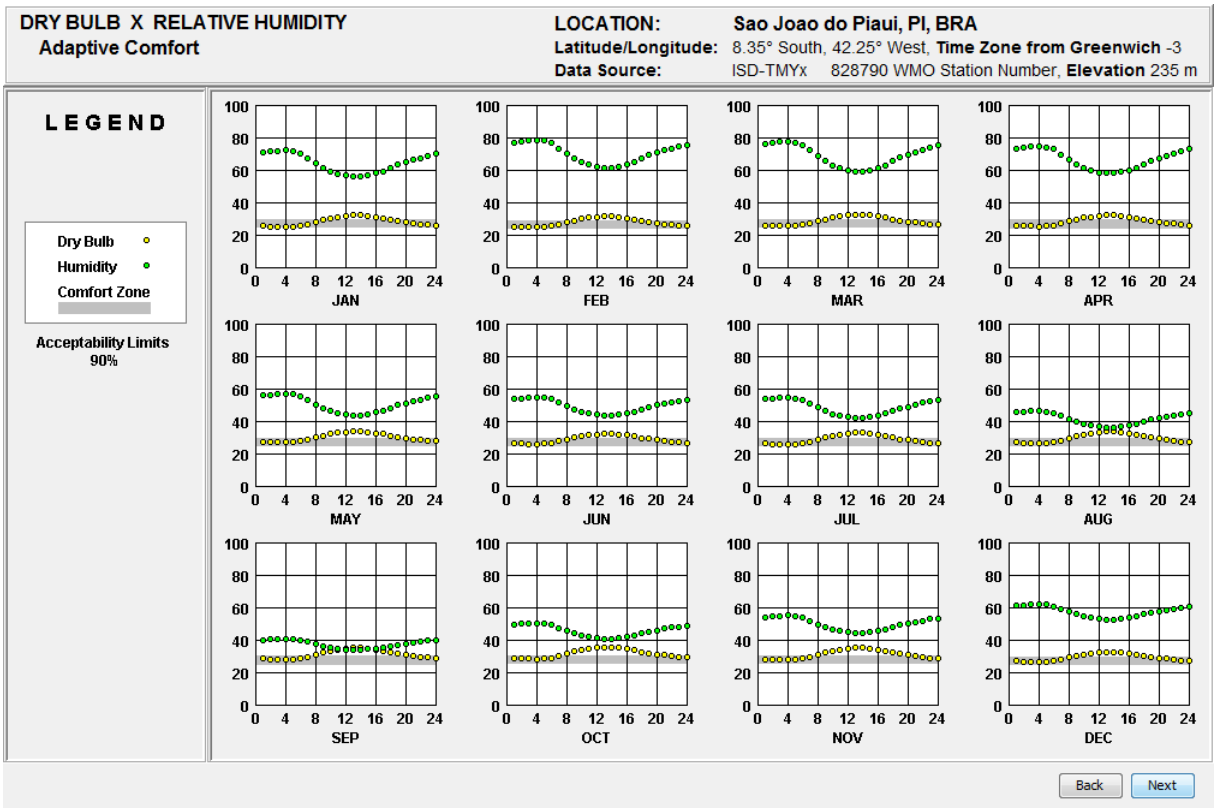
20d São João do Piauí-PI ZB7 G19



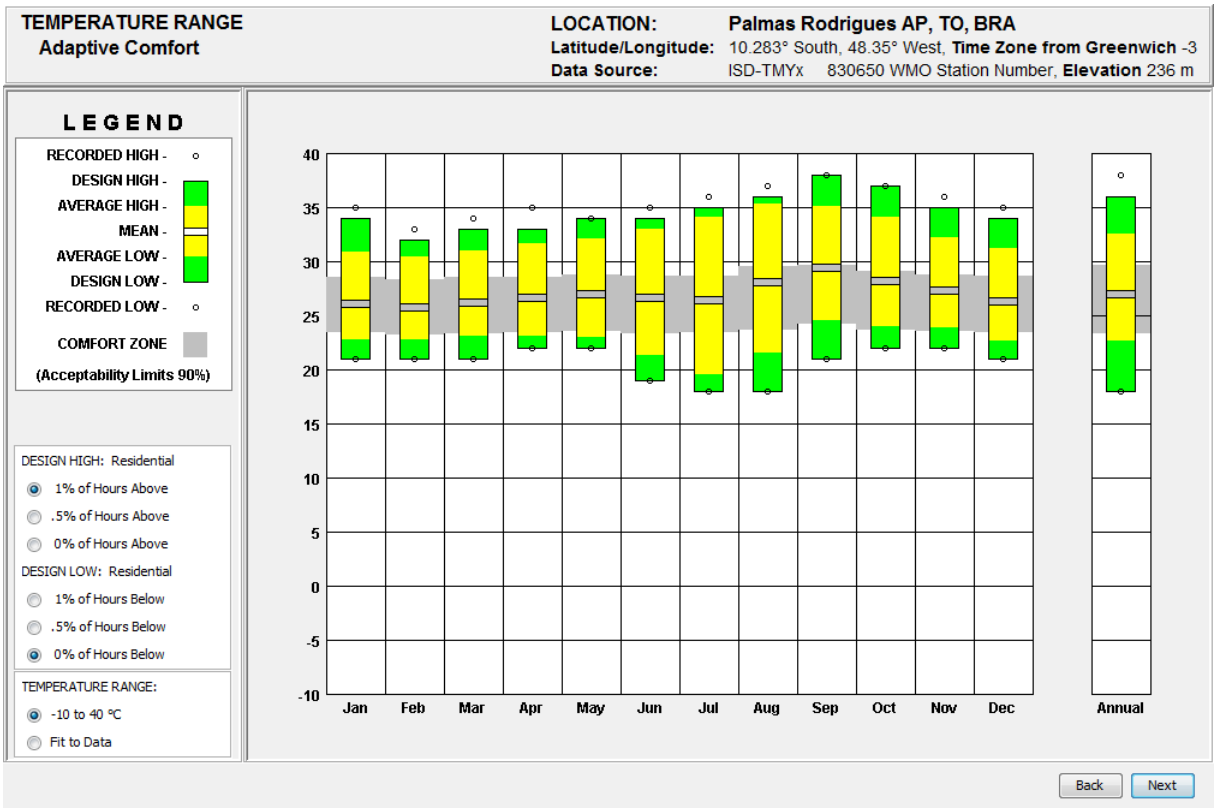
20e São João do Piauí-PI ZB7 G19



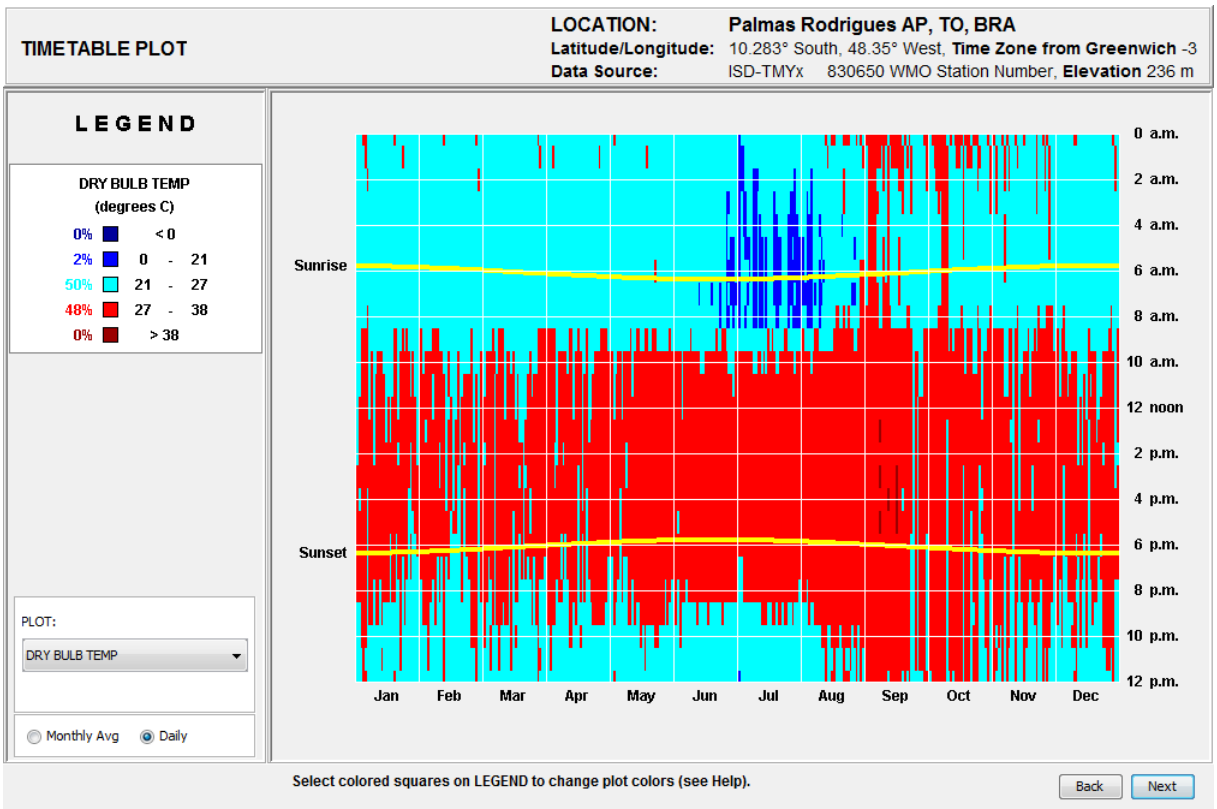
20f São João do Piauí-PI ZB7 G19



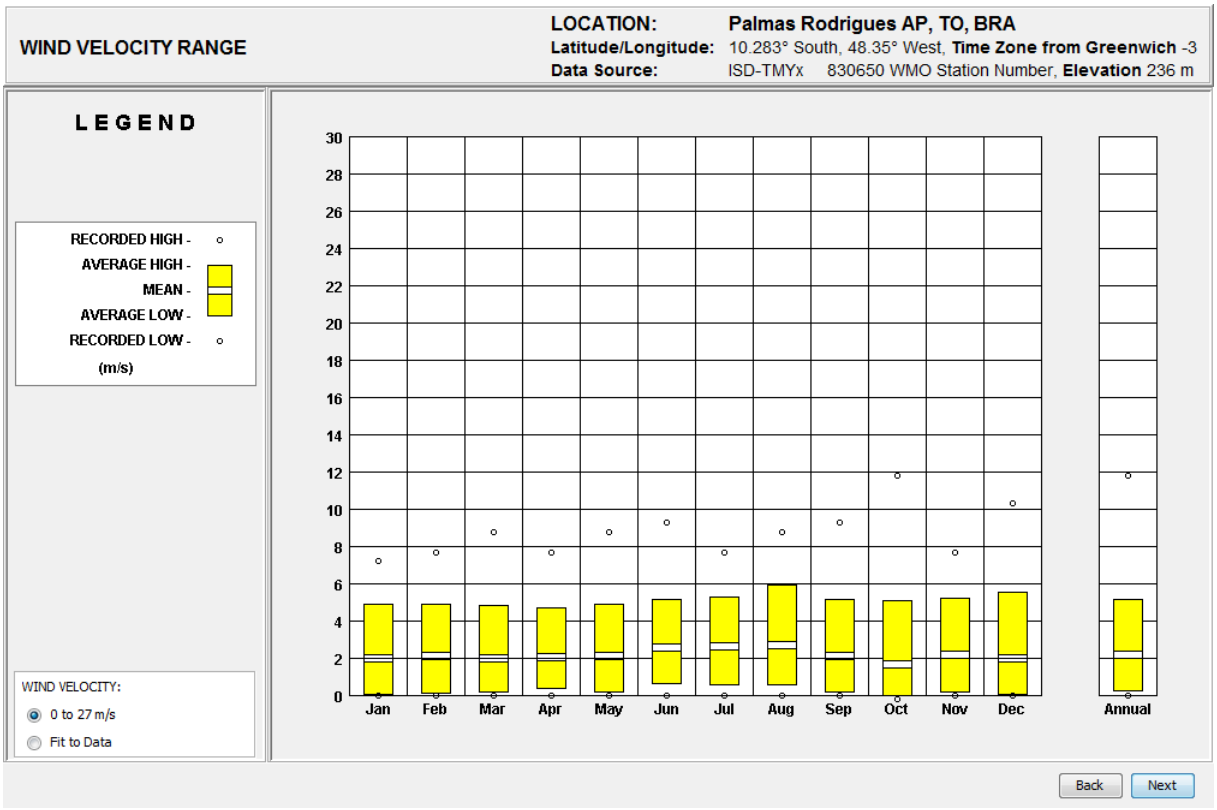
21a Palmas-TO ZB7 G20



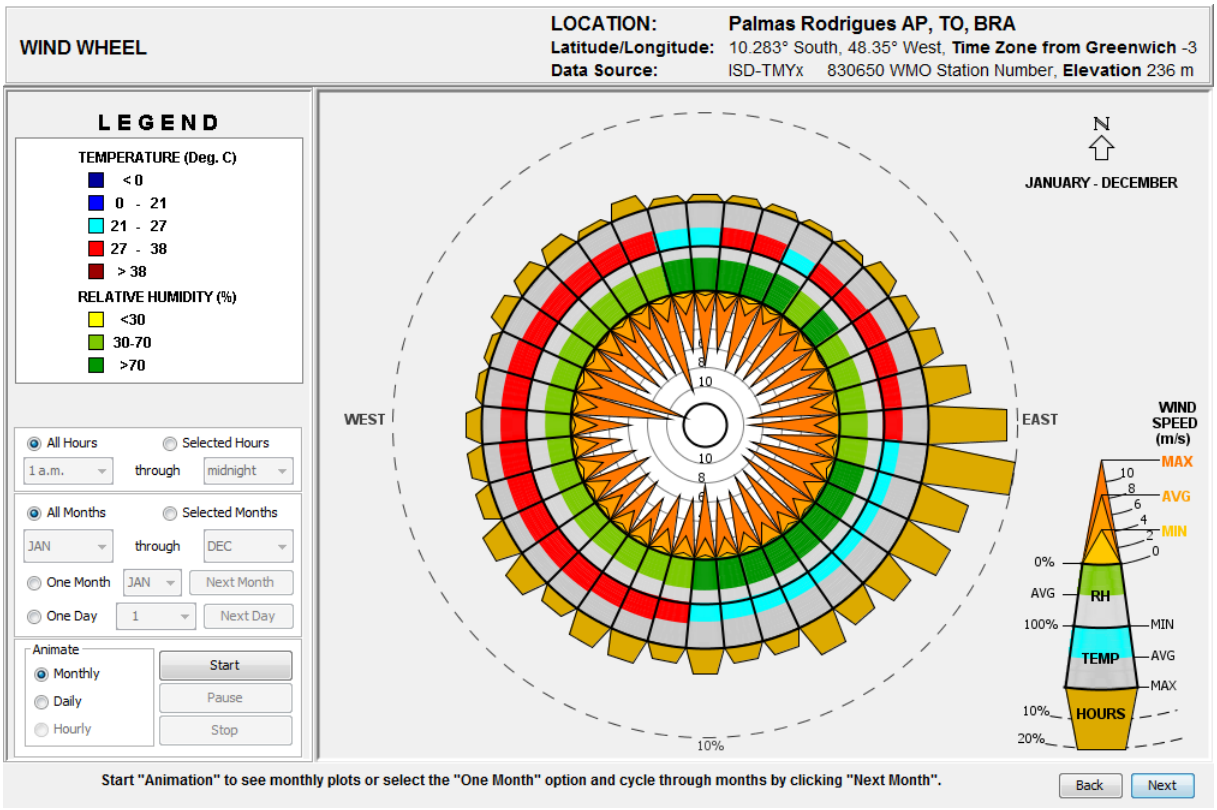
21b Palmas-TO ZB7 G20



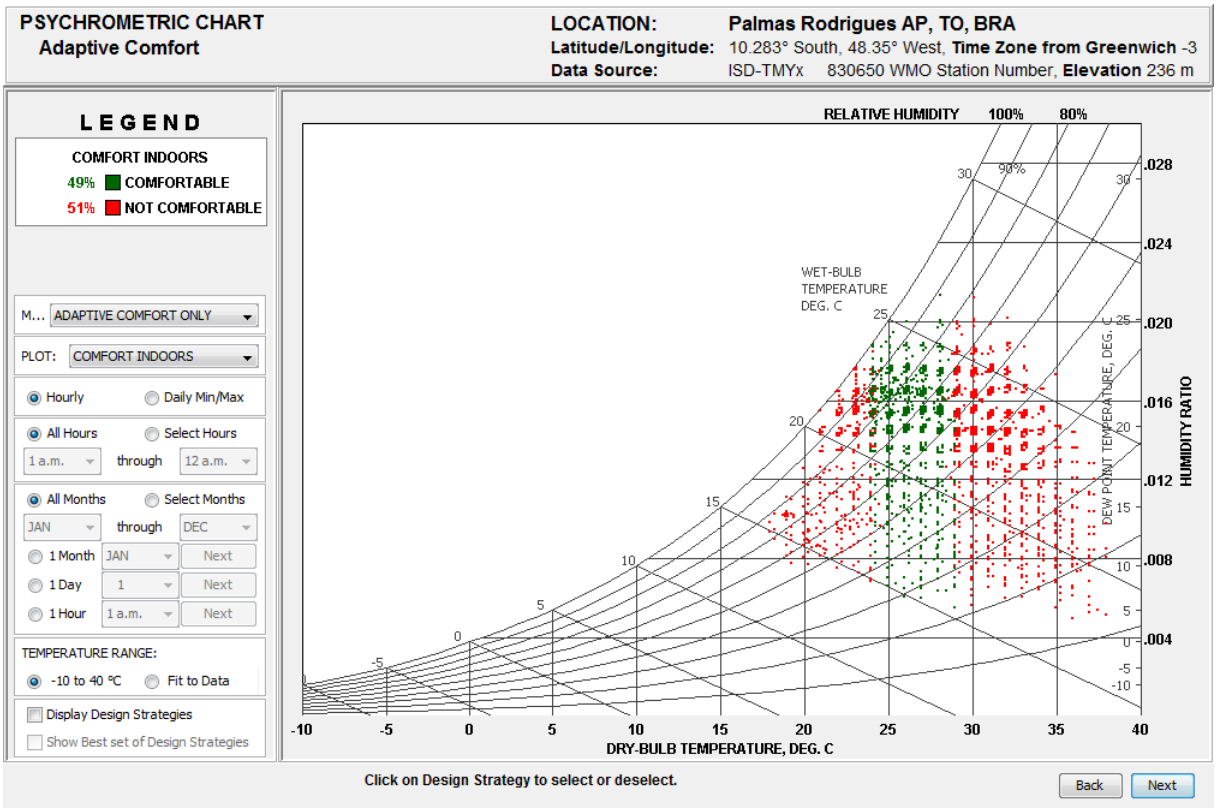
21c Palmas-TO ZB7 G20



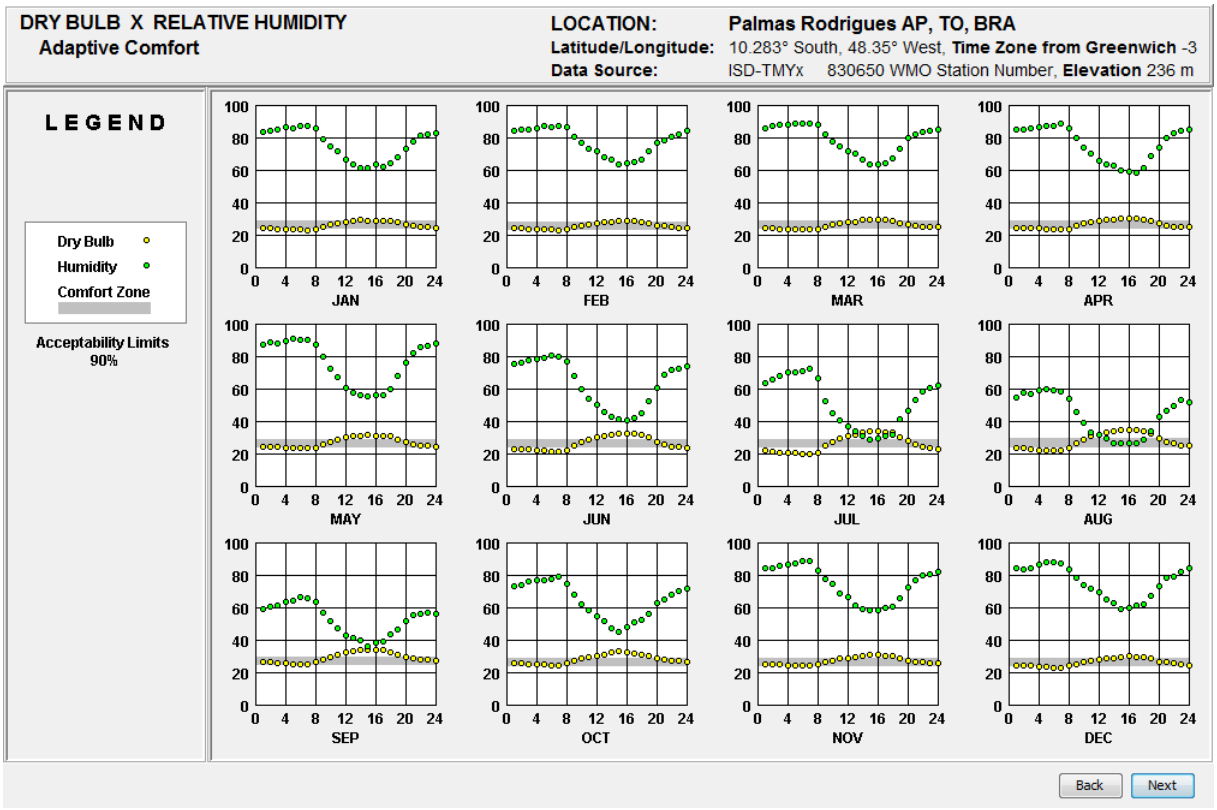
21d Palmas-TO ZB7 G20



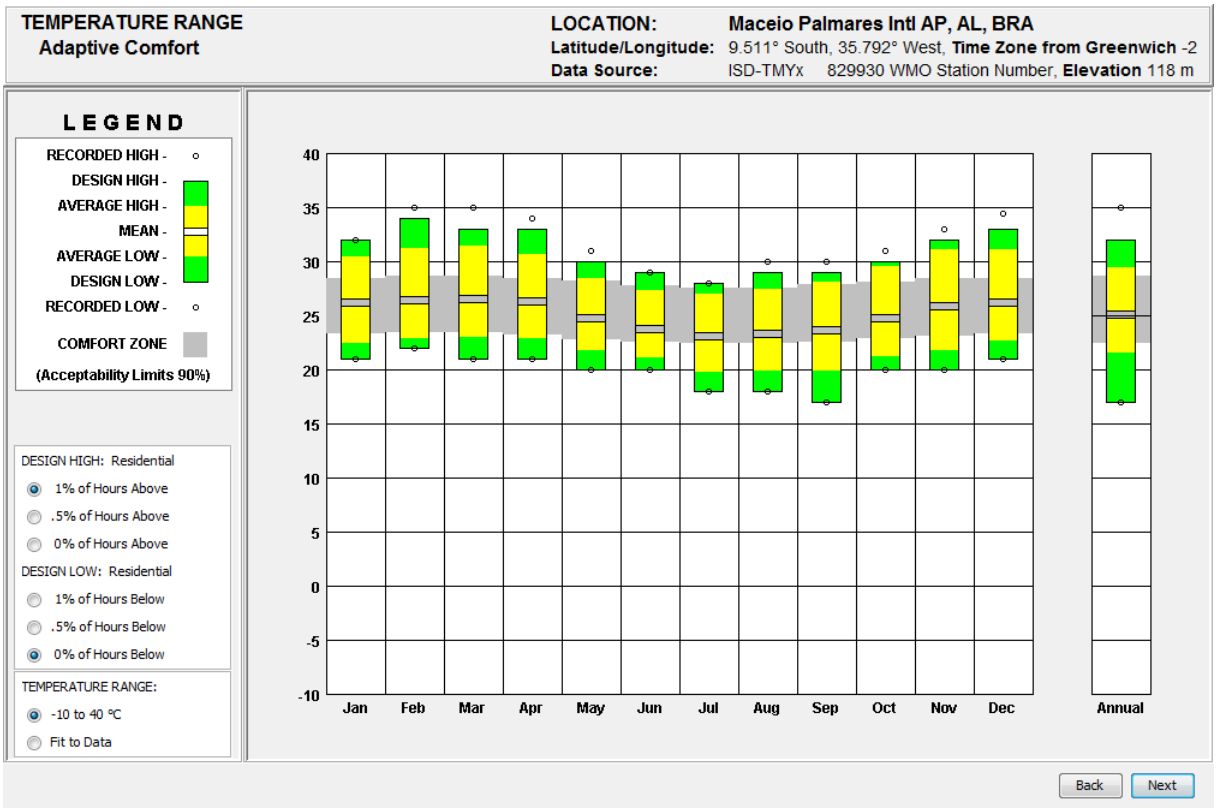
21e Palmas-TO ZB7 G20



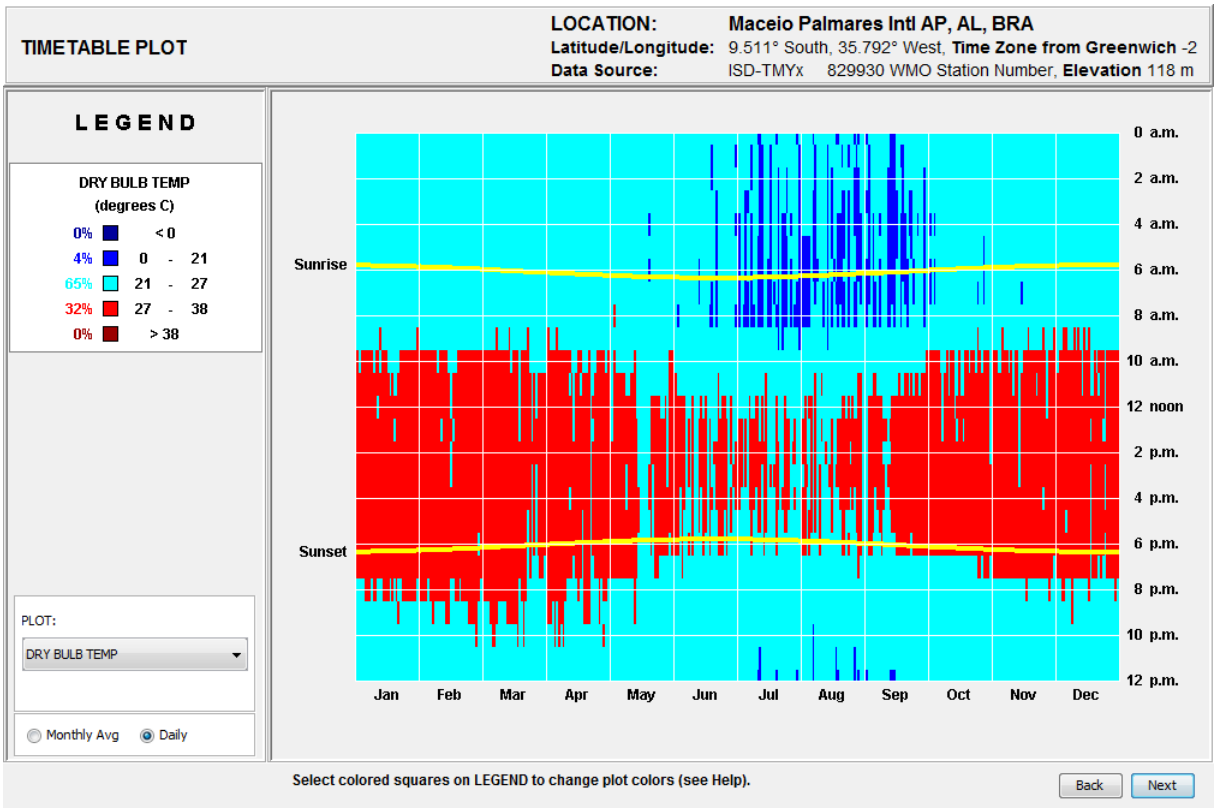
21f Palmas-TO ZB7 G20



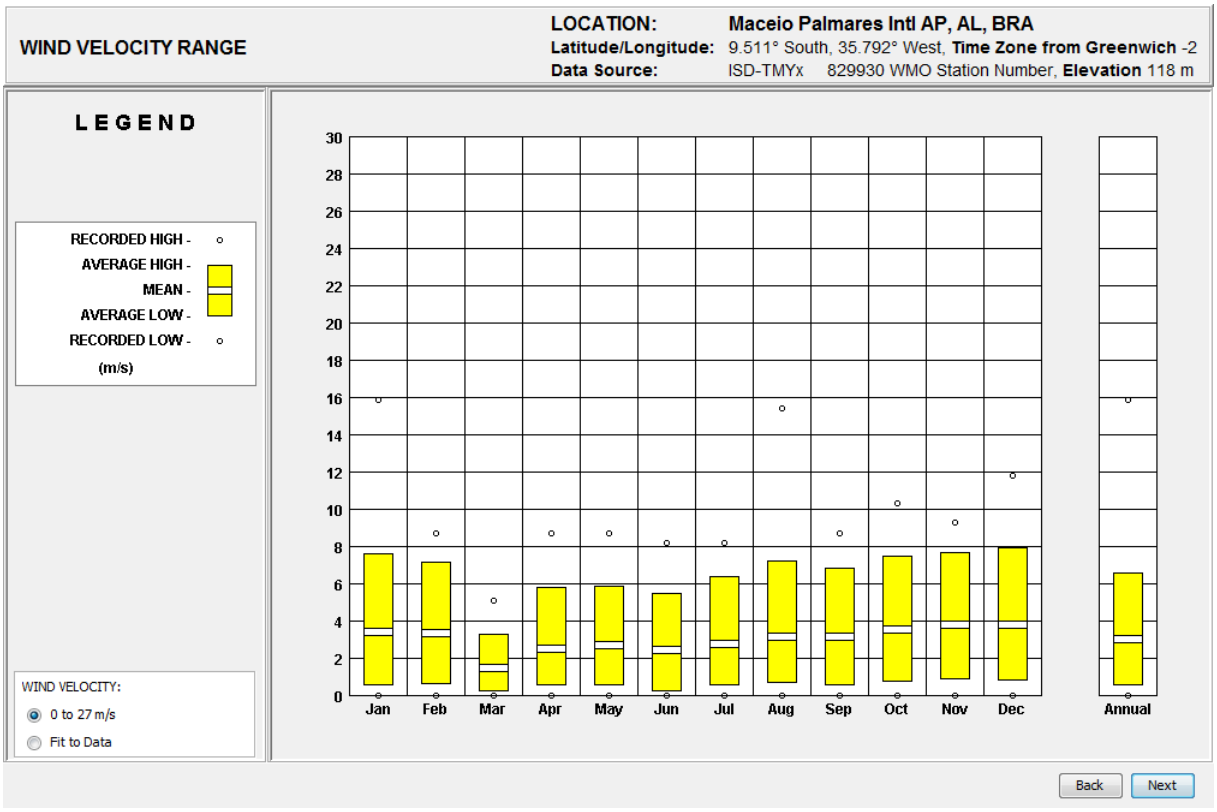
22a Maceió-AL ZB8 G21



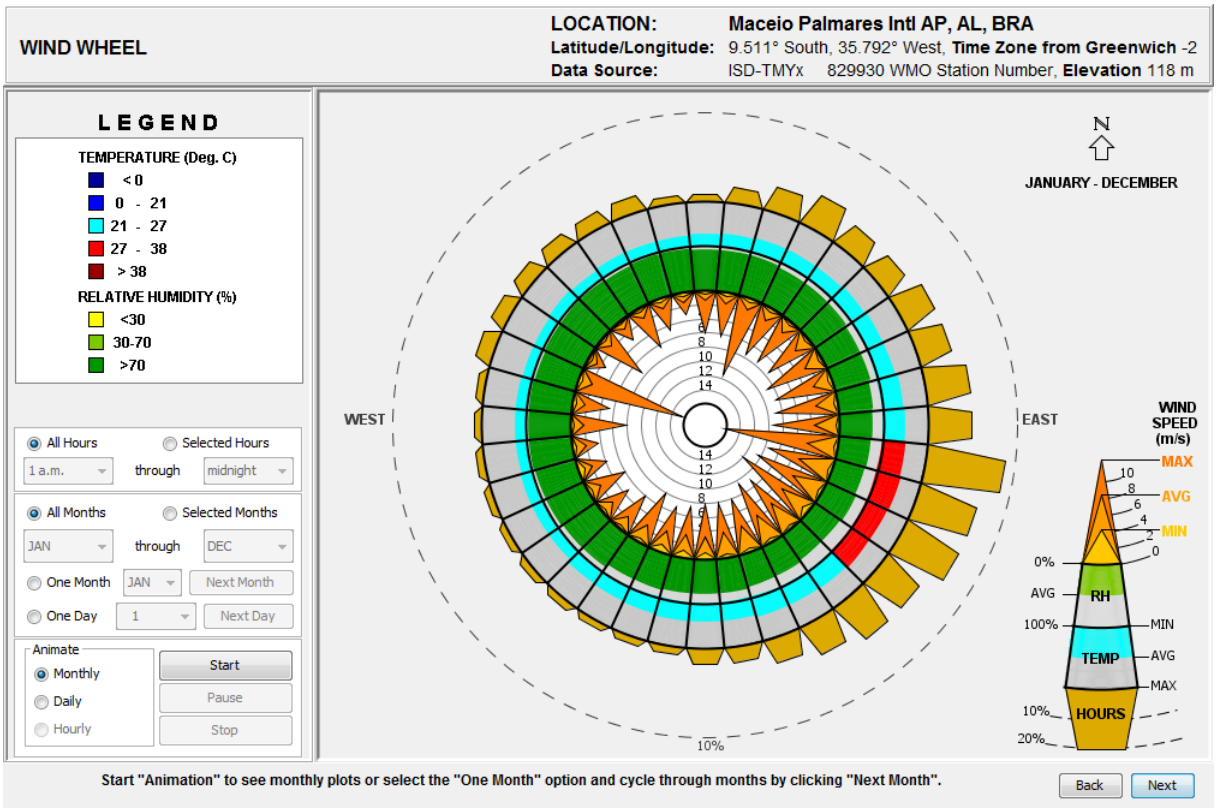
22b Maceió-AL ZB8 G21



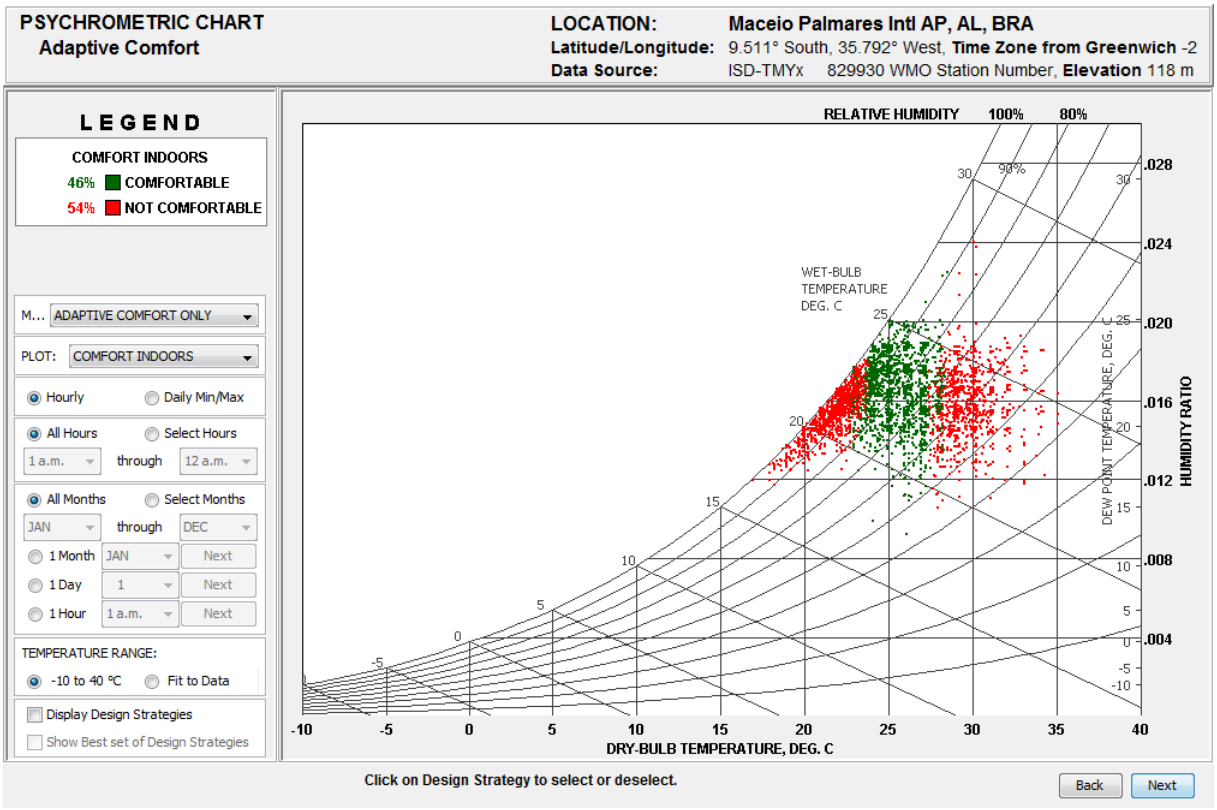
22c Maceió-AL ZB8 G21



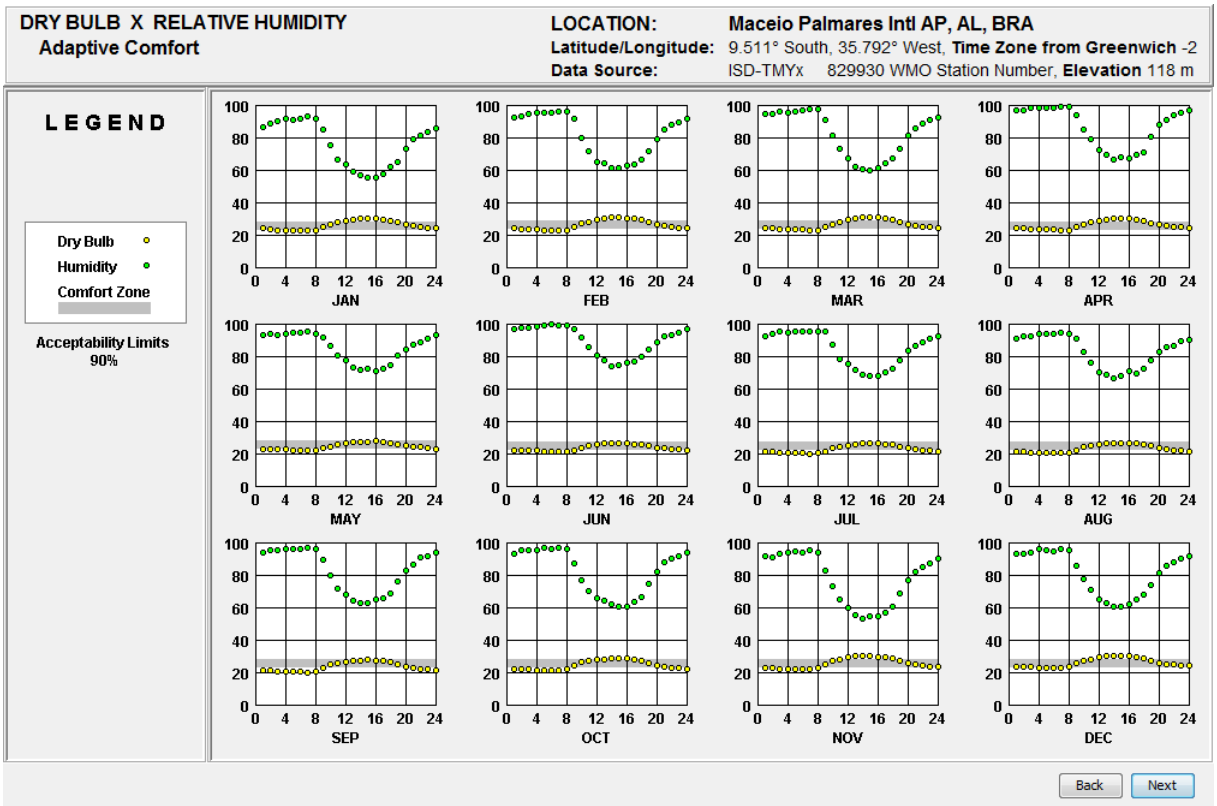
22d Maceió-AL ZB8 G21



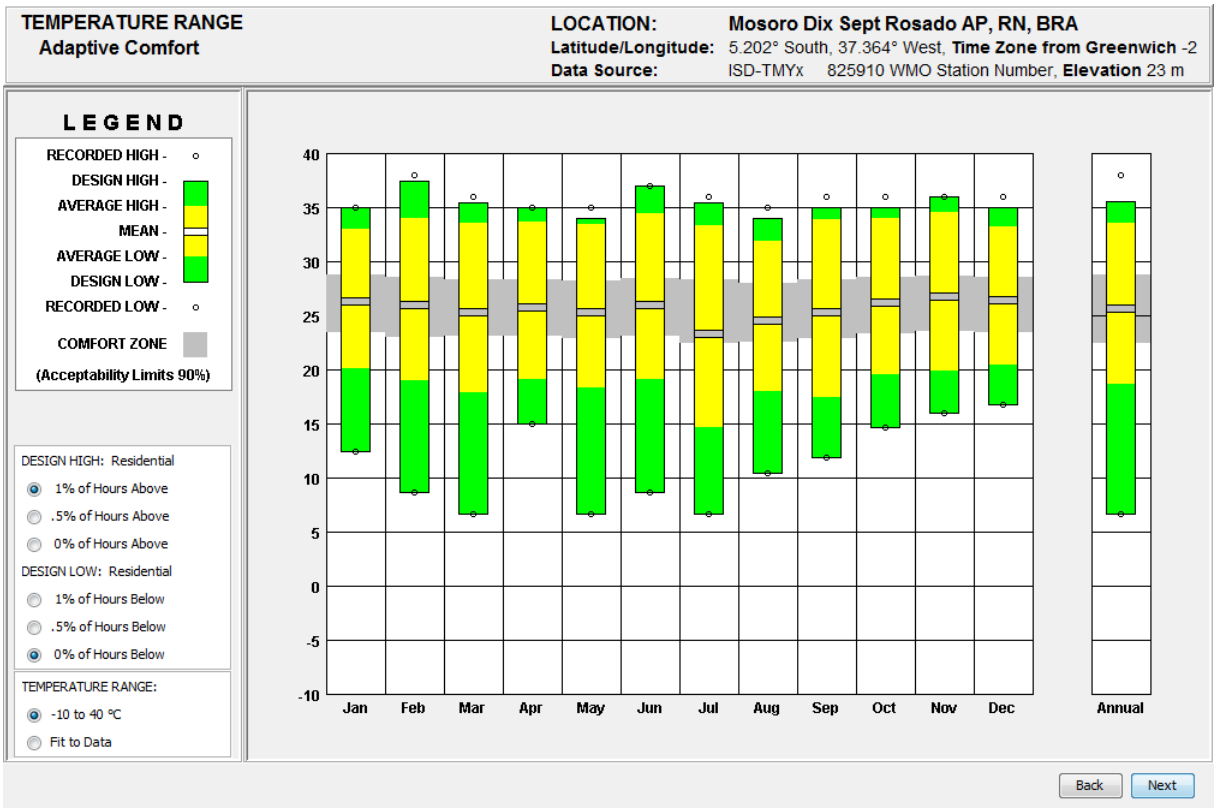
22e Maceió-AL ZB8 G21



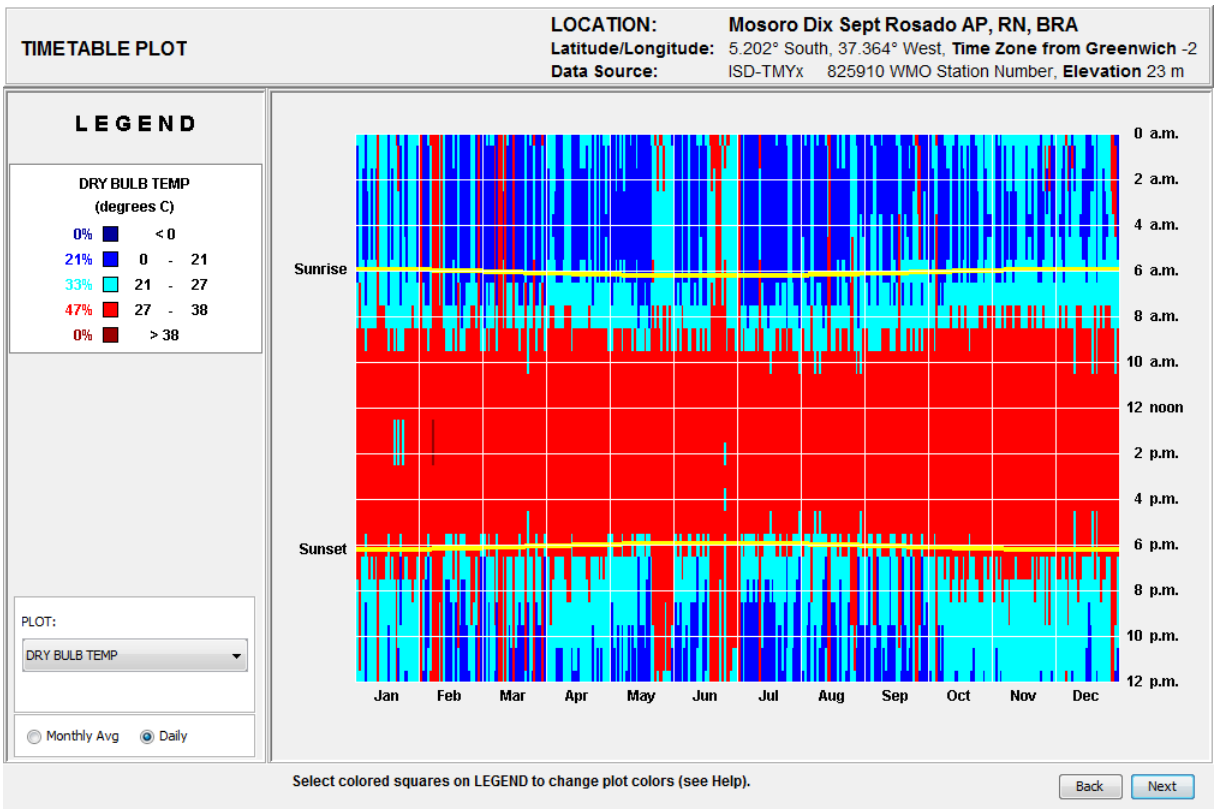
22f Maceió-AL ZB8 G21



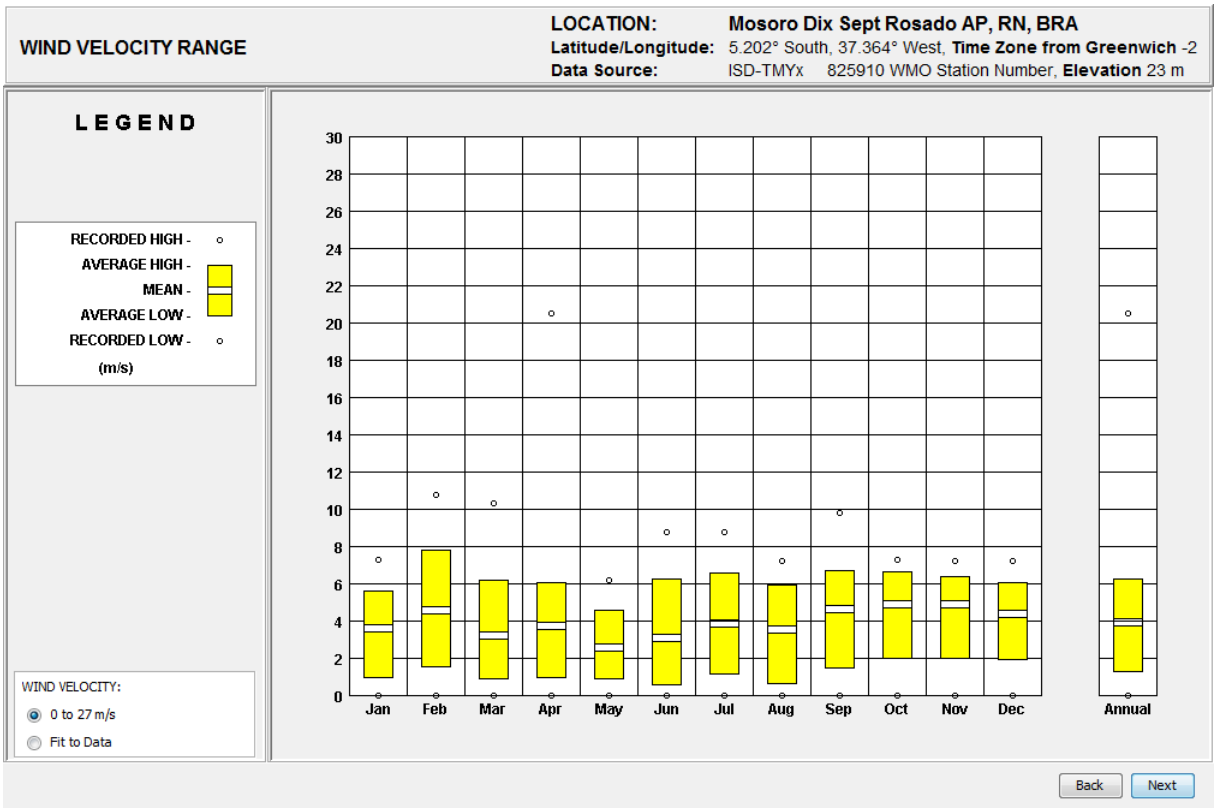
23a Mossoró-RN ZB7 G22



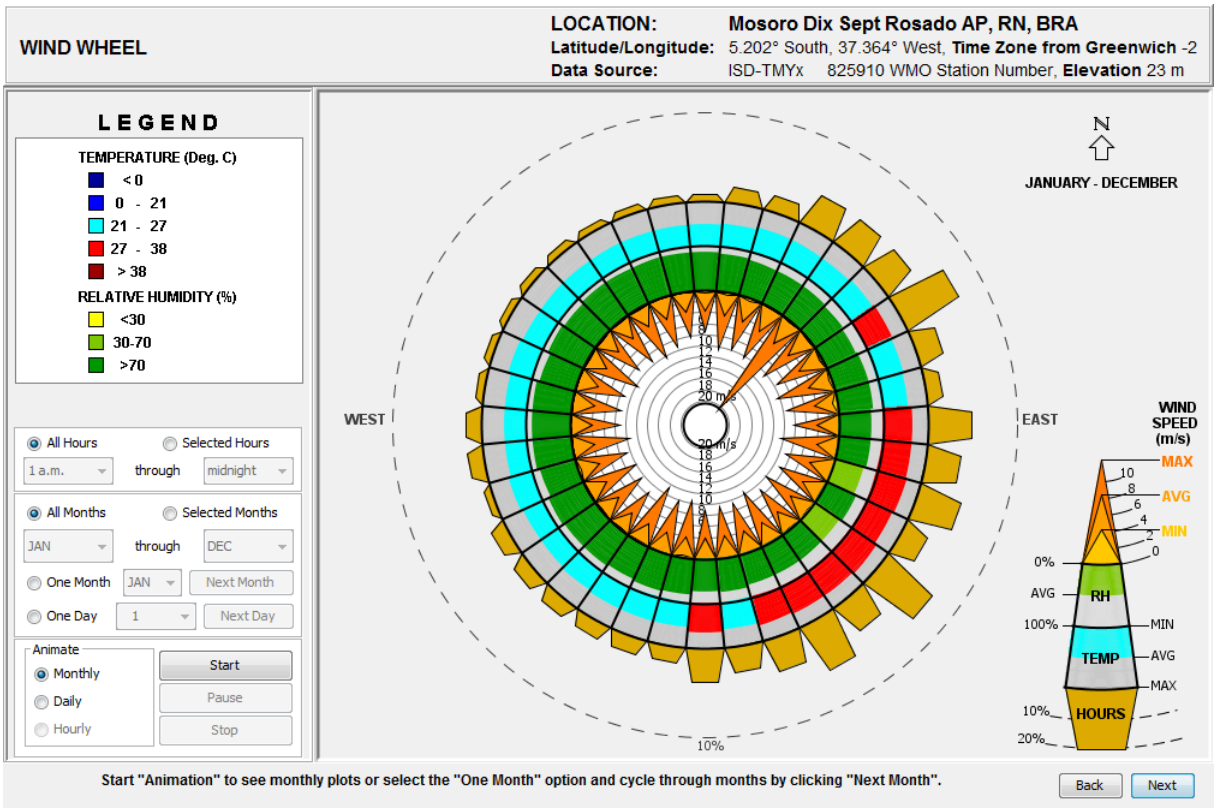
23b Mossoró-RN ZB7 G22



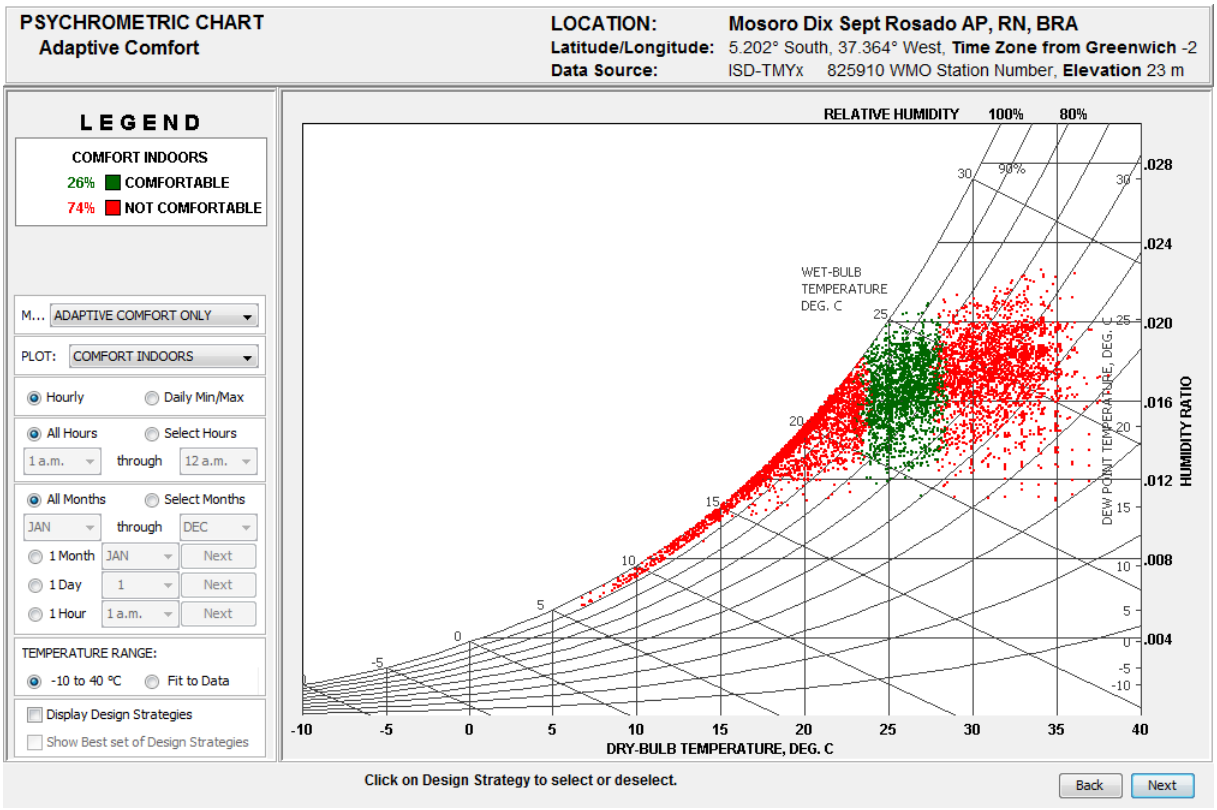
23c Mossoró-RN ZB7 G22



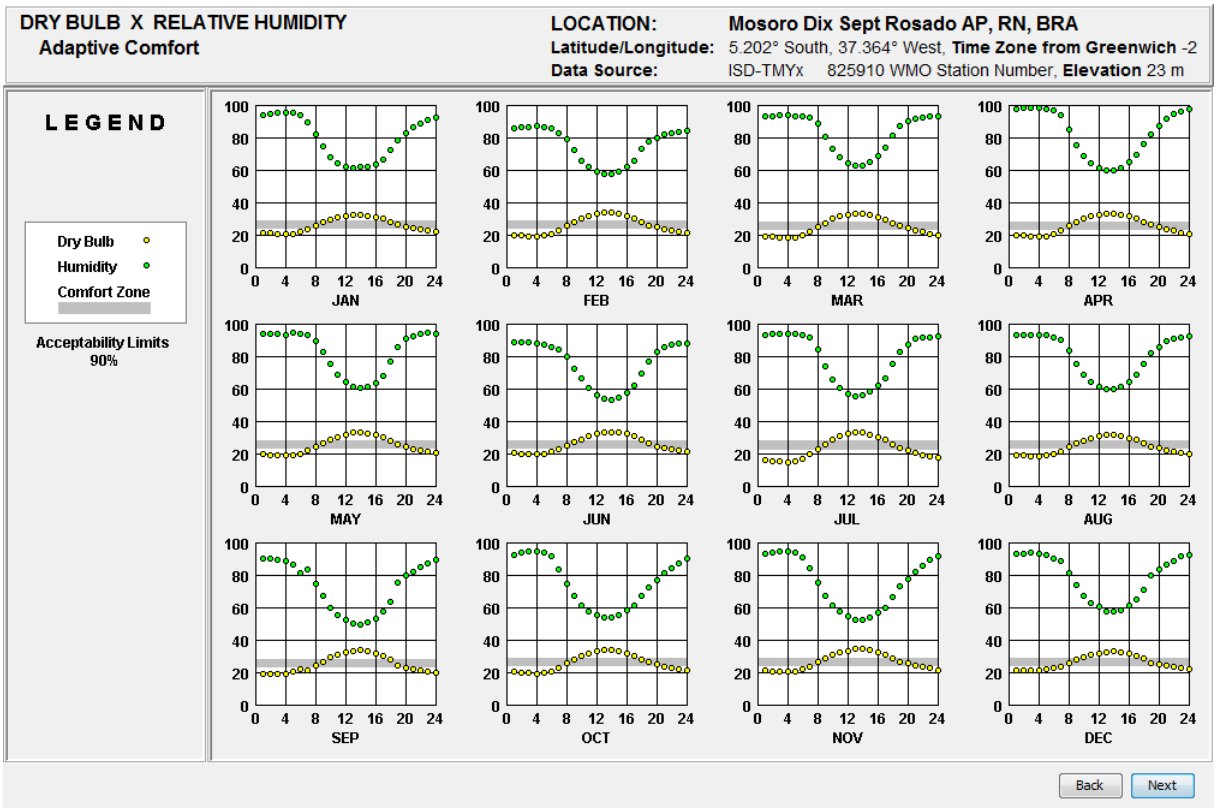
23d Mossoró-RN ZB7 G22



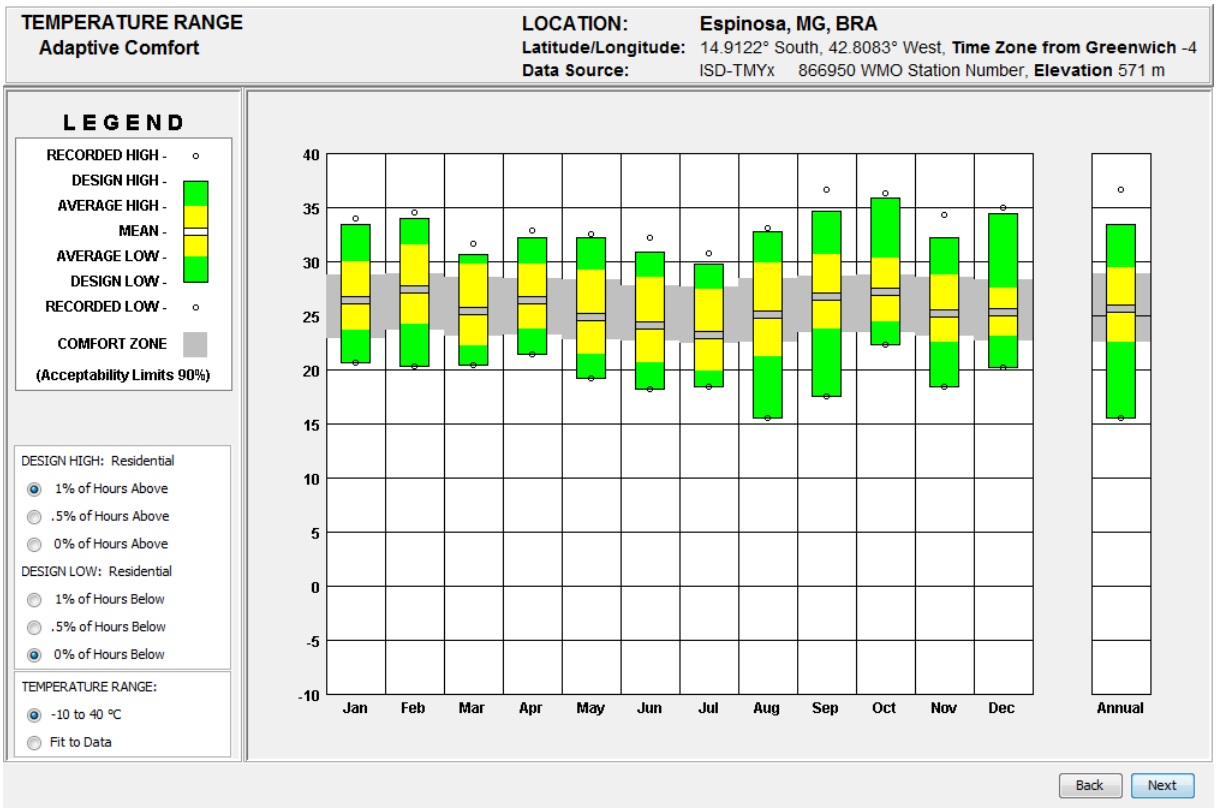
23e Mossoró-RN ZB7 G22



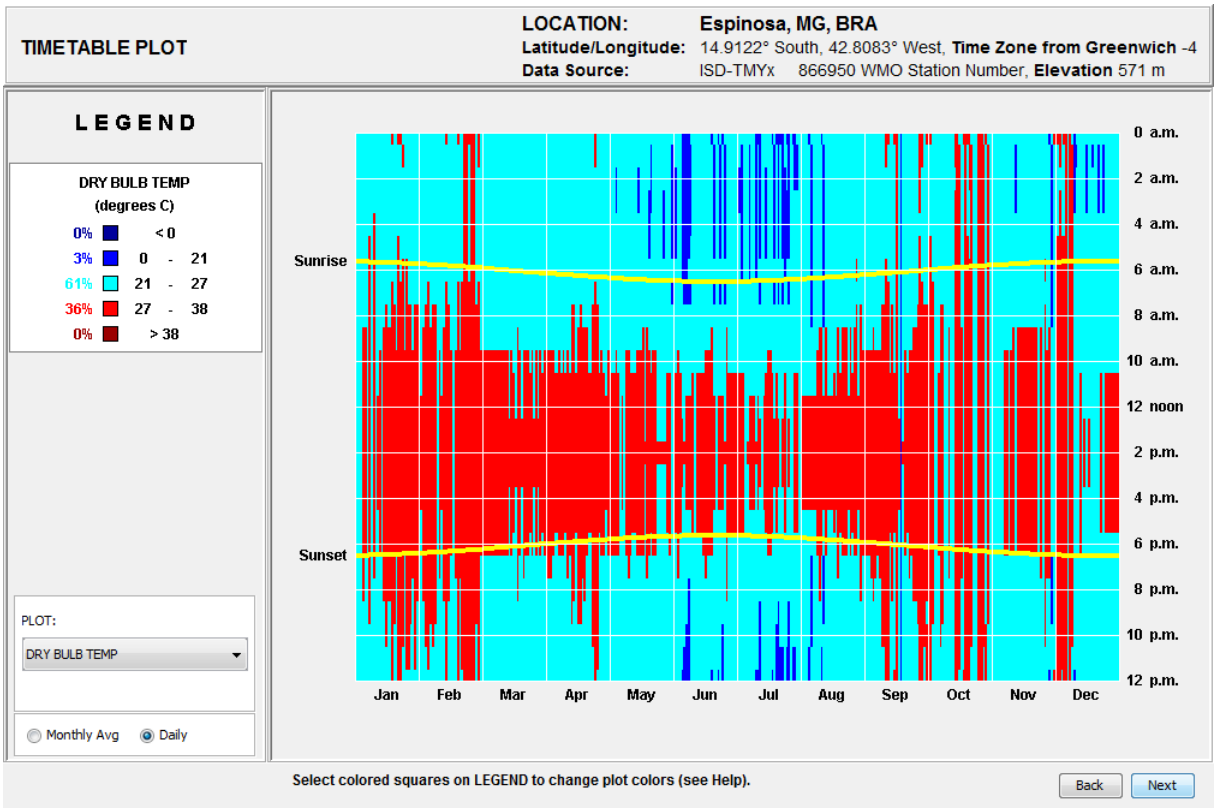
23f Mossoró-RN ZB7 G22



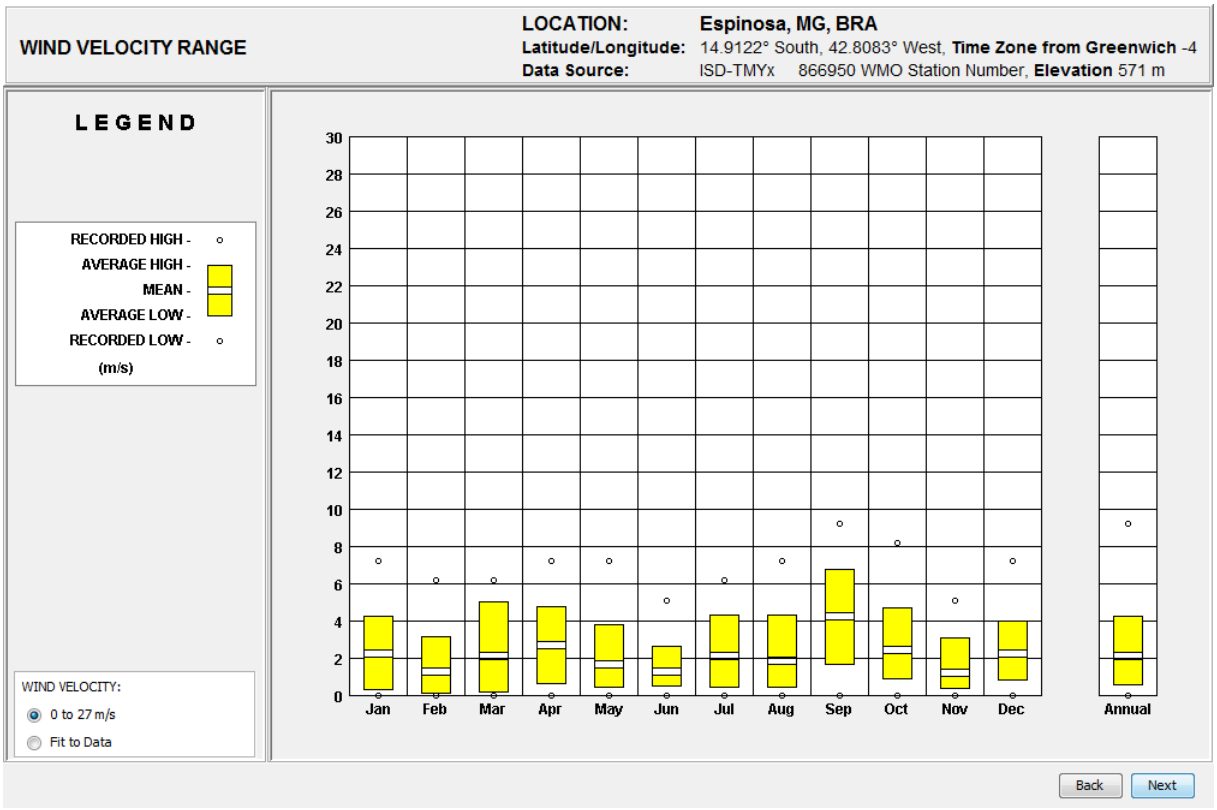
24a Espinosa-MG ZB6 G23



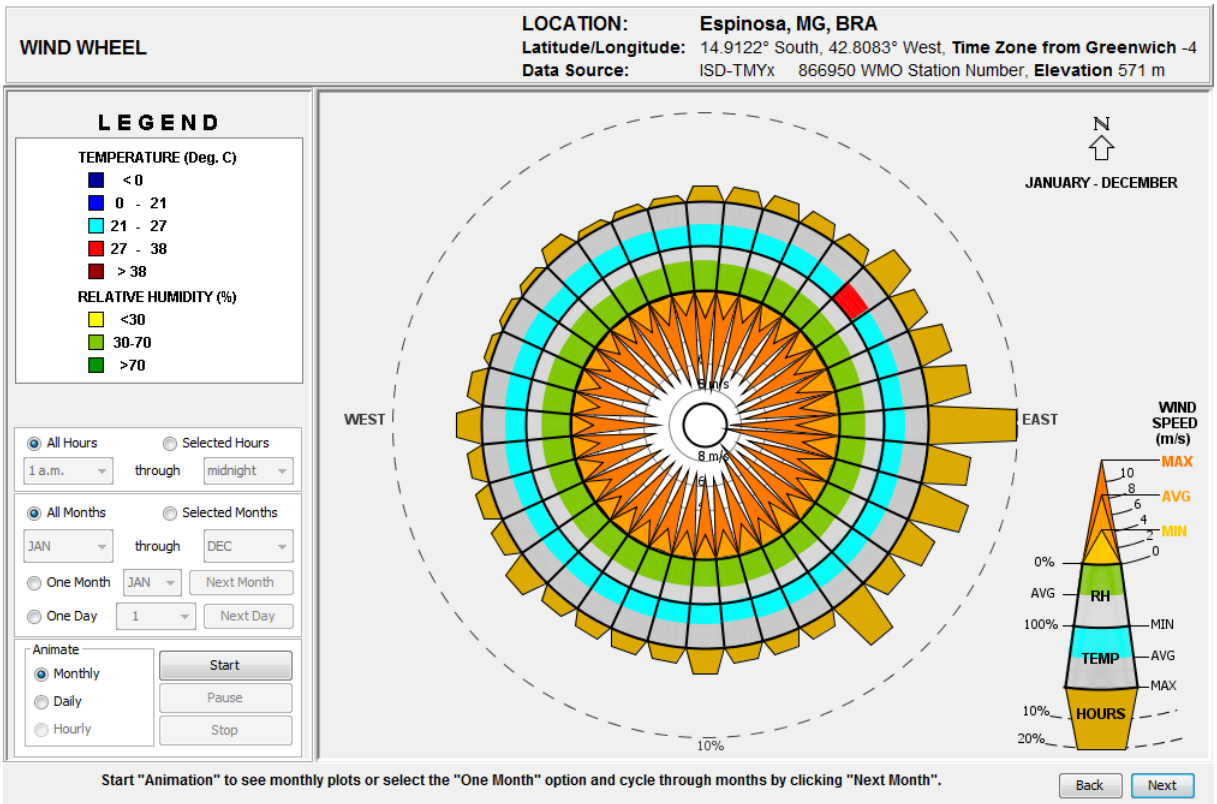
24b Espinosa-MG ZB6 G23



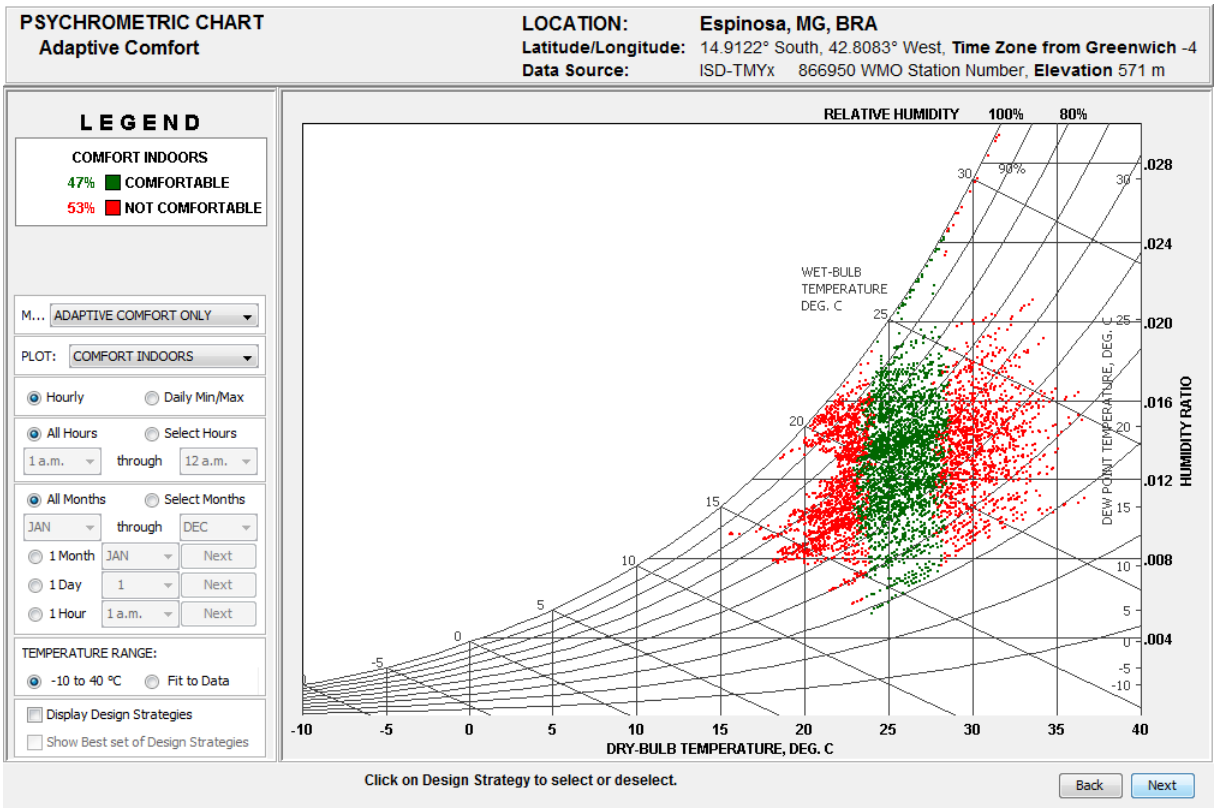
24c Espinosa-MG ZB6 G23



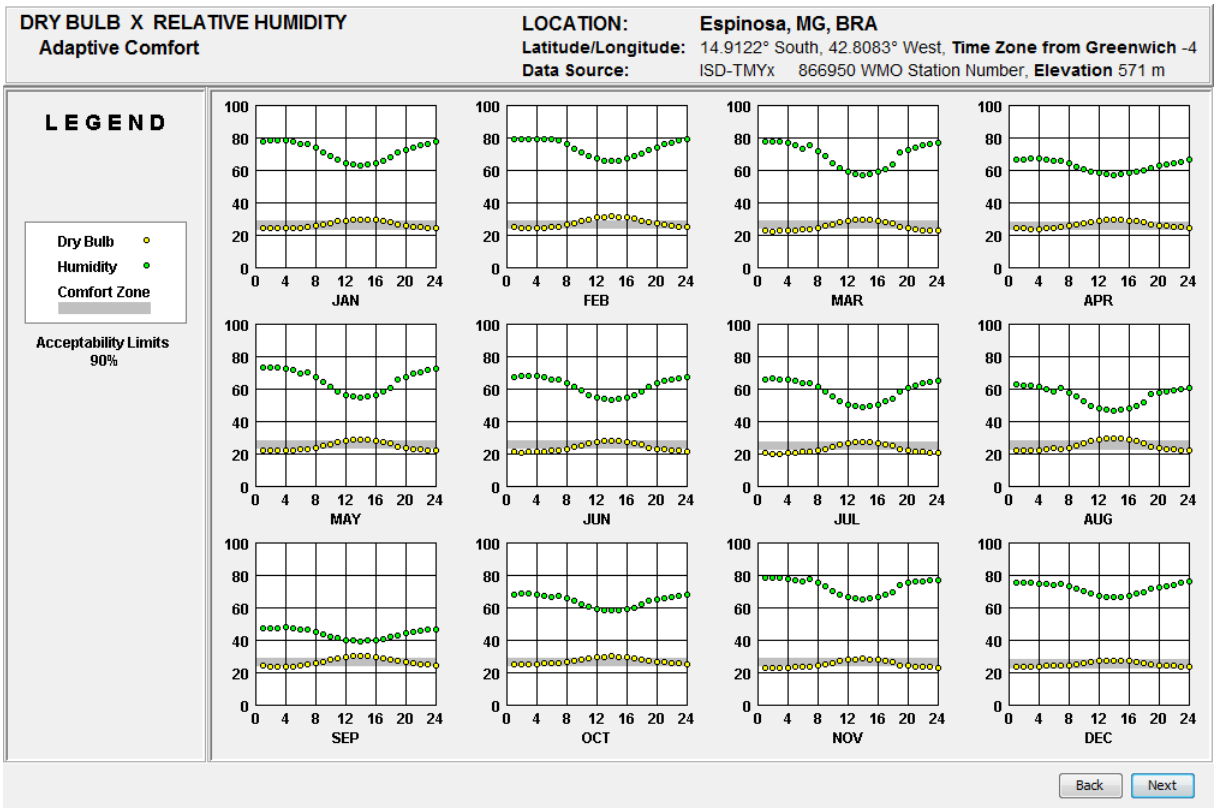
24d Espinosa-MG ZB6 G23



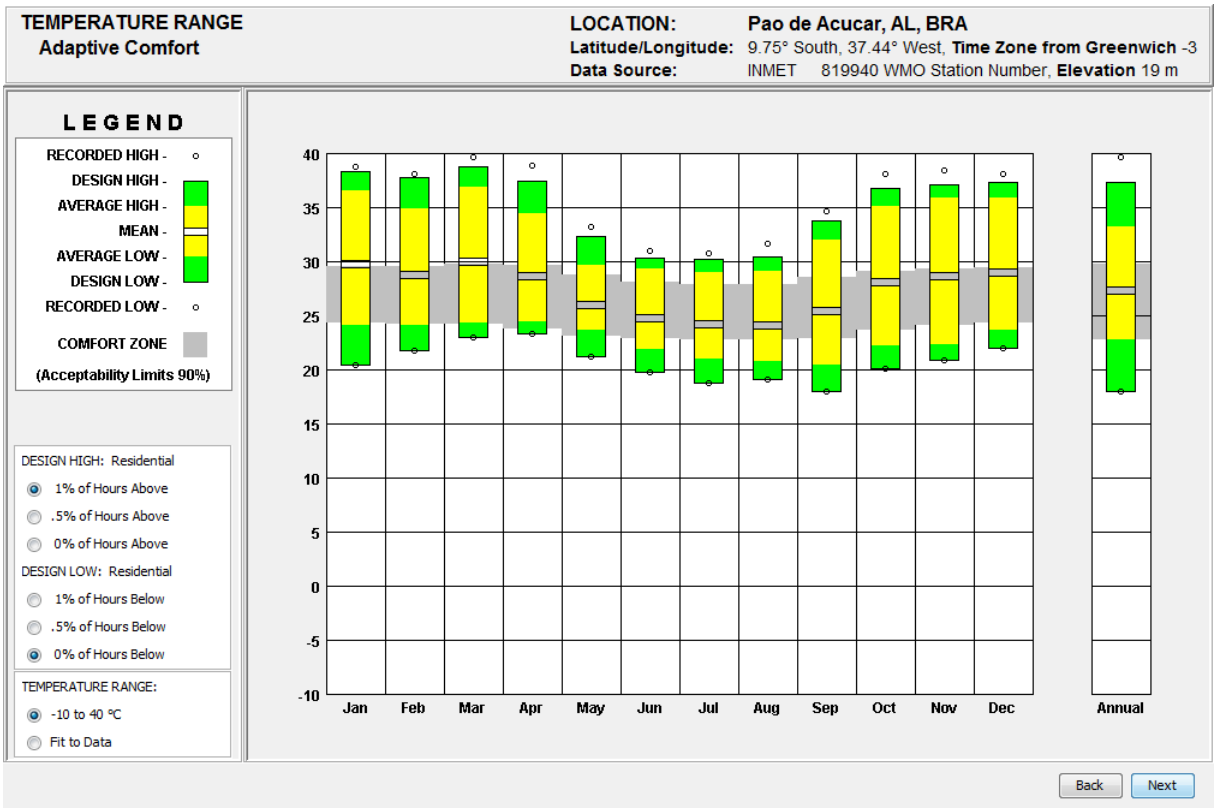
24e Espinosa-MG ZB6 G23



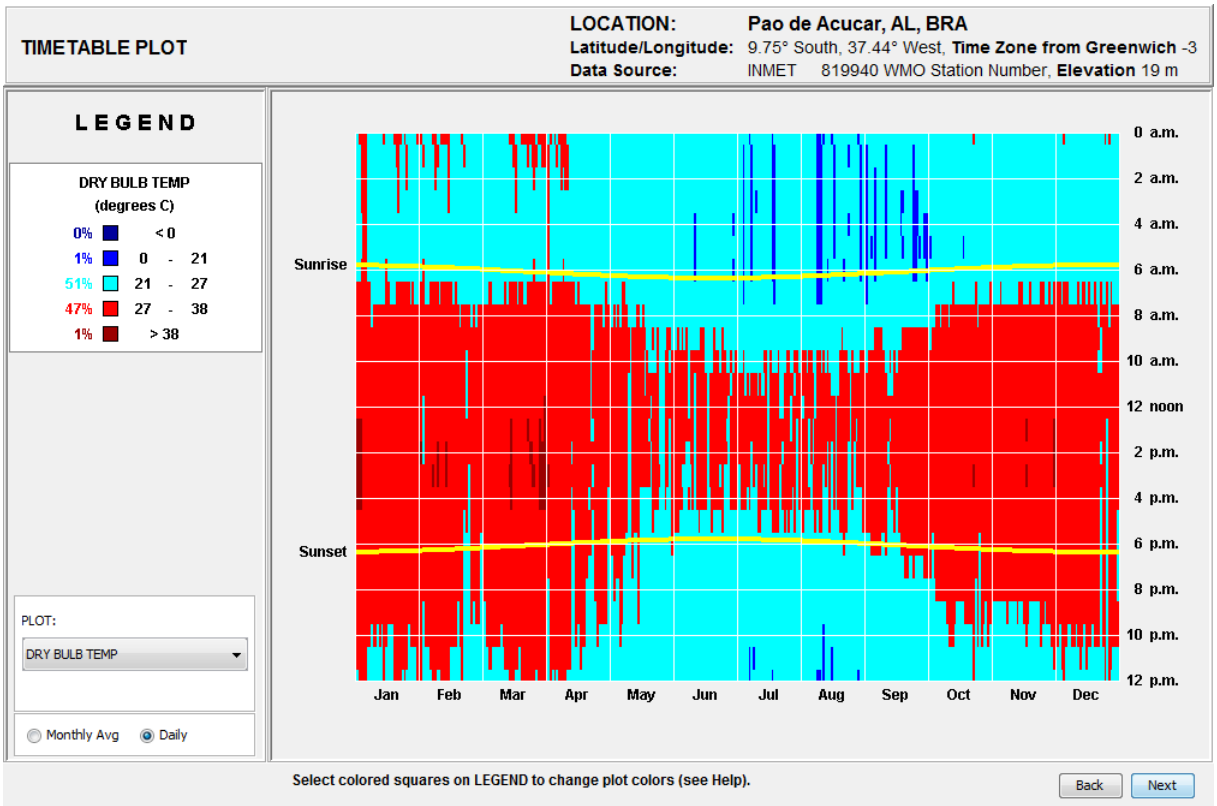
24f Espinosa-MG ZB6 G23



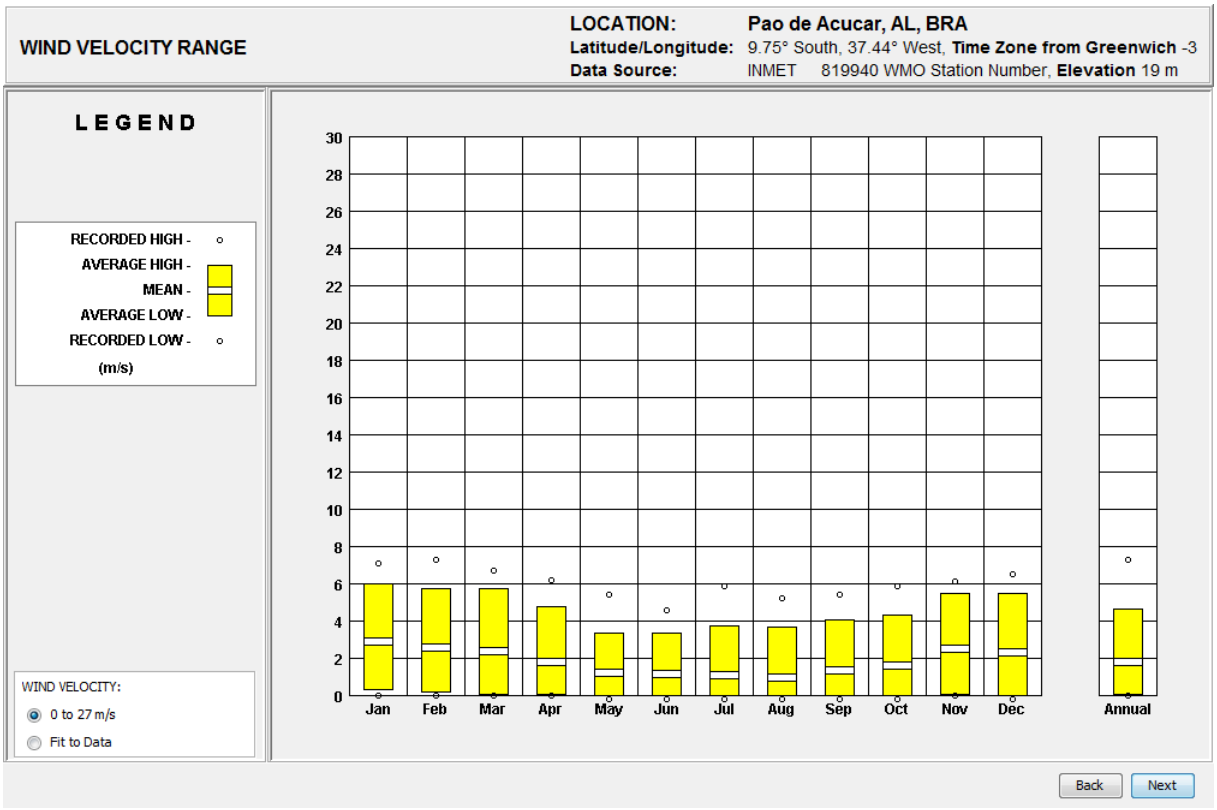
25a Pão de Açúcar-AL ZB8 G24



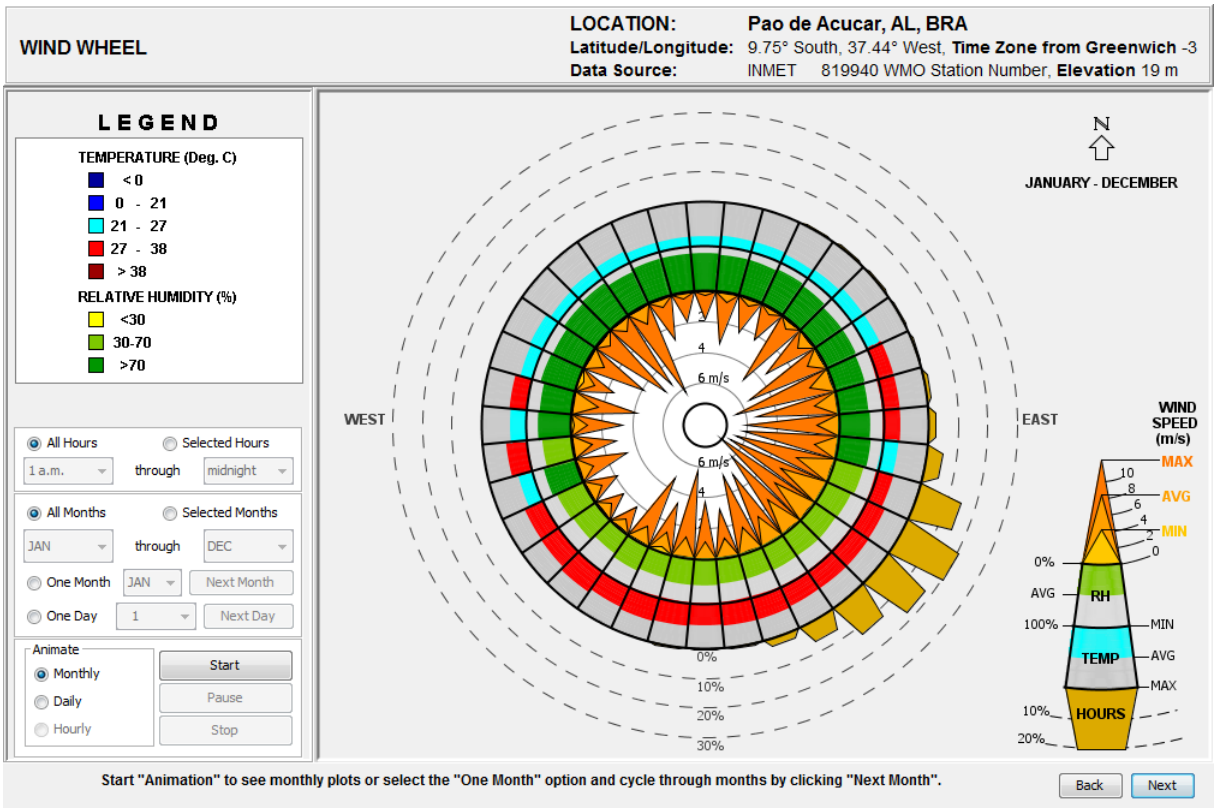
25b Pão de Açúcar-AL ZB8 G24



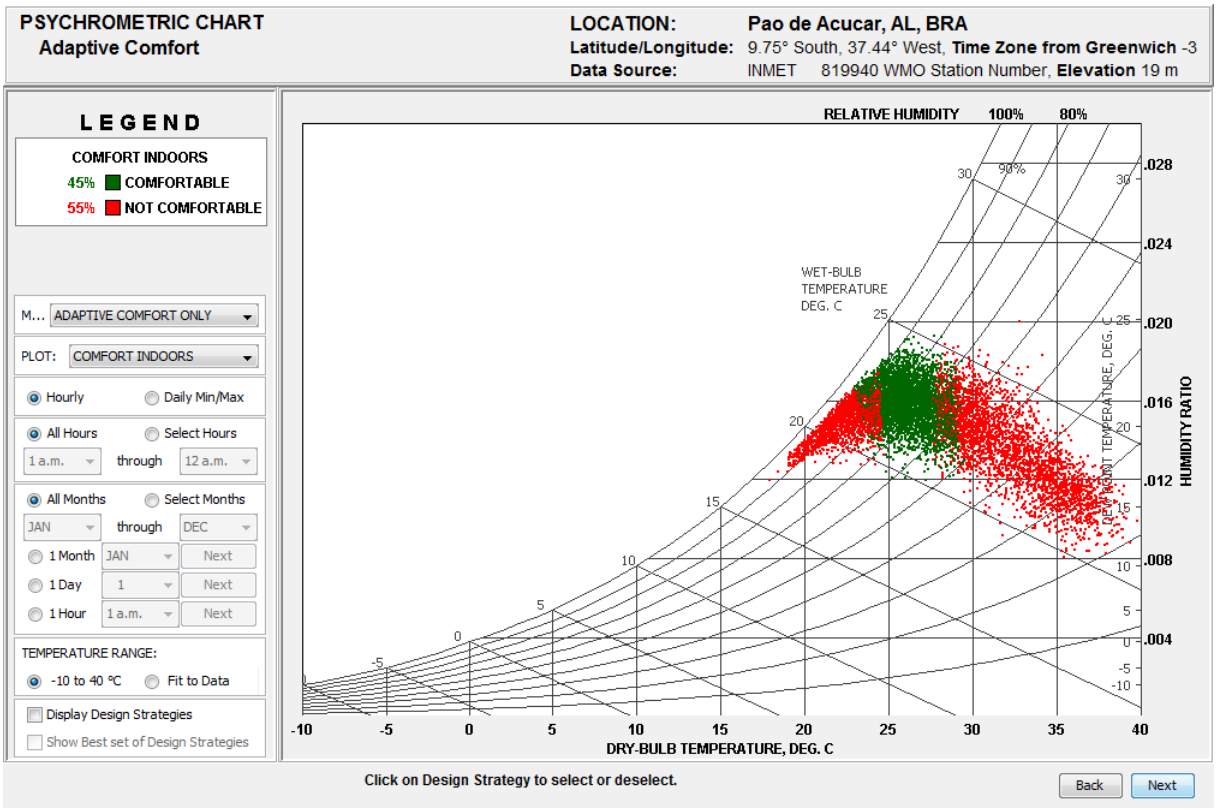
25c Pão de Açúcar-AL ZB8 G24



25d Pão de Açúcar-AL ZB8 G24



25e Pão de Açúcar-AL ZB8 G24



25f Pão de Açúcar-AL ZB8 G24