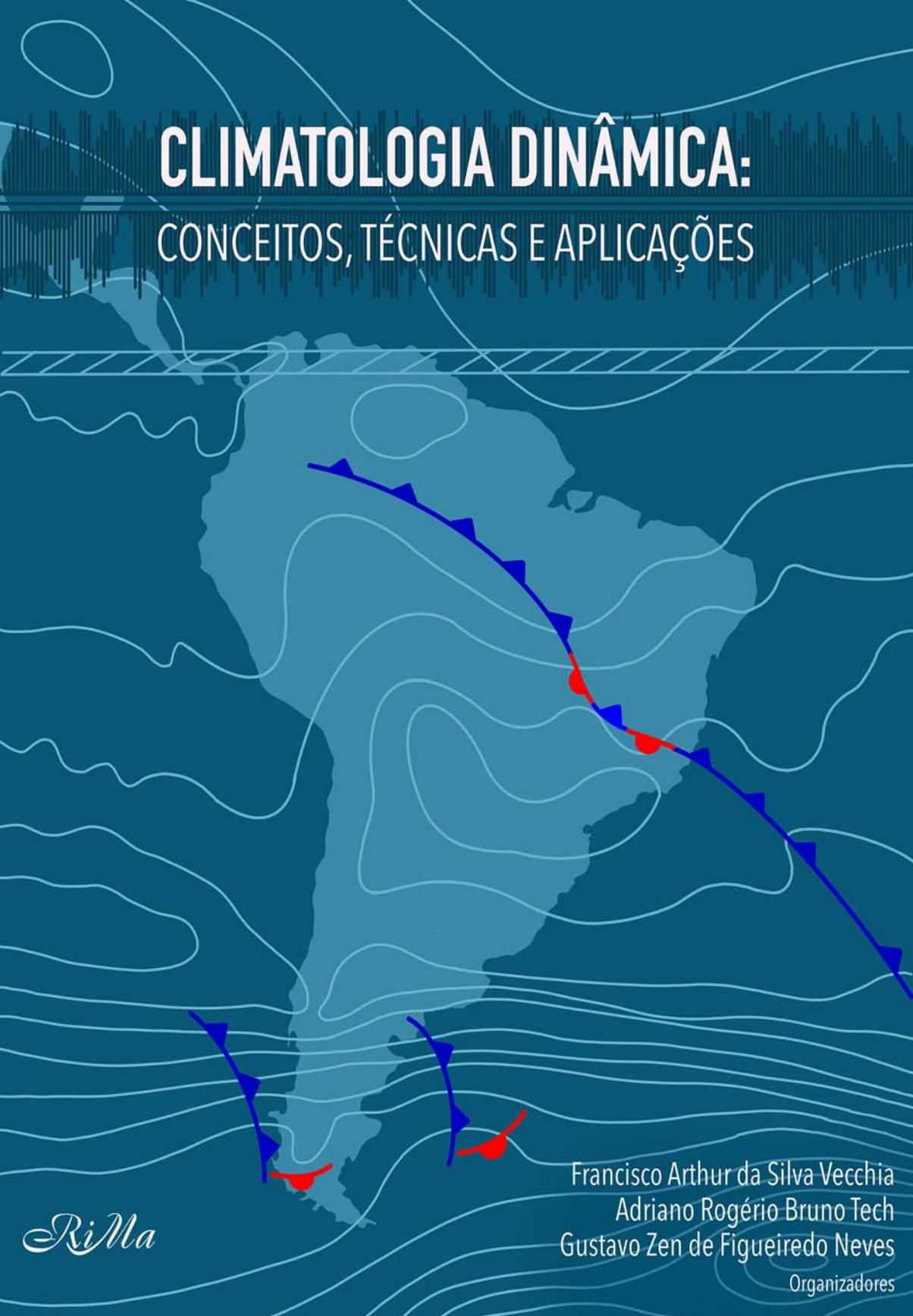


CLIMATOLOGIA DINÂMICA: CONCEITOS, TÉCNICAS E APLICAÇÕES



RiMa

Francisco Arthur da Silva Vecchia
Adriano Rogério Bruno Tech
Gustavo Zen de Figueiredo Neves
Organizadores

Francisco Arthur da Silva Vecchia

Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos (1981), Especialização em Arquitetura Bioambiental, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (1986), Mestrado em Arquitetura: Tecnologia do Ambiente Construído, também, pela Escola de Engenharia de São Carlos - EESC USP (1990) e doutorado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (1997). Atualmente é Professor Associado A3 (Livre Docente) da Universidade de São Paulo, EESC USP, assessor internacional da Universidade de Chiapas, México; foi representante brasileiro no Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnologia para el Desarrollo (CYTED). Participa como assessor "Ad Hoc" da FAPESP, Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE); CNPq; e na condição de assessor "Ad honoraris" de ONGs e de várias empresas, tais como Ecocasa e Ibablac, respectivamente no âmbito de tecnologias construtivas saudáveis e ecologicamente corretas. Atua área de Engenharia Sanitária, com ênfase em Engenharia Ambiental, assim como na área de Ciências Sociais Aplicadas, com ênfase em Tecnologia do Ambiente Construído, com foco principalmente nos seguintes temas: adaptação tecnológica, adequação ambiental e climática, Conforto Ambiental, Meio Ambiente e Sustentabilidade, Clima Urbano, incluindo-se Arquitetura & Clima. Possui experiência no campo da Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente e ao Conforto Humano e Climatologia Aplicada à Engenharia Ambiental.

Adriano Rogério Bruno Tech

Possui graduação em Engenharia Civil - habilitação em agrimensura pela Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Pirassununga (1992). É Mestre em Sistema de Informação pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas (2002) e Doutor em Zootecnia pela Universidade de São Paulo (2008). Pertenceu ao Quadro do Magistério Superior da Aeronáutica como Professor Adjunto - Nível II. Atualmente atua como Professor Associado da Universidade de São Paulo em Pirassununga. Possui experiência na área de ciência da computação, com ênfase em software básico, atuando principalmente nos seguintes temas: inteligência artificial, sistemas multi-agentes, sistemas tutores inteligentes, sistemas de monitoramento de



CLIMATOLOGIA DINÂMICA: CONCEITOS, TÉCNICAS E APLICAÇÕES

Francisco Arthur da Silva Vecchia
Adriano Rogério Bruno Tech
Gustavo Zen de Figueiredo Neves
(organizadores)

RiMa

2020

Copyright © 2020 dos autores

Direitos reservados desta edição:
RiMa Editora

Capa: Ilustração do avanço da Frente Fria que alcançou a Linha do Equador.
Carta sinótica de superfície (19.07.2017, 12Z). Fonte: INPE/CPTEC/GPT. Disponível em:
<http://tempo.cptec.inpe.br/cartas.php?data=20170719&hora=12&tipo=Superficie>.
Ilustrado por Eduardo de Oliveira Alves.

Ilustrações das aberturas dos capítulos: Eduardo de Oliveira Alves

C639c

Climatologia dinâmica: conceitos, técnicas e aplicações /
organizado por Francisco Arthur da Silva Vecchia, Adriano Rogério
Bruno Tech e Gustavo Zen de Figueiredo Neves – São Carlos:
RiMa Editora, 2020.

288 p. il.

ISBN 978-65-990488-1-4 - ebook

1. sistemas atmosféricos. 2. massa de ar. 3. clima urbano.
4. conforto térmico. 5. tecnologia da informação. I. Título.

CONSELHO DE AVALIAÇÃO

Edson Soares Fialho (UFV)

Érico Masiero (UFSCar)

Carlos Alberto Ferreira Bispo (AFA)

Luiz Carlos Baldicero Molion (UFAL)

Paulo Henrique de Souza (UNIFAL)

COMISSÃO EDITORIAL

Dirlene Ribeiro Martins

Paulo de Tarso Martins

Carlos Eduardo M. Bicudo (Instituto de Botânica - SP)

Evaldo L. G. Espíndola (USP - SP)

João Batista Martins (UEL - PR)

José Eduardo dos Santos (UFSCar - SP)

Michèle Sato (UFMT - MT)

RiMa

Rua Virgílio Pozzi, 213 – Santa Paula

13564-040 – São Carlos, SP

Fone: (16) 988064652

SOBRE OS AUTORES

Adriano Rogério Bruno Tech - <http://lattes.cnpq.br/8768632680429517>

Possui graduação em Engenharia Civil - habilitação em agrimensura pela Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Pirassununga (1992). É Mestre em Sistema de Informação pela Pontifícia Universidade Católica de Campinas (2002) e Doutor em Zootecnia pela Universidade de São Paulo (2008). Pertenceu ao Quadro do Magistério Superior da Aeronáutica como Professor Adjunto - Nível II. Atualmente atua como Professor Associado da Universidade de São Paulo em Pirassununga. Possui experiência na área de ciência da computação, com ênfase em software básico, atuando principalmente nos seguintes temas: inteligência artificial, sistemas multi-agentes, sistemas tutores inteligentes, sistemas de monitoramento de ambiente e de rebanhos, desenvolvimento de sistemas de gestão ERP, além de tecnologias e sistemas de informação e instrumentação de precisão. Na área de Gestão, coordena o curso Stricto Sensu Mestrado Profissional da FZEA /USP, na área de administração, com concentração em gestão e inovação na indústria animal. É Coordenador da sala pró-aluno da FZEA /USP, bem como membro titular da COC da Engenharia de Biosistemas, Cultura e Extensão, membro do Conselho Departamental do Departamento de Ciências Básicas; além de Coordenador de Estágios e Atividades Complementares do Departamento de Ciências Básicas. Em 2019 foi contemplado como Bolsista Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora - Nível II, pelo CNPq. Atualmente é Presidente da Comissão de Cultura e Extensão Universitária da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo (USP).

Bruno César dos Santos - <http://lattes.cnpq.br/3575388027991557>

Doutorando em Ciências pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP) – área de concentração Engenharia Ambiental – Núcleo de Climatologia aplicado ao Meio Ambiente, com estudo sobre o efeito orográfico na intensificação e na distribuição espacial das chuvas, na região centro-leste do Estado de São Paulo. Mestre em Ciências – área de concentração Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC, 2016), com estudo sobre a crise hídrica de 2014-2015, na cidade de São Carlos-SP. Graduado em Licenciatura em Geografia pela Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG, 2013), com estudo de iniciação científica sobre variabilidade climática na produção cafeeira do Sul de Minas Gerais. Realiza pesquisas nas áreas de Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente, Agrometeorologia, Geotecnologias e Educação. Tem experiência docente na área de educação em Geografia.

Bruno Eduardo Teixeira - <http://lattes.cnpq.br/3330111993244865>

Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Central Paulista (2008). É especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (2010) e possui também pós-graduação Lato Sensu em Docência do Ensino Superior (2016). Mestre em Gestão e Inovação na Indústria Animal (área: Inovação) pela Universidade de São Paulo (2016). Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo, com o projeto utilização de veículo aéreo não tripulado de asas rotativas, em projetos de sensoriamento remoto para monitoramento de plantios e de áreas cultivadas. Pertenceu ao quadro de magistério na ETEC Tenente Aviador Gustavo Klug, atualmente é professor no Centro Universitário Anhanguera, professor do Centro Universitário Hermínio Ometto e também é oficial do quadro complementar de magistério da Academia da Força Aérea. Possui experiência na área de engenharia elétrica atuando principalmente nos temas referentes

a projetos elétricos, sistemas de controle e automação, eletricidade aplicada e eletrônica analógica e digital. Na área de gestão atuou como chefe do laboratório de física e atualmente é chefe da seção de exame e admissão da academia da Força Aérea.

Diego Narciso Buarque Pereira - <http://lattes.cnpq.br/5260881967794998>

Atualmente no Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Tem formação em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Alagoas (2013). Tem interesse nas áreas das Ciências Ambientais, Recursos Hídricos, Hidroclimatologia, Ciências do Solo, Saneamento Ambiental Descentralizado, Permacultura, Sistemas Agroflorestais e outros. Tem experiência na área de Engenharia Sanitária, com ênfase em Recursos Hídricos, atuando principalmente nos seguintes temas: águas cinzas, e fossa séptica biodigestora.

Elis Dener Lima Alves - <http://lattes.cnpq.br/8510175762102540>

Graduado em Geografia pela Universidade Estadual de Goiás (2008), Mestre em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (2011). Realizou estágio de pesquisa no Centro de Estudos Geográficos da Universidade de Lisboa (2013). Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo (2016). Pós-Doutor em Geografia Física pela Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo (2019). Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Ceres. Vinculado ao Mestrado Profissional em Irrigação no Cerrado. Atua na área de Climatologia Geral, Agrometeorologia, Geoprocessamento e Saúde, Sensoriamento Remoto, Análise Espacial e Geoestatística.

Guilherme Augusto Spiegel Gualazzi - <http://lattes.cnpq.br/0634103496258984>

Possui graduação em Análise de Sistemas pela Universidade Metodista de Piracicaba (1992), especialização em Engenharia de Software pela UNICAMP (2005), mestrado em Engenharia de Produção (2000) e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Metodista de Piracicaba (2010). É professor Associado Nível 3 da Academia da Força Aérea (AFA). Tem experiência na área de Ciências da Computação, com ênfase em Engenharia de Software, atuando principalmente nos seguintes temas: qualidade, software, informação, segurança da informação, tecnologia e sistemas de informação. Desde 2014 desenvolve pesquisa sobre desenvolvimento e aplicação de veículos aéreos não tripulados (VANTs). É pós-doutorado pela Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - USP-Pirassununga-SP (2018), onde desenvolveu pesquisas sobre VANTs aplicados à zootecnia de precisão.

Gustavo Zen de Figueiredo Neves - <http://lattes.cnpq.br/7502283592528073>

Bacharel e Licenciado em Geografia pela UTPR (2009). Mestre em Ciências pela USP (2014), com estudo sobre clima urbano na cidade de São Carlos-SP. Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo (2018), cuja pesquisa versou sobre a atuação dos sistemas atmosféricos e a distribuição pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. É professor colaborador da Universidade Estadual de Goiás, Campus Iporá, com atividades de ensino e pesquisa em Geografia e Climatologia do Cerrado. É Professor colaborador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo, oferecendo disciplinas na linha de pesquisa Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente (CRHEA-USP São Carlos). É membro da Associação Brasileira de Climatologia (ABClima) exercendo a função de Diretor-Secretário (Gestão 2018-2020) e membro do Conselho Deliberativo (Gestão 2016-2018 e 2014-2016). Pesquisador colaborador do Grupo de Estudos da Localidade (USP Ribeirão Preto/CNPq). Tem experiência docente e

profissional na área de Geociências, atuando principalmente nos temas de Geografia Física, Climatologia, Sistemas atmosféricos da América do Sul, Clima Urbano, entre outros.

Isabela Taici Lopes Gonçalves Horta - <http://lattes.cnpq.br/4747661968972314>

Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental pela USP, campus de São Carlos. Graduada em Licenciatura e Bacharelado em Geografia pela UNESP Campus de Rio Claro. Tenho interesse em temas sobre Desenvolvimento Sustentável, Climatologia, Geografia e Sistemas de Informação Geográfica. Trabalhei como Professora Substituta na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) campus de Rio Claro ministrando as disciplinas Gestão de Recursos Hídricos para o curso de Geografia e Análise e Manejo de Recursos Naturais para o curso de Engenharia Ambiental no segundo semestre de 2018. Atualmente sou aluna de doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental na USP de São Carlos e também atuo como professora para o Ensino Fundamental na rede privada de ensino.

Marcelo Eduardo de Oliveira - <http://lattes.cnpq.br/2523027323908554>

Possui graduação em Administração, com habilitação em Administração Geral pela Universidade de Franca (1999). Mestre em Ciências pela Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (2016). Doutor em Ciências pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (2019). MBA em Gestão de Marketing pela Faculdade de Tecnologia Ciência e Educação (2003). MBA em Gestão de Projetos pelo Instituto de Pesquisas e Educação Continuada Economia e Gestão de Empresas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Software Básico, atuando principalmente nos seguintes temas: Sistemas de monitoramento de ambiente de produção animal e Robótica Educacional. Possui experiência aplicada como empresário e gestão de empreendimentos na área educacional. Atualmente é Professor Associado Profissional, atuando como orientador em diversos cursos de especialização do Instituto de Pesquisas e Educação Continuada Economia e Gestão de Empresas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, Pesquisador no Laboratório de Tecnologia e Sistemas de Informação da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo e Diretor Geral do Grupo de Extensão Universitária Hacker Club HCA51 da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (2016/2019).

Mauricio Sanches Duarte Silva - <http://lattes.cnpq.br/5714231393822905>

Doutorado em andamento na Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos, USP, com ênfase em Conforto térmico e índices climáticos para Turismo. Mestrado em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos (2007) e Bacharelado em Turismo pelo Centro Universitário Central Paulista (2003). Atua principalmente nos seguintes temas: Conforto térmico, Índices Climáticos, Sistema de Informação Geográfica (SIG), Ecoturismo, acessibilidade em trilhas e plano diretor turístico.

Nuria Pérez Gallardo - <http://lattes.cnpq.br/8695660515236363>

Doutora em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Núcleo de Climatologia aplicado ao Meio Ambiente (USP, 2017). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade de Deusto (Espanha, 2011). Engenheira Civil pela UNICEP, Centro Universitário Central Paulista (São Carlos- SP, 2018). Engenheira Técnica de Obras Públicas, Especialidade em Construções Cíveis, pela Universidade de Cantabria (Espanha, 2009). Técnico superior em Desenvolvimento de Projetos Urbanísticos e Atividades Topográficas pelo Instituto Augusto Gonzalez Linares (Espanha, 2000). Tem experiência profissional na área de edificação, atuando

principalmente nos temas de Construção Sustentável, Tecnologia do Ambiente Construído, Conforto Ambiental, Clima Urbano, Recursos Hídricos, Desenhos de projetos em Auto CAD. Atualmente compõe o quadro docente do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA, ministrando as disciplinas da área de Arquitetura e Urbanismo da grade curricular do referido curso. Participa do Grupo de Pesquisa em Tecnologia do Ambiente Construído – GTAC.

Rafael Gotardi Brússolo - <http://lattes.cnpq.br/2430792628885619>

Geógrafo (licenciatura e bacharelado) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de Presidente Prudente. Mestre em Geografia pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Atualmente é doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental pela Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de São Carlos. No doutorado (em andamento) pesquisa temas relacionados às Ilhas de Calor Urbanas em São Carlos. Na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP) campus de Jaboticabal é professor colaborador no curso de graduação, mestrado e doutorado em Medicina Veterinária e na residência em área da saúde, trabalhando com a temática Clima, Epidemiologia, Territorialização e Saúde Ambiental. Na Embrapa Pecuária Sudeste desenvolve pesquisas na área de Agrometeorologia e suas interfaces com as Geotecnologias.

Rafael Grecco Sanches - <http://lattes.cnpq.br/2395726310692375>

Possui graduação em Geografia pela Universidade Sagrado Coração, Bauru/SP, Mestre e Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) na área de Climatologia Aplicada e Pós-Graduação em nível de especialização em gestão ambiental pela UNESP, Bauru/SP. Estagiou no ano de 2009 no Projeto de Recuperação de Matas Ciliares do Estado de São Paulo, projeto demonstrativo da cidade de Jaú/SP.

Rafael Perussi - <http://lattes.cnpq.br/8848762056908263>

Possui graduação em Ciências Biológicas (UNIARA), Pós-graduação em Saneamento e Gestão Ambiental (UFSCar), Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental (EESC-USP) e atualmente é pesquisador doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental (EESC-USP). Realiza pesquisas nas áreas de climatologia aplicada ao ambiente construído, telhado verde, clima urbano, arborização urbana, monitoramento ambiental com veículos aéreos não-tripulados e instrumentação meteorológica.

Vandoir Bourscheidt - <http://lattes.cnpq.br/8224261649535795>

Possui graduação em Geografia pela Universidade Federal de Santa Maria (2006), mestrado (2008) e doutorado (2012) em Geofísica Espacial (concentração em Ciências Atmosféricas) pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Foi bolsista de pós-doutorado do grupo de eletricidade atmosférica (ELAT) do INPE até o início de 2013. Atualmente é pesquisador visitante junto ao IRSTEA (Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture). É professor adjunto do Departamento de Ciências Ambientais (DCAm) e docente permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), atuando principalmente na área de ciências atmosféricas e SIGs, com ênfase em temas como: climatologia, formação de tempestades, sensoriamento remoto e geoprocessamento.

PREFÁCIO

Nos últimos 30 anos, surgiu hipótese que as variações que ocorrem no clima e no tempo (estado atmosférico instantâneo) são decorrentes das atividades humanas, notadamente as que queimam combustíveis fósseis emitindo dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). É afirmado que esses gases absorvem radiação infravermelha (IV) irradiada pela superfície terrestre e que o aumento de sua concentração na atmosfera acarretaria a intensificação do chamado efeito-estufa. Em princípio, o efeito-estufa intensificado reduziria a perda de IV para o espaço exterior e aqueceria o clima da Terra. É afirmado, sem comprovação, que um aquecimento do clima global acima de 2°C , relativo à temperatura do ar do período pré-industrial, teria consequências desastrosas para a Humanidade, como derretimento de geleiras, aumento do nível do mar e maior frequência de eventos extremos – secas severas e inundações – dentre outros. Tais afirmações, porém, não tem bases físicas sólidas, e as projeções climáticas feitas para as próximas décadas são decorrentes de resultados de modelos de simulação de clima global (MCG), que são muito rudimentares e não representam adequadamente os processos físicos que controlam o clima global, particularmente a parametrização da formação/desenvolvimento de nuvens e chuva. Em adição, os cenários de concentração de CO_2 futuros utilizados nos MCG são fictícios, fruto da imaginação humana, alguns inatingíveis, como o RCP 8.5. Portanto, a hipótese que o CO_2 controla o clima global é de difícil aceitação.

Na realidade, o clima do Planeta Terra é resultante de interações complexas de fenômenos astronômicos e geofísicos tanto externos como internos ao sistema continentes-oceanos-atmosfera. São exemplos de influência externa o deslocamento do Sistema Solar ao longo da galáxia Via Láctea e a variabilidade da atividade solar. O Sistema Solar leva 230 milhões de anos para completar uma volta em torno do centro da Via Láctea, volta essa que não é fechada como uma órbita. O movimento do Sistema Solar não está contido no plano da Via Láctea e se dá de forma ondulatória, subindo e descendo com relação ao plano da galáxia. Quando ele passa por uma região com alta densidade de matéria cósmica, a Terra recebe menos radiação solar e, possivelmente, passa por um período longo de glaciação (“snowball Earth”). Porém, quando o Sistema Solar passa por regiões com baixa densidade de matéria cósmica, ocorre o contrário e o clima da Terra se aquece. O Sol apresenta vários ciclos de atividade, dos quais os mais conhecidos são o Ciclo de Manchas Solares e o Ciclo de Hale, reversão dos polos magnéticos,

de 11 e 22 anos de duração respectivamente, e o Ciclo de Gleissberg de cerca de 90-100 anos. No mínimo do Ciclo de Gleissberg, o número máximo de manchas dentro do ciclo de 11 anos é muito pequeno, cerca de 50 a 70 manchas, conforme observado no início do Século XIX (Mínimo de Dalton) e Século XX. Segundo físicos solares, o mínimo do Ciclo de Gleissberg ocorrerá novamente nos próximos 10-12 anos, entre 2020-2032 e espera-se que esse mínimo seja semelhante ao de Dalton, 200 anos atrás.

Pelo conhecimento atual, a redução do fluxo de radiação solar é muito pequena, de cerca de 0,1%, o que praticamente não afetaria o clima da Terra. Porém, durante um mínimo do Ciclo de Gleissberg, o campo magnético solar enfraquece e a Terra passa a ser bombardeada por um número maior de partículas de alta energia vindas do espaço exterior, erroneamente chamados de raios cósmicos galácticos (RCG). Os RCG interagem com as moléculas que compõem a atmosfera terrestre e, segundo a teoria de Henrik Svensmark, produzem maior número de núcleos de condensação que, por sua vez, aumentam a cobertura de nuvens baixas e o albedo planetário, refletindo mais radiação solar para o espaço exterior. Como consequência, os oceanos se resfriam e, por sua vez, esfriam a atmosfera e o clima do planeta. Exemplos de controles interno do sistema climáticos são o armazenamento de calor pelos oceanos e o transporte do excesso de calor das regiões tropicais para as regiões fora dos trópicos.

Devido à inclinação do eixo de rotação da Terra, o movimento aparente do Sol, durante o ciclo anual, fica confinado entre os círculos de latitudes 23,5°N (Trópico de Câncer) e 23,5°S (Trópico de Capricórnio). Ou seja, regiões tropicais apresentam excesso de radiação solar relativamente às regiões extratropicais. O excesso de calor é transportado para fora dos trópicos pelas circulações atmosféricas e oceânicas. As circulações atmosféricas são mais rápidas, alguns componentes, como as correntes de jatos, por exemplo, com velocidades superiores a 150 km/h, mas que transportam relativamente pouco calor devido à baixa capacidade calorífica do ar. As circulações oceânicas, por sua vez são muito mais lentas, velocidades com duas ordens de magnitude inferiores às atmosféricas, porém transportam grandes quantidades de calor devido à alta capacidade calorífica da água.

A velocidade das circulações oceânicas meridionais é modificada pela força gravitacional da Lua em seu Ciclo Nodal de 18,6 anos. Com esses exemplos de controladores externos e internos, torna-se difícil aceitar que o clima da Terra seja controlado pelo CO₂, um gás constituinte minoritário, de baixa concentração em sua atmosfera (0,04%). Os Capítulos 1 e 2 deste livro trazem contribuição para melhor compreensão da dinâmica do clima e sua

complexidade, enquanto os Capítulos 3 e 4 abordam o conforto humano e animal em áreas urbanas e edificações e o Capítulo 5 trata exemplos de tecnologias de monitoramento ambiental (TI) acopladas a sistemas de informação (SI).

No Capítulo 1, os autores introduzem variáveis meteorológicas, circulações atmosféricas e oceânicas, índices climáticos, como Índice Multivariado de El Niño-Oscilação Sul (IME), e fenômenos como El Niño-Oscilação Sul (ENOS), Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e Oscilação Multidecadal do Atlântico Norte (OMA) que condicionam a variabilidade natural do clima global, tanto na escala de tempo interanual, como é o caso do ENOS, como na escala de prazo mais longo (décadas), como ODP e OMA. Comentam sobre a relação entre variáveis climáticas e a variabilidade dos recursos hídricos. O balanço de energia da Terra é descrito, mostrando que, do calor total - sensível mais latente - que é injetado na atmosfera pela superfície aquecida pelo Sol, em média, cerca de 75% é na forma de calor latente de evaporação. Concluem apresentando duas ferramentas que auxiliam na análise da dinâmica do clima, um manual de utilização do software RCLIMDEX e um tutorial para análise e plotagem de dados existentes no site do Earth System Research Lab/Physical Science Division (ESRL/PSD/NOAA)

Aspectos da climatologia da América Sul são tratados no Capítulo 2. Os autores descrevem as massas de ar atuantes no continente e sistemas frontais associados bem com os diversos regimes de precipitação. Destacam o Brasil, detalhando a climatologia da precipitação e da temperatura do ar sazonais e sistemas atmosféricos que venham a causar secas e inundações. Abordam, também, o conceito de risco, perigo, desastre e vulnerabilidade a que a sociedade possa estar submetida eventualmente. Convém lembrar que eventos extremos, como secas severas e inundações, sempre ocorreram no passado independentes da ação humana e vão continuar a ocorrer esteja o clima global frio ou quente. Este prefaciador cita, como exemplos passados, a seca severa ocorrida no Nordeste do Brasil em 1877-1879, a inundação de Paris em janeiro de 1910 e o nível mais baixo do rio Negro - a bacia hidrográfica com floresta primitiva mais intacta do mundo - da série secular observada no porto de Manaus que ocorreu em 1926. Os autores mostram, ainda, que a sociedade atual está sujeita a desastres como a crise hídrica na Cidade de S. Paulo em 2014, decorrente do forte evento EL Niño 2014-2016 que se instalou e estudam detalhadamente a inundação da Cidade de S. Luis do Paraitinga (SP) ocorrido no verão de 2009/2010, também um ano de evento El Niño. Sob os aspectos meteorológicos, a seca de 1963 no Sudeste foi pior que a de 2014 e totais pluviométricos superiores a 800 mm nos

períodos dezembro-fevereiro ou janeiro-março em S. Luís do Paratinga não são raros. Isso sugere que tais fenômenos voltem a ocorrer no futuro com a mesma intensidade. Porém, os impactos negativos para a sociedade poderão ser maiores à medida que a população e a urbanização aumentam. Alguns bancos de dados meteorológicos, como Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Hidroweb da Agência nacional de Águas (ANA) e Desastres Naturais do Instituto de Pesquisa Meteorológicas (IPMet, Baurú/SP), são referenciados. Concluem que melhorar a previsão de clima é fundamental para salvar vidas e planejar as atividades humanas.

Um breve histórico do desenvolvimento das cidades, os consequentes impactos de mudança da qualidade ambiental local e conceitos básicos sobre Climatologia Urbana, como camada limite planetária, inversão de temperatura e efeito de ilha de calor urbana, são abordados no Capítulo 3. Na sequência desses conceitos básicos, são apresentadas proposições metodológicas de duas escolas de Climatologia Urbana distintas, Oke e Monteiro, suas potencialidades de aplicação para escalas espaciais diferentes. Para ilustrar suas aplicações, e em decorrência da carência de estudos de impactos de implantação de centros urbanos no Brasil, são apresentados resultados de dois estudos de caso, um para uma cidade pequena, Iporá (GO), e outro para uma cidade de porte médio, Assis (SP), dando ênfase ao efeito de ilha de calor e a sensação de conforto térmico dos cidadãos. Esse capítulo é concluído com um estudo sobre os fluxos de radiação infravermelha (IV) térmica medidos com um termômetro de radiação IV (PRT) no Campus I da USP em São Carlos (SP). É um estudo inédito à medida que quantifica a carga de IV horária, durante um período de 24 horas no verão austral, à qual estaria submetido um ser vivo à altura de 1,3 metros acima da superfície com diferentes coberturas e com orientações/exposições diferentes. Os dados do PRT são comparados com dados de um termistor registrados com um datalogger. Resultados sugerem que a amplitude térmica possa atingir 15°C dependendo da natureza da superfície.

Uma visão geral dos processos biológicos que envolvem as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente é apresentada no Capítulo 4. São abordados os conceitos e metodologias de avaliação de conforto térmico, tanto no interior de um ambiente construído quanto no ambiente externo. Os trabalhos experimentais – com revestimentos vegetais sobre paredes e tetos de alvenaria que compõem as células-teste, foram conduzidos no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais – CRHEA da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP). São descritos os materiais bem como sensores utilizados para medir as variáveis

meteorológicas nos experimentos de grau de conforto térmico em dias frio e quente, em época do ano distintas. Os autores deixam sugestões do tipo de vegetação a ser utilizada, modo de cultivo e cuidados, e concluem que a utilização da vegetação no revestimento de construções é capaz de reduzir flutuações térmicas no ambiente interno em diferentes tipos de clima, melhorando o conforto térmico dos ocupantes, a eficiência energética da edificação e proporcionando benefícios ambientais externos que contribuem para amenizar o clima urbano.

No Capítulo 5, o objetivo é trazer ao leitor o conceito e identificação exemplos de práticas de monitoramento de variáveis físicas, particularmente de processos de interação homem-meio ambiente, com o apoio da Tecnologia (TI) e dos Sistemas de Informação (SI). Após a análise das possíveis interações, constrói-se um modelo conceitual que pode assimilar dados ambientais, manual ou automaticamente, por meio de sensores e de hardware/software apropriados. Neste caso, dá-se destaque a sensores eletrônicos, com termistor e higristor, e é descrito, em detalhes, um sistema de aquisição de dados denominado Arduíno, uma plataforma de fonte aberta que pode ser aplicada ao monitoramento de variáveis ambientais. A linguagem escolhida para a programação do software necessário para o funcionamento dessa plataforma é a PYTHON, que é descrita em detalhes suficientes para auxiliar o leitor na aplicação dessa tecnologia. O capítulo é completado com um outro exemplo de tecnologia que é a aplicação de veículos aéreos não-tripulados (VANT) para uso em sensoriamento remoto com a finalidade de se obterem dados físicos em escala espacial pequena que venham complementar as informações produzidas por plataformas espaciais ou aéreas de escala espacial maior. VANT podem ser aplicados a qualquer área do conhecimento ou de atividades humanas correlatas, como agricultura, monitoramento de recursos hídricos e estudos geoambientais.

Da maneira como foi estruturado e elaborado, este livro permite que o leitor desenvolva uma visão holística sobre o clima, em sua escala mais ampla que envolve processos físicos externos e internos ao sistema climático planetário, descendo ao clima de escala local, a escala urbana, que é a percebida pelo cidadão na sua rotina diária, por meio de resultados de estudos de caso ilustrativos, que empregam metodologias de aquisição de informação modernas.

Luiz Carlos Baldicero Molion
Pesquisador Sênior aposentado do Instituto Nacional de
Pesquisas Espaciais/INPE e Professor Associado
aposentado da Universidade Federal de Alagoas UFAL

APRESENTAÇÃO

Este livro, concebido na forma de coletânea, abrange um processo amplo de reflexão sobre o estudo da climatologia nas últimas décadas no Brasil e tem o objetivo de sistematizar conhecimentos e informações ao público acadêmico de graduação na área da Climatologia Dinâmica. Seu conteúdo foi desenvolvido por meio das dissertações e teses defendidas, ou em fase de conclusão, no Núcleo de Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), desenvolvidas no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA-USP).

Encontra-se, também, desdobramentos acumulados em mais de duas décadas dos ensaios, materiais didáticos e notas de aula do ensino de graduação do bacharelado em Engenharia Ambiental, na disciplina “Climatologia Aplicada à Engenharia Ambiental”, do Departamento de Hidráulica e Saneamento, da EESC-USP.

Para a concretização desta obra, soma-se os esforços coletivos de professores e pesquisadores de diferentes Universidades e Instituições Públicas de Ensino e Pesquisa nas áreas da Geografia, Engenharia Ambiental, Engenharia Civil, Zootecnia e Ciências Ambientais.

A escolha dos capítulos norteou-se pelo papel de destaque que a climatologia e a meteorologia tomaram nos últimos trinta anos em todo o planeta, tanto no contexto do prognóstico climático e previsão do tempo a curto prazo, quanto para a relevância científica dos métodos, ferramentas e técnicas empregadas para a observação, interpretação e proposição de equacionamento das relações da sociedade e natureza.

Fruto de um trabalho coletivo iniciado em 2017 e finalizado em 2020, esta obra contou com a colaboração voluntária de professores e pesquisadores de notório saber científico para a revisão dos textos, sugestão de novos horizontes teóricos e reflexões metodológicas, como também a reorganização da escrita científica para o público de graduação, com recomendações de leitura complementar e questões de revisão. Ressalta-se a gentil colaboração das ilustrações da capa e dos capítulos elaboradas pelo professor de geografia Eduardo de Oliveira Alves.

Participaram ativamente da elaboração deste livro os pesquisadores e professores do Laboratório de Tecnologia e Sistemas de Informação, da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo – Campus Pirassununga (FZEA-USP); Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos (DCAM-UFSCar) e pesquisadores da Divisão de Ensino da Academia da Força Aérea (AFA).

Estendemos os agradecimentos a todos e todas que participaram direta e indiretamente para a construção coletiva desta coletânea.

Os organizadores

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 CLIMATOLOGIA: CONTRIBUIÇÕES À DINÂMICA CLIMÁTICA

*Rafael Grecco Sanches
Diego Narciso Buarque Pereira*

INTRODUÇÃO: A DINÂMICA CLIMÁTICA NO TEMPO E NO ESPAÇO	4
SISTEMA CLIMÁTICO	6
BALANÇO DE ENERGIA: A RADIAÇÃO SOLAR E TERRESTRE	6
A ATMOSFERA, SUA ESTRUTURA E CIRCULAÇÃO GERAL	8
VARIABILIDADE E TELECONEXÕES CONTINENTE-ATMOSFERA-OCEANO	14
VARIABILIDADE NATURAL DO CLIMA	21
CLIMATOLOGIA DINÂMICA: BREVE DISCUSSÃO	27
CLIMA E RECURSOS HÍDRICOS	30
APLICAÇÕES TÉCNICAS EM CLIMATOLOGIA	33
O RCLIMDEX COMO FERRAMENTA PARA ANÁLISE EM CLIMATOLOGIA	33
PLATAFORMA DE ANÁLISE E PLOTAGEM DA NOAA	46
Recomendações para leitura complementar	52
QUESTÕES DE REVISÃO	52
BIBLIOGRAFIA	53

CAPÍTULO 2 PROCESSOS E SISTEMAS ATMOSFÉRICOS: CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS E APLICADAS EM CLIMATOLOGIA DINÂMICA

*Bruno César dos Santos
Isabela Taici Lopes Gonçalves Horta*

INTRODUÇÃO	58
CLIMATOLOGIA DA AMÉRICA DO SUL E DO BRASIL	59
AMÉRICA DO SUL	59
BRASIL	67
FONTE DE DADOS SOBRE PRECIPITAÇÃO	70
RECURSOS PARA ANÁLISE CLIMATOLÓGICA – FERRAMENTAS E BANCO DE DADOS	71
CARTAS SINÓTICAS	71
IMAGENS DE SATÉLITES METEOROLÓGICOS	72
BOLETINS CLIMATOLÓGICOS	73
BANCO DE DADOS METEOROLÓGICOS DO INMET	74
BANCO DE DADOS DE DESASTRES NATURAIS – CENTRO DE METEOROLOGIA DE BAURU IPMET	76
HIDROWEB	77
INTERFACE DO HIDROWEB	77

TEMPESTADES TROPICAIS, SECAS E INUNDAÇÕES	79
IMPACTOS CAUSADOS PELOS EVENTOS EXTREMOS	82
POLÍTICAS PÚBLICAS	86
CONVENÇÃO DAS PARTES	86
CRISE HÍDRICA DE 2013-2014	92
ESTUDO DE CASO	95
ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA PRECIPITAÇÃO E DANOS OCORRIDOS NO VERÃO DE 2009/2010 EM SÃO LUIZ DO PARAITINGA – SP	95
FERRAMENTAS	95
RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
ANÁLISE ESTATÍSTICA	98
SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES	99
DANOS CAUSADOS PELOS IMPACTOS	103
CONCLUSÕES DO ESTUDO DE CASO	104
CONCLUSÕES	105
RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR	105
QUESTÕES DE REVISÃO	106
BIBLIOGRAFIA	106

CAPÍTULO 3
CLIMA URBANO: CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS E
APLICADAS EM CIDADES DE PEQUENO E MÉDIO PORTE

Elis Dener Lima Alves
Rafael Gotardi Brússlo
Gustavo Zen de Figueiredo Neves

INTRODUÇÃO	112
O SISTEMA CLIMA URBANO – O INÍCIO	113
ESCALAS VERTICAIS E HORIZONTAIS DO CLIMA URBANO	114
CAMADA LIMITE PLANETÁRIA	117
CAMADA LIMITE URBANA	118
ILHA DE CALOR: SUPERFICIAL E ATMOSFÉRICA	119
O CLIMA URBANO NO BRASIL	120
APLICAÇÕES EM CLIMA URBANO	123
ESTUDO DE CLIMA URBANO EM CIDADE DE PORTE PEQUENO:	
O CASO DE IPORÁ (GO)	123
A TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E AS ANOMALIAS TÉRMICAS EM IPORÁ	125
O PAPEL DOS CURSOS D'ÁGUA/ÁREA VERDE NA	
TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE	129
CONSIDERAÇÕES	132
ESTUDO DE CLIMA URBANO EM CIDADE DE PORTE MÉDIO:	
O CASO DE ASSIS (SP)	133
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	134
OS LEVANTAMENTOS DE CAMPO E AS COLETAS DE DADOS	135

CONSIDERAÇÕES	146
ESTUDO DE CLIMA URBANO EM CIDADE DE PORTE MÉDIO: O CASO DE SÃO CARLOS (SP)	148
CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	149
MATERIAIS E MÉTODOS	149
TERMÔMETRO DIGITAL INFRAVERMELHO	151
ÂNGULO – 10°	153
CONSIDERAÇÕES	156
CONSIDERAÇÕES E POTENCIALIDADES DE APLICAÇÃO	157
RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR	158
QUESTÕES DE REVISÃO	158
BIBLIOGRAFIA	158
DOCUMENTOS ELETRÔNICOS	161

CAPÍTULO 4
CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO:
CONCEITOS E APLICAÇÕES EM BIOCLIMATOLOGIA E
DESEMPENHO TÉRMICO

Nuria Pérez Gallardo

Rafael Perussi

Maurício Sanches Duarte Silva

INTRODUÇÃO	164
VARIÁVEIS DO CLIMA E AQUISIÇÃO DE DADOS	165
CONFORTO TÉRMICO: O CLIMA E OS PROCESSOS FISIOLÓGICOS	168
TERMORREGULAÇÃO	170
TERMOGÊNESE	171
TERMÓLISE	171
MECANISMOS DE CONTROLE	172
EQUAÇÃO DO BALANÇO TERMOFISIOLÓGICO	172
O AMBIENTE CONSTRUÍDO: O COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS	173
TRANSFERÊNCIA DE CALOR	174
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	175
INÉRCIA TÉRMICA	175
EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO	177
UTILIZAÇÃO DA VEGETAÇÃO PARA A MELHORA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	177
SISTEMAS VEGETAIS VERTICAIS	178
FACHADAS VERDES	180
MUROS VIVOS	180
COBERTURAS VERDES	182
COMPONENTES DO SISTEMA	185
TIPOS DE COBERTURAS VERDES	187
APLICAÇÕES EM CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO	189
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	189

ANÁLISE DOS TIPOS DE TEMPO	191
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES COM ENVOLVENTES VEGETAIS	193
CÉLULAS DE TESTE	193
CÁLCULO DOS LIMITES DE CONFORTO TÉRMICO	197
ANÁLISE DO PERÍODO ESTUDADO	198
DIA CRÍTICO EXPERIMENTAL DE FRIO	198
DIA CRÍTICO EXPERIMENTAL DE CALOR	198
CÁLCULO DO CONFORTO PARA O DIA CRÍTICO DE FRIO	199
CÁLCULO DO CONFORTO PARA O DIA CRÍTICO DE CALOR	201
COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS INTERNAS (TSI) DAS FACHADAS NORTE E DAS COBERTURAS	203
CONSIDERAÇÕES	207
COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS VERDES	207
PLATAFORMAS DE TESTE E AQUISIÇÃO DOS DADOS	208
ANÁLISE DOS VALORES DE TEMPERATURA	210
ANÁLISE DO PERÍODO ESTUDADO	210
ANÁLISE DOS DADOS DAS PLATAFORMAS	213
CONSIDERAÇÕES	216
ÍNDICES CLIMÁTICOS PARA TURISMO	217
DADOS CLIMATOLÓGICOS	217
ÍNDICES DE CONFORTO	217
PET (PHYSIOLOGICAL EQUIVALENT TEMPERATURE)	218
UTCI (UNIVERSAL THERMAL CLIMATE INDEX)	219
ÍNDICE CLIMÁTICO PARA TURISMO DE MIECZKOWSKI (ICTM)	220
CONSIDERAÇÕES FINAIS	225
RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR	225
QUESTÕES DE REVISÃO	225
BIBLIOGRAFIA	226

CAPÍTULO 5
TECNOLOGIAS E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO:
MONITORAMENTO DE AMBIENTES E APLICAÇÕES EM CLIMATOLOGIA

Adriano Rogério Bruno Tech
Marcelo Eduardo de Oliveira
Vandoir Bourscheidt
Bruno Eduardo Teixeira
Guilherme Augusto Spiegel Gualazzi

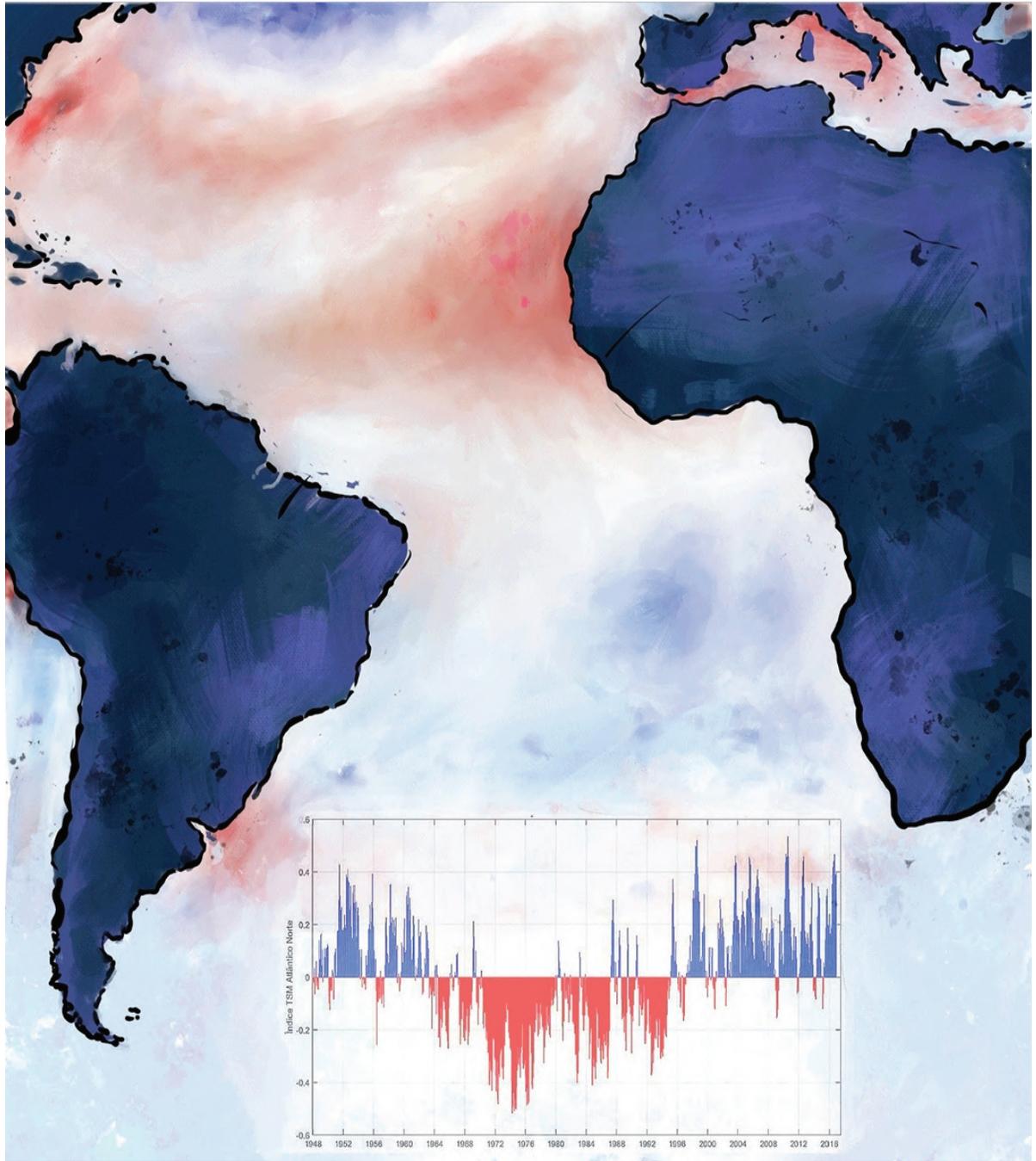
INTRODUÇÃO	232
ARDUINO UNO	237
APLICAÇÕES EM MONITORAMENTO DE AMBIENTES	240
PROGRAMAÇÃO PYTHON APLICADA À CLIMATOLOGIA	245
INTRODUÇÃO	245
COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA COM PYTHON	246
AMBIENTES PARA EXECUÇÃO DO PYTHON	247

BIBLIOTECAS PRÉ-EXISTENTES	250
ANÁLISE DE DADOS CLIMÁTICOS COM PYTHON	250
OBTENÇÃO DE DADOS DE ESTAÇÕES	251
EXEMPLOS DE ROTINAS	252
CONSIDERAÇÕES FINAIS	262
APLICAÇÃO DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT)	
NAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS	264
CONSIDERAÇÕES FINAIS E POTENCIALIDADES DE APLICAÇÃO	271
RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR	272
QUESTÕES DE REVISÃO	272
BIBLIOGRAFIA	272

CAPÍTULO 1

CLIMATOLOGIA: Contribuições à Dinâmica Climática

Rafael Grecco Sanches
Diego Narciso Buarque Pereira



Resumo: O presente capítulo apresenta, por meio das bases conceituais climatológicas, contribuições acerca da estrutura que fundamenta a compreensão do tempo e do clima, algumas bases norteadoras das alterações climáticas e suas interações climáticas por meio das teleconexões. Traz, também, a abordagem dinâmica em Climatologia, bem como sua associação com os recursos hídricos. Por fim, são elencadas duas ferramentas climatológicas a fim de representar sua aplicabilidade técnica.

INTRODUÇÃO: A DINÂMICA CLIMÁTICA NO TEMPO E NO ESPAÇO

As discussões acerca de possíveis alterações climáticas têm alicerçado uma série de pesquisas no âmbito da climatologia, uma vez que esta se propõe a compreender a dinâmica climática por seus elementos de modo integrado.

A dinâmica climática está associada a processos atmosféricos com média de tempo de semanas a milênios. A atmosfera está acoplada aos oceanos e à superfície terrestre, portanto, a oceanografia física, a geografia e a física da superfície terrestre também são consideradas parte da ciência da dinâmica climática.

Esta dinâmica está relacionada com a forma pela qual as leis naturais determinam o clima. Para tanto, inúmeras pesquisas climáticas concentram-se na compreensão do papel da mecânica dos fluidos, da radiação e dos processos na superfície terrestre no clima. Nesse sentido, esforços teóricos e observacionais são fundamentais, assim como ferramentas computacionais também são importantes.

Um dos conceitos da ciência geográfica que contribui para a análise climatológica é o de região, que auxilia na interpretação de diferentes aspectos do planeta Terra em diferentes escalas espaciais. Com o uso da região, enquanto agente de espacialização de elementos inseridos no espaço geográfico, pode-se ressaltar esse conceito como um espaço-momento articulado, ou seja, em processo de intensa transformação, e que envolve múltiplas escalas e dimensões, sendo que tais articulações não decorrem apenas de recortes analíticos, mas também por meio de realidades efetivas¹.

Esses pressupostos podem alicerçar o pensamento acerca da compreensão da atmosfera e dos elementos que envolvem a gênese e a dinâmica climática no planeta Terra. Mesmo que os atributos atmosféricos e a gênese climatológica sejam apenas exemplos da complexidade física presente no planeta,

a observação destes pode conduzir diferentes condutas antrópicas no âmbito terrestre, sendo tais exemplos norteadores do conhecimento científico e da paisagem terrestre.

Tais exemplos podem ser ressaltados em diferentes áreas da ciência e por diferentes autores², que incita a importância da compreensão de tal complexidade terrestre, àqueles::

[...] que não têm consciência do significado das heranças paisagísticas e ecológicas, os esforços dos cientistas que pretendem responsabilizar todos e cada um pela boa conservação e pelo uso racional da paisagem e dos recursos da natureza somente podem ser tomados como motivos de irritação, quando não de ameaça, em curto prazo, à economicidade das forças de produção econômica [...]

Além de ressaltar a importância do conhecimento acerca dos aspectos físicos (naturais) do planeta Terra, o reconhecimento do desenvolvimento de um país é atribuído ao aumento ou diminuição da capacidade de preservação de recursos, bem como a seu nível de exigência a partir de atividades econômicas e à busca por equidade².

Os diferentes mecanismos de compreensão de tal dinâmica se utilizam de elementos quantitativos e qualitativos, contudo:

[...] há os que recorrem a uma estratégia matemática, considerando o clima como estado "médio" dos elementos atmosféricos sobre um dado lugar, e outros preferem escapar do puramente quantitativo, balizando com certos parâmetros numéricos e recorrendo a uma descrição qualitativa, tão aproximada quanto possível, tentam expressar o "comportamento" atmosférico sobre dado lugar [...]³

Nesse sentido, os estudos climáticos assumem papel de grande importância nas relações entre homem e ambiente e, uma vez que essas interações se apresentam com grande complexidade para serem compreendidas em sua totalidade espaço-temporal, os estudos climatológicos e atmosféricos são considerados vitais em sua própria dinâmica e essência física.

As análises espaciais têm de se beneficiar de novas perspectivas, com a indicação de parâmetros fatoriais de ordem climática, ressaltando ainda que deve ser dada atenção especial às variações temporais que, embora eventuais, têm ação direta no ambiente e no homem, além de escaparem ao controle deste último⁴.

Ressalta-se, ainda, o papel processual da análise climatológica, bem como as aplicações de técnicas quantitativas, uma vez que essas devem subsidiar

para o entendimento da dinâmica climática. Além disso, se faz necessário considerar as incertezas no entendimento e limitações interpretativas inerentes à gênese do clima e a interação atmosfera-continente-oceano⁴.

SISTEMA CLIMÁTICO

BALANÇO DE ENERGIA: A RADIAÇÃO SOLAR E TERRESTRE

Para a Terra, a maior fonte de abastecimento e perda de energia são a radiação solar e a radiação terrestre, respectivamente. A radiação solar cobre todo o espectro eletromagnético a partir dos raios gama e raios x, passando pelo ultravioleta (UV), visível, e radiação infravermelha, até as micro-ondas e ondas de rádio. Contudo, a porção mais significativa do espectro associado com a transferência de energia radiativa no sistema climático varia do ultravioleta para o infravermelho próximo. Assim, o espectro solar pode ser dividido em 3 faixas principais: UV (8,3%), visível (45%) e IV próximo (46,7%).

A radiação solar (ou de ondas curtas) recebida é parcialmente absorvida, parcialmente espalhada, parcialmente refletida por vários gases na atmosfera, aerossóis e nuvens. O restante que atinge a superfície da terra é largamente absorvido pelos oceanos, litosfera, criosfera e biosfera, e uma pequena parte é refletida. De acordo com a primeira Lei da Termodinâmica, a energia absorvida pode ser transformada em energia interna (calor) ou pode ser usada pelo ambiente, como energia potencial ou cinética.

Pelo princípio do balanço de energia, sabe-se que a energia emitida pela Terra para o espaço exterior deve ser igual à energia recebida pelo Sol e, uma vez que ela não aquece continuamente, pelas leis da radiação, diz-se que a Terra está em um estado de equilíbrio radiativo.

A superfície da Terra aquecida emite apenas radiação em longos comprimentos de onda, na região do infravermelho, conhecida como Radiação de Onda Longa Emitida (ROLE).

A Figura 1 resume a média anual do balanço de energia para o sistema climático terrestre como um todo, separando em saldo da radiação solar e a radiação terrestre do lado esquerdo e lado direito da figura, respectivamente, adicionados da energia termal e do calor utilizado para a evaporação da água. O balanço radiativo faz parte do balanço energético global.

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera, em média, é de 342 Wm^{-2} . Desse total, 67 Wm^{-2} (19%) interage com o ozônio da estratosfera, oxigênio (intercepta UVC para gerar O_3), vapor de água na troposfera, aerossóis e

nuvens, e 168 Wm^{-2} (49%) é absorvido pela superfície da Terra. Os 77 Wm^{-2} (31%) restantes da radiação solar são dispersos pelo ar, refletidos pelas nuvens e refletidos pela superfície da Terra¹¹. Como observado, aproximadamente metade da radiação solar ou radiação de onda curta, no topo da atmosfera, não chega à superfície da Terra. A maior parte da radiação solar na região do visível atinge a superfície, é absorvida e aquece a superfície.

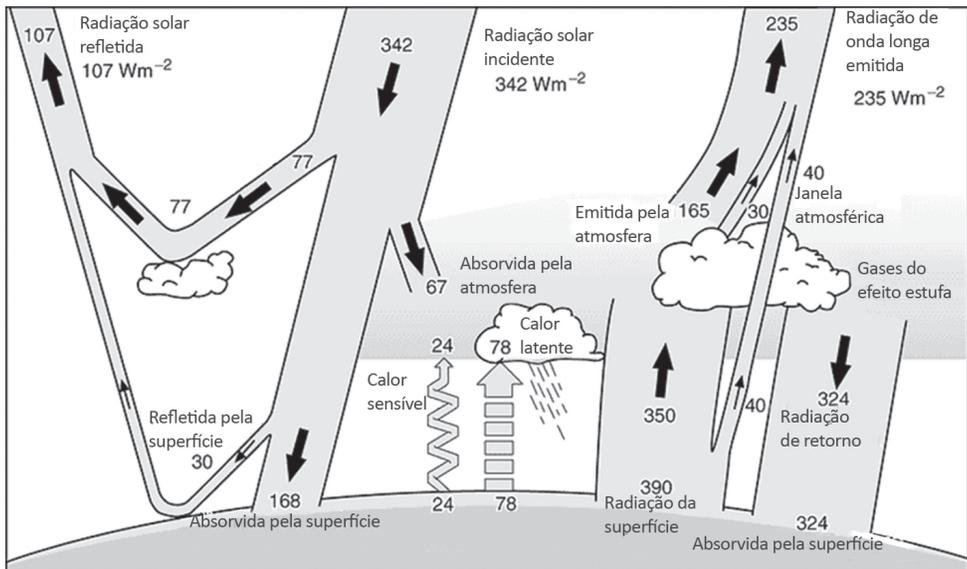


Figura 1 Diagrama esquemático do balanço de energia global no sistema climático. Observe-se a entrada e saída de energia na forma de radiação de onda curta e radiação de onda longa emitida, respectivamente. *Fonte:* Adaptado de KIEHL; TRENBERTH (1997).

Por outro lado, a ROLE, a radiação que é emitida pela Terra, concentra-se na região do infravermelho e tem um valor médio de 235 Wm^{-2} . Como ilustrado na Figura 1, essa energia radiante não se perde totalmente para o espaço, sendo parcialmente absorvida pela atmosfera e reemitida para Terra, sendo utilizada para aquecer o planeta. Assim, exerce papel fundamental na dinâmica da Terra, que é o fenômeno conhecido como efeito estufa, um fenômeno natural em virtude das características da atmosfera da Terra. O ar é aquecido por condução na primeira lâmina de ar e depois transporta por convecção a energia armazenada. Dessa forma, a atmosfera é aquecida de baixo para cima.

Os principais gases que interagem com a radiação terrestre são o vapor de água e o dióxido de carbono, que são gases traços ou constituintes minoritários na atmosfera. O vapor de água é de longe o mais importante para

o efeito de reemissão isotrópica de IR, que retarda a perda veloz de radiação. As gotas d'água presente nas nuvens absorvem os fótons infravermelhos de maneira muito eficiente, sendo importante contribuinte para a manutenção desse efeito. Sendo assim, uma maior a cobertura global de nuvens, aumenta o albedo planetário e tende a resfriar o planeta.

A ATMOSFERA, SUA ESTRUTURA E CIRCULAÇÃO GERAL

Comumente, a atmosfera terrestre é dividida em camadas: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera. Dessas camadas, a troposfera é a que se encontra mais próxima à superfície e estende-se até alturas que variam de 8 km nos polos até 17 km próximo ao Equador.

Na troposfera, a temperatura diminui à medida que a altitude aumenta, a uma taxa média de $6,5^{\circ}\text{C}$ por km. A região de transição entre a troposfera e a estratosfera chama-se tropopausa e atua como uma fronteira para o ar troposférico. A Figura 2 expressa o perfil (estrutura) vertical médio da atmosfera em função da temperatura.

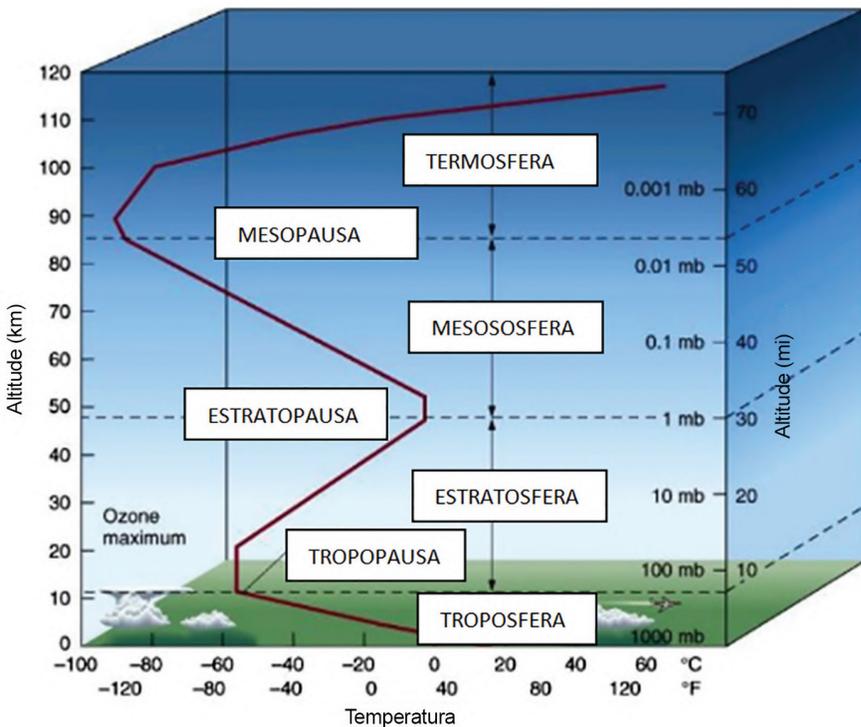


Figura 2 Perfil vertical e estrutura termal da atmosfera.

É na troposfera que os processos relacionados com os fenômenos meteorológicos ocorrem. Quase todas as nuvens e água precipitável, assim como as trovoadas, nascem nessa camada mais baixa da atmosfera.

A atmosfera terrestre é composta principalmente de nitrogênio (78%), oxigênio (21%), argônio (0,9%) e uma pequena quantidade de outros gases, como o gás carbônico. O ar contém uma quantidade variável de vapor de água.

Os registros de elementos meteorológicos, oceânicos e glaciais apresentam considerável variabilidade em todos os intervalos temporais. Em geral, fenômenos de longos períodos parecem estar associados com a variabilidade de alta frequência. Nessas variações de alta frequência na atmosfera, pode-se incluir os vórtices ciclônicos transitórios associados às mudanças diárias no sistema climático, e, no campo oceânico, os turbilhões de mesoescala, que têm longas escalas temporais.

Para a dinâmica climática, os atributos de sua compreensão são complexos e apresentam grande interação com diferentes elementos físicos do planeta. Sendo assim, diversas abordagens buscam caracterizar os diferentes tipos climáticos por meio de classificações do estado médio dos elementos atmosféricos e, dessa forma, compreender sua dinâmica.

O clima da Terra é definido por dois fluidos: o ar e a água. Ambos apresentam dinâmica própria e interação entre si, com a terra sólida e com os ecossistemas naturais ou não. Os ventos são movimentos do ar que definem a circulação atmosférica, ao passo que os movimentos da água nos oceanos caracterizam as correntes marinhas. Intensa troca de energia e massa entre os fluidos ocorre quando a água muda de fase (vapor, água líquida ou gelo), mas o combustível fundamental para a dinâmica da atmosfera e dos oceanos é a energia recebida do Sol. As variabilidades temporais e associações com outros elementos naturais contribuem para melhor compreensão da estrutura do espaço-ambiente, bem como de sua organização funcional⁴.

Por conta do formato quase esférico do planeta, e sua pouca inclinação no plano orbital, o Sol aquece com muito mais intensidade as regiões equatoriais do que as regiões polares, ou seja, a região tropical tem excesso de energia, ao passo que as regiões polares têm déficit de energia, exceto no período dos solstícios de verão, no respectivo polo. Os fluidos – ar e água – encarregam-se de redistribuir o calor das regiões com excesso para as regiões com déficit de energia.

Em resposta a isso, duas células de convecção se desenvolvem. No entanto, verificando-se os deslocamentos dos ventos atuais descobre-se que não se

observa somente esse tipo de movimento. Na década de 1920, foi concebido um novo modelo conceitual de células de circulação vertical, que consistem na célula de Hadley, ondas de Rossby, em latitudes temperadas, e célula polar. Essas células (Figura 3) representam melhor o fluxo de vento típico ao redor do globo.

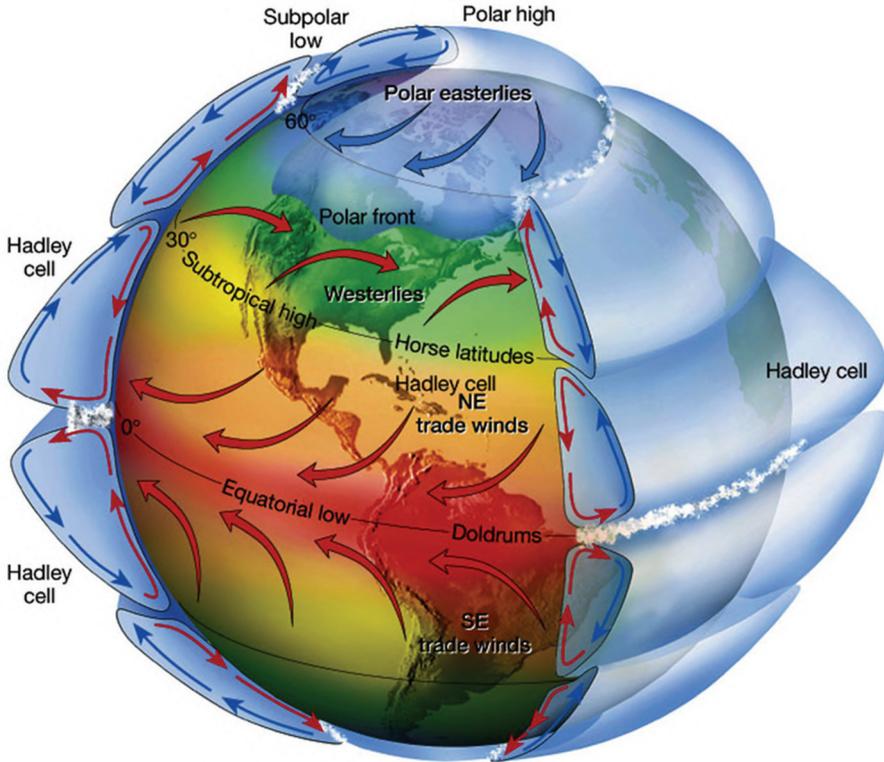


Figura 3 Idealização das três células de convecção. *Fonte:* LUTGENS; TARBUCK (2001).

A cerca de 30°, norte e sul, tem-se uma região de convergência e subsidência (divergência) do ar vindo da região equatorial, onde se definem os sistemas de alta pressão subtropical à superfície. Nessas regiões, o ar é tipicamente seco e isento de precipitação. Muitas das principais regiões desérticas do mundo são encontradas próximo de 30° de latitude (ex.: Saara, Médio Oriente, noroeste da Austrália, sudoeste dos Estados Unidos).

O ar frio dos polos e o ar quente dos trópicos e subtropicais estão separados pelas chamadas "frentes" ou sistemas frontais. As ondas atmosféricas e frentes encarregam-se de redistribuir o calor, reduzindo o excesso nos trópicos e o déficit nos polos. Quando o ar frio avança sobre determinado setor terrestre,

a frente é denominada de frente fria; quando o ar quente se sobrepõe sobre outro setor terrestre, denomina-se de frente quente.

Na região equatorial, o ramo superficial das células de circulação define os ventos Alísios de nordeste no hemisfério norte e os de sudeste no hemisfério sul. A região equatorial é uma zona de intensa movimentação atmosférica em virtude da convergência de ar quente e úmido. No entanto, em relação aos trópicos e polos, pode ser considerada uma região de calmaria. Nessa região é onde os ventos Alísios se encontram, onde o ar converge e diminui o gradiente de pressão. Por isso, os sistemas atmosféricos de altas latitudes raramente atravessam de um hemisfério para outro. Essa região também é chamada de Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

A ZCIT é considerada o sistema mais importante gerador de precipitação sobre a região equatorial dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico, assim como sobre áreas continentais adjacentes. Esse sistema é visualizado em imagens de satélite como uma faixa onde se formam nuvens convectivas que se estende ao longo da região equatorial⁶ (Figura 4).

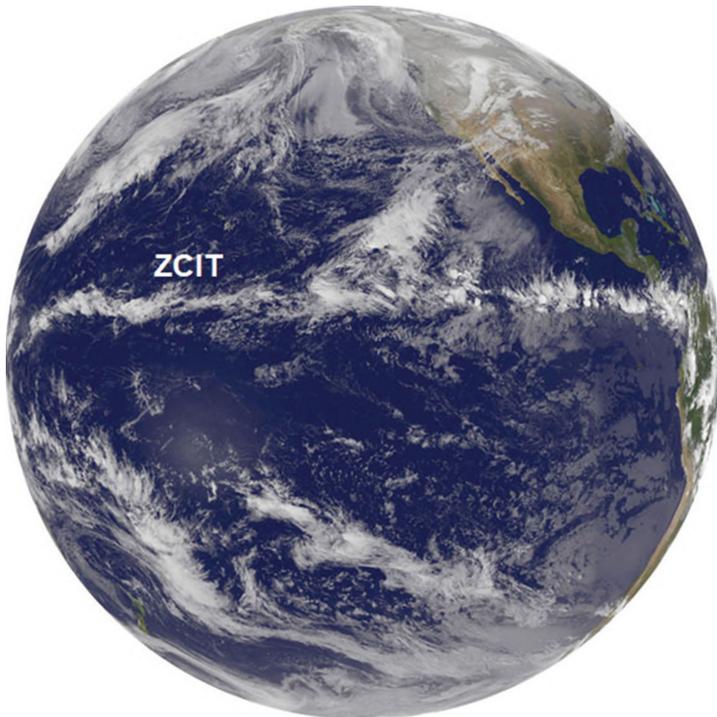


Figura 4 Imagem do satélite Goes, global, no canal do infravermelho, indicativa da banda de nebulosidade associada à ZCIT nas áreas tropicais. *Fonte:* Lutgens, 2013.

Devido ao aquecimento dos continentes pelo Sol em seu movimento relativo, nota-se o deslocamento do ramo ascendente da célula de Hadley (ZCIT) mais ao norte em julho e mais ao sul em abril. (Figura 5b).

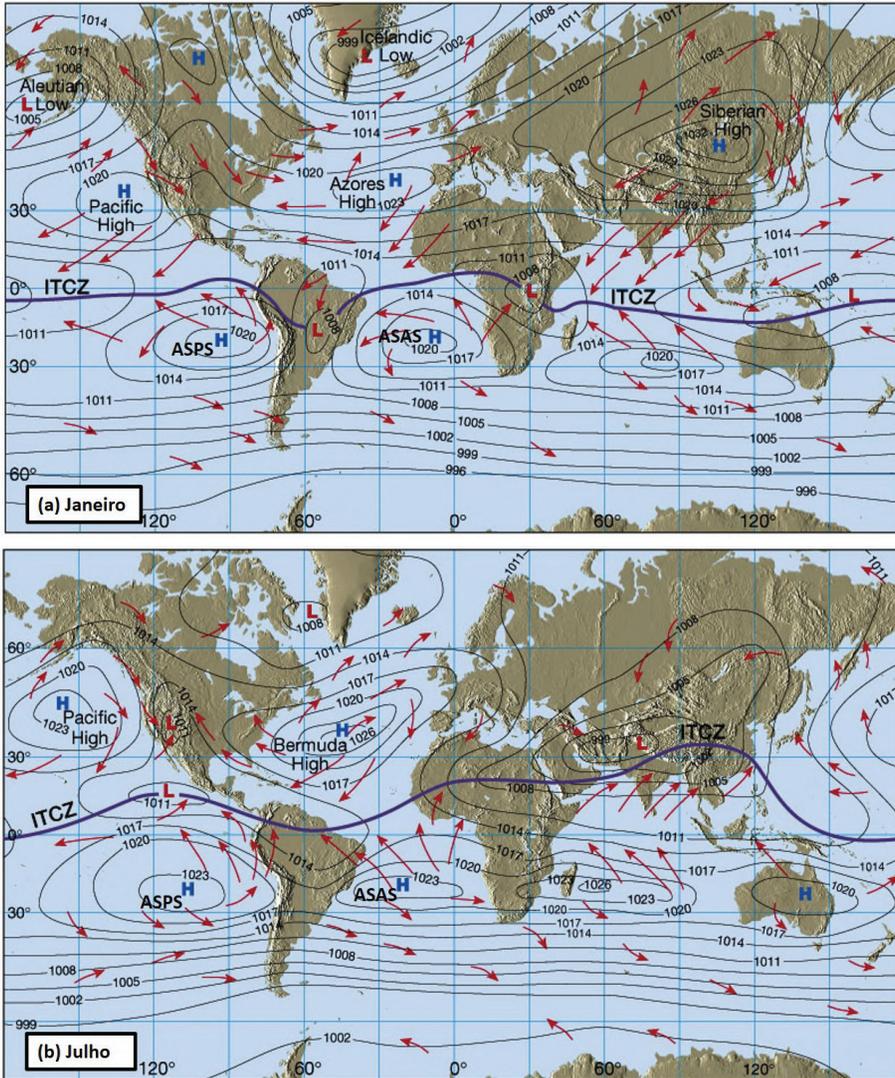


Figura 5 a) Mudança da ZCIT (ITCZ, sigla em inglês para *Intertropical Convergence Zone*) para o sul em janeiro. b) Mudança da ZCIT para o norte em julho. A letra H significa áreas de alta (*high*) pressão. Fonte: LUTGENS; TARBUCK (2001).

De maneira geral, quando a ZCIT está mais ao sul, é verão no Hemisfério Sul e o escoamento dos ventos ocorre, predominantemente, fora dos continentes, mantendo-os seco. Quando a ZCIT está mais ao norte, é inverno no

Hemisfério Sul e verão no Hemisfério Norte e o fluxo dos ventos com umidade ocorre, predominantemente, fora dos oceanos e sobre os continentes, o que de forma geral mantém os continentes úmidos. Porém, esse padrão não se dá de forma simples; cada região possui suas características sazonais próprias.

Um conjunto de variáveis meteorológicas que atuam sobre a faixa equatorial dos oceanos pode definir a ZCIT, a saber: a Zona de Convergência dos Alísios (ZCA), a região do cavado equatorial, as áreas de máxima Temperatura da superfície do mar (TSM) e de máxima convergência de massa de nuvens convectivas⁶.

Essa mudança nos sentidos dos ventos em virtude de um deslocamento da ZCIT para o norte ou para o sul resulta nas monções, que são sistemas de vento que exibem uma inversão sazonal pronunciada no sentido. A monção mais conhecida é encontrada na Índia e no sudeste da Ásia, mas acontecem também no sudoeste da América do Norte, sudeste da América do Sul, África e Oceania.

O aquecimento diferencial entre o oceano e o continente contribui para a formação de um sistema de baixa pressão estabelecido sobre o continente nos meses mais quentes do ano (primavera e verão), criando um gradiente horizontal de pressão no sentido oceano-continente. O ar úmido oriundo do oceano entra em contato com o continente quente, é aquecido e ascende. Durante sua ascensão, resfria-se adiabaticamente e condensa, formando nuvens e causando precipitação. O ar, ao alcançar altos níveis, diverge e descende sobre o oceano, em uma superfície relativamente fria, completando, desse modo, a circulação leste-oeste conhecida como Célula de Walker^{6,8}.

Aspectos como proximidade do oceano e a altitude do local são dois controladores importantes do clima local e estão associados a regimes de vento local denominados, respectivamente, de brisa marinha/terrestre e brisa de vale/montanha. A proximidade com o oceano regula e amortece as variações de temperatura diurna em virtude de sua grande capacidade térmica e pela grande quantidade de vapor d'água que se distribui nas proximidades. O alto conteúdo de umidade no ar interage com a radiação térmica emitida pela terra na faixa do infravermelho e promove remissão isotrópica de energia de menor grau que pode favorecer um efeito similar ao abafamento térmico.

O regime de chuvas também é um fator dominante na definição do clima local. No entanto, as chuvas são o resultado final de uma série de eventos com escalas de tempo e espaço bastante diversas. De forma que as causas

de determinada chuva podem ser uma mistura de fatores locais e remotos. Além disso, as chuvas em determinada região podem afetar o tempo em outras regiões. O mecanismo pelo qual ocorrem essas interações a distância, também chamado de teleconexões, baseia-se em três processos principais: ondas atmosféricas, continuidade da massa e mudança de fase da água.

Em regiões tropicais, as chuvas assumem papel de grande destaque na compreensão do clima, bem como podem ser consideradas como principal elemento de análise na organização e no planejamento do território e do ambiente, diante de seu elevado grau de interferência, impacto e repercussão espaço-temporal⁹.

VARIABILIDADE E TELECONEXÕES CONTINENTE-ATMOSFERA-OCEANO

Em climatologia, nota-se que o uso de ferramentas qualitativas e quantitativas se faz necessário para melhor compreender os diferentes regimes climáticos, bem com sua evolução temporal. Contudo, as variáveis (atributos) climáticas apresentam-se, por seus dados, como elementos heterogêneos e com flutuações. A pluviometria consiste em um desses atributos que, reconhecidamente, tem grande dinamismo espacial (microclimática, mesoclimática e até nos climas globais) e temporalmente²⁸, conforme observado na Figura 6.

Escalas de Abordagem			
Microescala	Tamanho:	Metros	
	Tempo:	Segundos	
Mesoescala	Tamanho:	Quilômetros	
	Tempo:	Minutos para horas	
Macroescala	Sinótica	Tamanho:	100s para 1000s km
		Tempo:	Dias
	Global	Tamanho:	Global
		Tempo:	Semanas para Anos

Figura 6 Escalas temporais e espaciais de abordagem de fenômenos meteorológicos.

Um dos aspectos de maior destaque nessas relações se dá por meio da interface continente-oceano, que corresponde às inúmeras interações existentes entre fenômenos atmosféricos e climatológicos, sendo essas denominadas teleconexões, que significa uma conexão a distância que, para

a climatologia, implica uma análise de estruturas globais atmosféricas, geradas por meio de anomalias locais e que influenciam os climas em regiões remotamente conectadas²⁹.

A atmosfera e os oceanos são fortemente acoplados. A interação atmosfera-oceano ocorre em diversas escalas em espaço e tempo por meio da troca de energia, matéria e dinâmica (quantidade de movimento).

O oceano é definido como uma característica física do nosso planeta, cobrindo aproximadamente 73% da superfície da Terra. Pode-se considerar que existe apenas um grande oceano com várias bacias oceânicas, como a do Pacífico Norte, Pacífico do Sul, Atlântico Norte, Atlântico Sul, Indiana, Antártico e Ártico. São parte integrante do ciclo da água e estão conectados com todos os reservatórios da Terra por meio dos processos de evaporação e precipitação.

Ao longo dos oceanos há um sistema de circulação interconectado alimentado pelos ventos, marés, a força de rotação da Terra (efeito inercial de Coriolis), a Lua, o Sol e diferenças de densidade da água. O formato dos oceanos e as massas de terras adjacentes e a força gravitacional da Lua influenciam significativamente a direção da circulação da água. Essa "correia transportadora oceânica" movimenta a água através de todas as bacias oceânicas, transportando energia (calor), matéria e organismos ao redor do mundo. Mudanças nas circulações oceânicas têm considerável impacto no clima e causam mudanças nos ecossistemas³⁰.

A maior parte da água da Terra (97%) está nos oceanos e tem propriedades específicas, como sais, densidade, condutividade elétrica, etc. O equilíbrio do pH é vital para a saúde dos ecossistemas marinhos e é importante para controlar a taxa pela qual absorve e armazena as mudanças no dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, sendo o maior reservatório integrante do ciclo do carbono na Terra, absorve grande parte do CO_2 e metano (CH_4) que são adicionados da atmosfera.

As interações oceânicas e os processos atmosféricos controlam o tempo e o clima em virtude do domínio da energia, água e carbono na Terra. Essas flutuações no sistema oceano-atmosfera podem resultar em mudanças no clima, que, por sua vez, de forma cíclica, causam mais mudanças no oceano e na atmosfera. Portanto, essas interações têm significativas consequências física, químicas, biológicas, econômicas e sociais.

Em larga escala, os oceanos moderam o tempo e o clima global pelo fato de absorver a maior parte da radiação solar que atinge a superfície da Terra. A troca de calor entre o oceano e a atmosfera comanda o ciclo hidrológico e a

circulação oceânica e atmosférica, e isso pode resultar em eventos climáticos, anômalos ou extremos, em escala global, impactando padrões de chuva e seca.

As teleconexões são um importante mecanismo para transporte de energia de umidade manifestado como ciclos em um dado local. Uma característica das teleconexões e da circulação relacionada é que elas ocorrem com padrões repetitivos de variabilidade espaço-temporal, conhecidos como modos. Um modo é uma estrutura espacial com pelo menos dois centros de ação fortemente acoplados, sendo sua polaridade e amplitude representadas pelo índice do modo. Vários modos atmosféricos perceptíveis são reconhecidos como fatores que produzem influências cíclicas em variáveis hidroclimáticas³¹.

O exemplo mais marcante da variação interna do sistema climático, em escala interanual, é o fenômeno *El Niño* Oscilação Sul (ENOS), que é uma oscilação do sistema (interação) oceano-atmosfera.

O fenômeno ENOS consiste em duas componentes. A primeira componente (principalmente oceânica), conhecida como *El Niño*, é um fenômeno de larga escala de anomalia positivas de temperatura da superfície do mar (TSM) em que uma corrente oceânica quente aflora ao longo da costa do Equador e Peru (Figura 7). Ocorre em intervalos de três a sete anos.

Igualmente intensas, as anomalias na circulação dos oceanos e da atmosfera no clima global são associadas com tais mudanças na temperatura da superfície do mar equatorial. Um evento de *El Niño* tem duração aproximada de, em média, 7 a 18 meses.

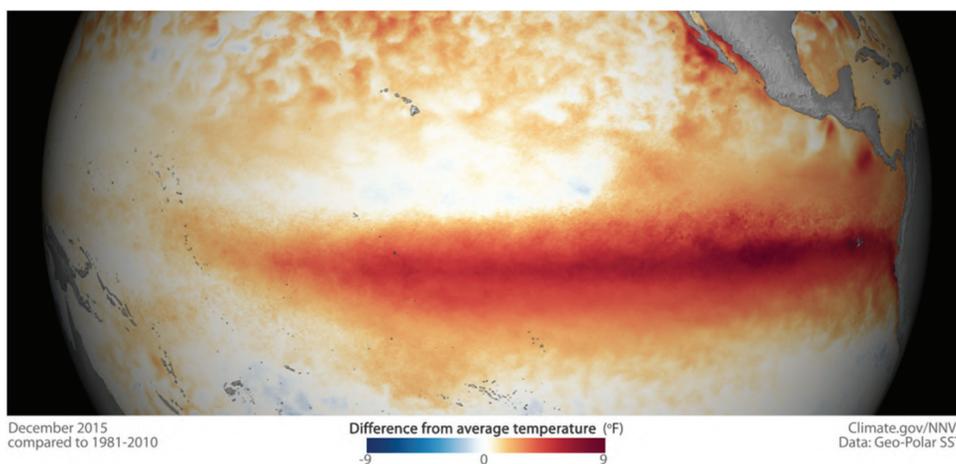


Figura 7 Representação de anomalias de temperatura do Pacífico durante o *El Niño*: dezembro de 2015 em comparação com 1981-2010. Fonte: OSE/NOAA³¹.

O *La Niña* representa um fenômeno oceânico-atmosférico com características opostas ao *EL Niño*, e que caracteriza-se por um esfriamento anormal nas águas superficiais do Oceano Pacífico Tropical. Em condições de normalidade, a TSM do Oceano Pacífico se aproxima da temperatura de um evento de *La Niña*.

O segundo componente do ENOS, a Oscilação Sul (OS), é associado com largas mudanças de massa de leste para oeste na atmosfera tropical e entre o oeste e o leste do Oceano Pacífico. Bjerknes, em 1964, foi um dos primeiros cientistas a mostrar a possível conexão entre os dois fenômenos e que eles podem ser considerados dois aspectos de uma oscilação em escala global no sistema combinado oceano-atmosfera³¹.

Como observado, um significativo exemplo da interação continente-atmosfera-oceano é o ENOS, que causa importantes mudanças nos padrões de tempo global porque altera os padrões de temperatura da superfície do mar no Pacífico.

A Figura 8 apresenta as TSM, em valores absolutos, para as condições de *La Niña*, condições normais e condições de *El Niño*.

Nota-se, na Figura 8, que a temperatura superficial do mar sob o domínio de *La Niña* apresenta anomalias negativas superiores à 1,5 °C. Enquanto que em condições de *El Niño*, as anomalias positivas de temperatura podem superar 3 °C na região tropical do oceano Pacífico.

Em termos de valores absolutos, tanto sob domínio de uma *La Niña* quanto em condições de neutralidade, a TSM está na faixa de 20°C. Enquanto, sob a condição de *El Niño*, essa temperatura pode ser da ordem de 29°C em algumas regiões tropicais do Pacífico.

Nos mecanismos de interação do sistema oceano-atmosfera, é sabido que a atmosfera influencia o oceano, principalmente por meio de anomalias exercidas pelo estresse dos ventos de superfície (força de arrasto), enquanto o oceano, por sua vez, influencia a atmosfera principalmente por meio de anomalias na TSM associadas a fluxos ascendentes de calor sensível e latente.

As mudanças de pressão influenciam os padrões de vento. O estado médio em condições de neutralidade da atmosfera sobre o Pacífico tropical apresenta convecção e precipitação sobre a Indonésia, ventos de baixo nível do leste (os ventos alísios que sopram de leste a oeste) e ventos de oeste do alto-nível, como expressa a Figura 9a, acerca das condições neutras no Oceano. Estes são os componentes básicos da circulação de Walker sobre o Pacífico.

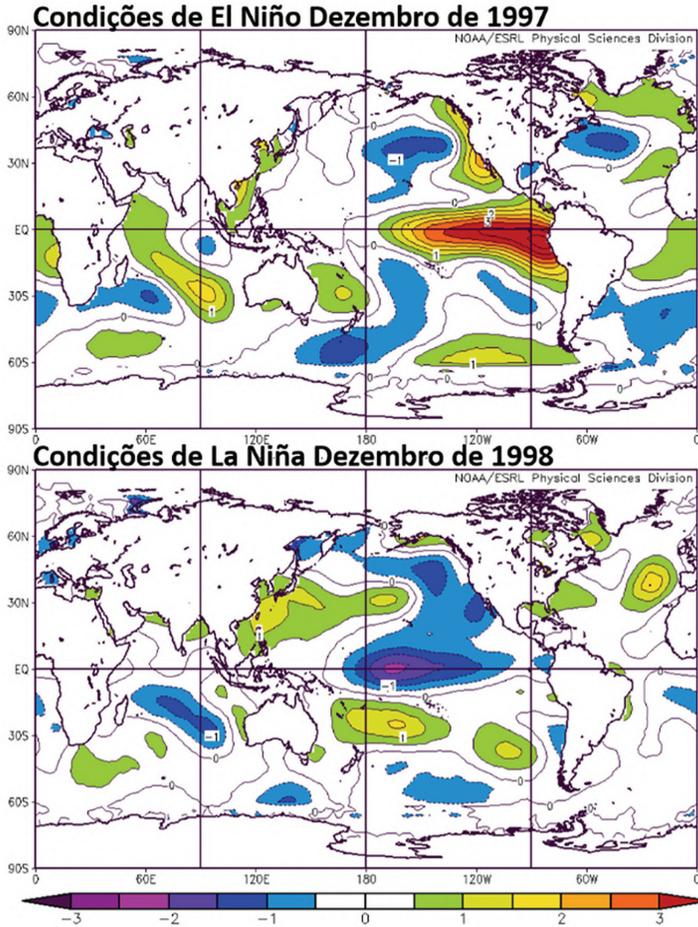


Figura 8 Anomalias de Temperatura da superfície do oceano em $^{\circ}\text{C}$ para condições de *El Niño* e *La Niña*, respectivamente. Fonte: ESRL/PSD/NOAA³².

Durante condições de ENOS, as regiões, central e leste do oceano Pacífico se aquecem, enquanto a região oeste fica levemente mais fria e a convecção aumenta sobre o leste e central equatoriais do Oceano Pacífico, mas é reduzida sobre o lado oeste (Figura 9b).

Entretanto, durante as condições de *La Niña*, as águas no Pacífico central e leste equatorial são mais frias que o normal e a convecção é reduzida sobre essas regiões, enquanto a convecção sobre a área oeste é incrementada. A chamada condição normal representa uma situação intermediária entre os episódios de *El Niño* e *La Niña*, contudo, melhor se assemelha a uma condição de fraca *La Niña*³⁴.

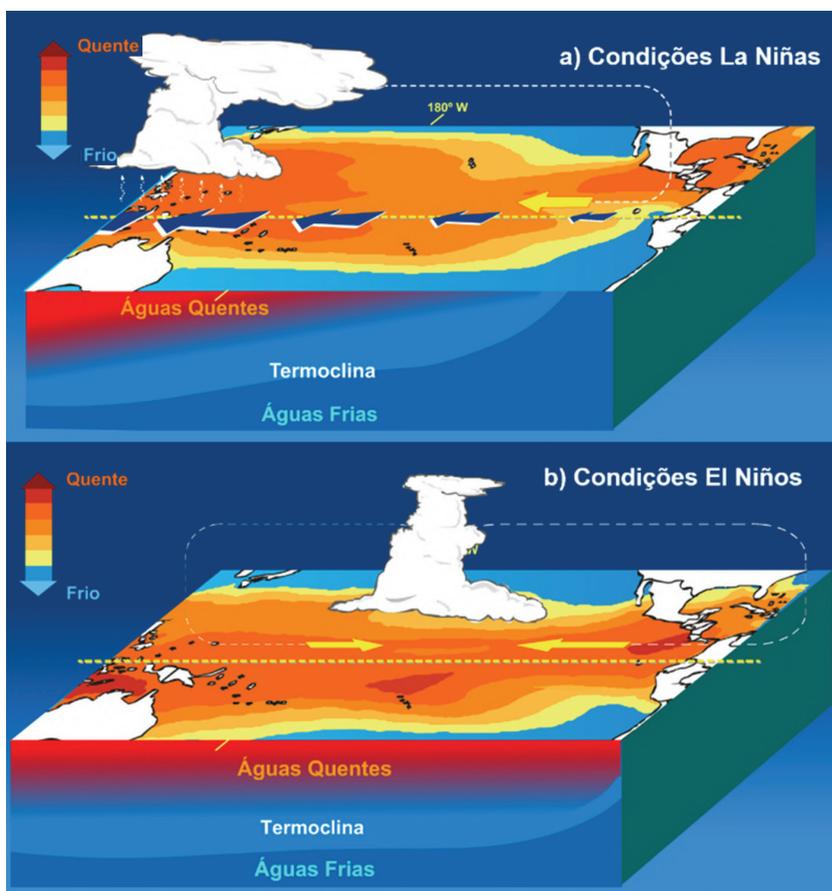


Figura 9 a) Estado médio das temperaturas do oceano, precipitação, pressão e ventos sobre o Pacífico durante condições em condições de La Niña ou próximas a neutralidade. b) Estado geral do oceano e atmosfera durante as condições de *El Niño*. Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE.

O ENOS é, provavelmente, o mais amplamente reconhecido evento cíclico de alta frequência associado com a circulação atmosférica, que tem sido sugerido como a maior fonte de variabilidade natural no sistema climático da Terra^{31,35}. Tal aspecto é relevante para a hidroclimatologia, uma vez que enfatiza a relação entre o sistema climático e o ciclo hidrológico, bem como a recorrência de eventos, como inundações e secas, além de outros fenômenos climatológicos.

As anomalias negativas (menor perda) de ROLE ocorrem sobre o Pacífico durante os *El Niños*, em função da maior concentração de vapor d'água (umidade), o principal gás de efeito estufa, os níveis inferiores da troposfera (camada limite) e maior cobertura de nuvens sobre a região de águas anomalamamente quentes.

Durante os eventos de *La Niña*, ocorre o contrário, e o efeito estufa se enfraquece, fazendo com que a região de águas frias perca mais ROLE. Ou seja, o sistema Terra-atmosfera pode sofrer, naturalmente, uma variação de temperatura de cerca de 1,5°C entre fases fria e quente do ENOS.

As teleconexões são facilmente identificáveis junto aos padrões de variabilidade climática, contudo, nota-se que apenas as variáveis referentes à TSM, e suas conexões continentais, apresentam forçantes positivas com outros dados climatológicos²⁹.

O dinamismo atmosférico e climático pode dificultar seu entendimento, em tempo, por meio de séries longas de dados. A previsibilidade de longo prazo pode existir até determinado ponto, uma vez que alguns sistemas atmosféricos apresentam variações lentas (interanuais, estacionais, mensais, etc.) e influências em variáveis hidroclimáticas em escala global. Para tanto, vale ressaltar tais implicações dinâmicas junto ao regime de precipitações em áreas da América do Sul, conforme estudos apontam desde a década de 1980²⁹.

Inúmeras abordagens são utilizadas a fim de compreender as detecções desse dinamismo por meio de correlações espaciais e temporais. As teleconexões, nesse sentido, representam as correlações quantitativas entre diferentes regiões geográficas.

A ciência climatológica se utiliza das teleconexões por meio de correlações entre as anomalias climáticas temporais e espaciais, como o *ENOS*, TSM, ciclos de escalas decadais, entre outros, junto às ocorrências geográficas distantes entre si. Tal processo promove o encolhimento virtual entre diferentes regiões do planeta, o que favorece o melhor entendimento dos locais e suas respectivas conectividades espaço-temporais³⁴.

Com relação a impactos econômicos ligados à produção pesqueira, alguns pesquisadores³⁶ apresentaram uma síntese dos resultados obtidos a partir das análises de registros climáticos e dados que descrevem aspectos biológicos da variabilidade no grande ecossistema marinho no Oceano Pacífico, com o objetivo de destacar os impactos das conexões entre flutuações climáticas interdecadais e a variabilidade ecológica dentro e ao redor da bacia do Pacífico Norte.

Estas pesquisas apontam para rápidas mudanças nos níveis de produção das principais populações de peixes comerciais da América do Norte têm sido ligadas a variabilidades interdecadais do clima por meio de oscilações de temperatura oceânica^{36, 37, 38,39}.

VARIABILIDADE NATURAL DO CLIMA

O clima terrestre tem variado significativa e continuamente em escalas de tempo, variando de anos a períodos glaciais e a idade da Terra. Existem evidências de que o clima já esteve mais quente do que é hoje durante o Holoceno, passando por uma fase fria conhecida como pequena Era do Gelo^{40, 41, 42}.

Análises de cilindros de gelo e dados de conchas de moluscos sugerem que entre 800 d.C. e 1300 d.C., as regiões em torno da Groenlândia (*Greenland*, Terra Verde) experimentou um clima relativamente ameno vários graus Celsius acima do normal no Atlântico Norte, com árvores e plantas herbáceas e algumas culturas sendo cultivadas, como cevada, e criação de gado.

Esses estudos do clima do passado são possíveis por meio da análise de registros históricos naturais, chamados de *proxy* (anéis de árvores, espeleotemas, cilindros de gelo, deposição de sedimentos marinhos, etc.), e por meio de sensores e estações de coleta de dados. Esses registros são transformados em séries temporais (ST). Uma ST é uma sequência de observações de uma variável ao longo do tempo, ou seja, é uma sequência de pontos em ordem sucessiva, geralmente ocorrendo em intervalos uniformes.

Na área das ciências ambientais, estudos de ST oceânicas, atmosféricas, climáticas e hidrológicas têm reforçado significativamente a capacidade de compreensão e previsão de fenômenos cíclicos que se repetem em escala interanual (por exemplo, *El Niño*, Oscilação Decadal do Pacífico) para escalas milenares (por exemplo, ciclos de Milankovitch).

Pesquisadores⁴³ examinaram, nas regiões tropical e extratropical, o acoplamento oceano-atmosfera e as interações entre as bacias oceânicas. A variabilidade das características dessas circulações pode ter fortes impactos regionais na temperatura e precipitação e criar ciclos definidos nessas variáveis.

Como discutido, o fenômeno *El Niño* é o principal responsável por variações hidroclimáticas em escala interanual, sendo considerado a maior fonte de variabilidade natural no sistema climático da Terra. A Figura 10 apresenta a série temporal, de 1950 a 2016, para os registros de anomalias de TSM na região equatorial leste do oceano Pacífico, conhecida como Niño 3 (5° N-5° S, 150° W-90° W) próxima à costa da América do Sul.

Na Figura 10 observamos a alta variabilidade na TSM, com amplitudes que superam 5°C, o que é bastante significativo para temperatura do oceano. Destacam-se os fortes eventos de *El Niño* de 1972-1973, 1982-1983, 1997-1998 e 2015-2016; e os eventos de *La Niña* de 1955-1956, 1974-1975, 1988-1989 e 1999-2000.

As TSM do Oceano Pacífico apresentam uma configuração com variações de prazo mais longo, semelhante ao *El Niño*, denominada de Oscilação Decadal do Pacífico (ODP).

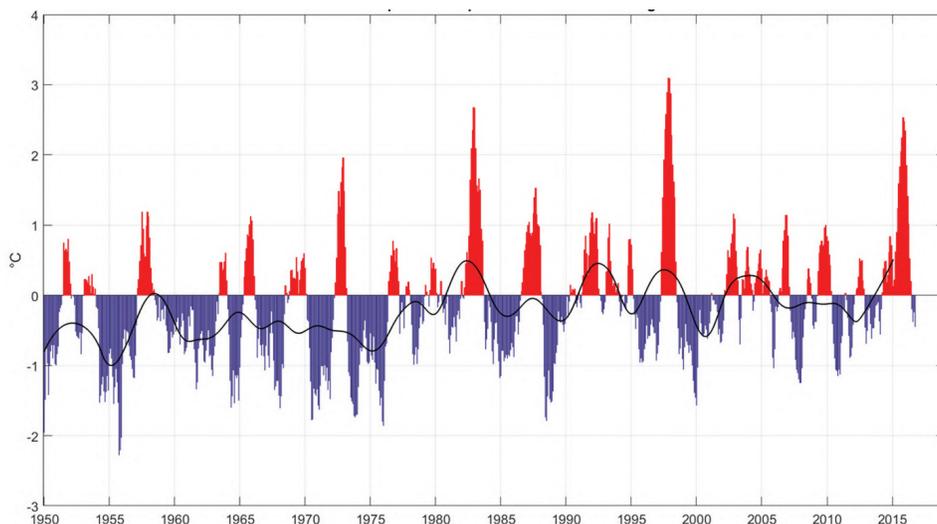


Figura 10 Registros mensais de anomalia de TSM na região equatorial oeste (5° N-5° S) (150° W-90° W) do oceano Pacífico, conhecida como região Niño 3. *Fonte:* Adaptado de NNVL/NOAA³³.

Assim como o fenômeno ENOS, as fases extremas da ODP foram classificadas como quentes ou frias, conforme definidas pelas anomalias de TSM e pressão entre o Pacífico Leste e Oeste acima de 20°N .

Quando as TSM são anormalmente frias no Pacífico Norte e aquecidas ao longo da Pacífico Nordeste, e quando as pressões do nível do mar estão abaixo da média sobre o Pacífico Norte, a ODP tem valor positivo. Quando os padrões de anomalia climática são invertidos, com anomalias de TSM quentes no interior e anomalias frias ao longo da costa Nordeste da bacia oceânica, ou acima da média das pressões do nível do mar sobre o Pacífico Norte, o índice tem valor negativo, como pode ser observado na Figura 11.

Observa-se na Figura 11 que de 1896 a 1910, de 1926 a 1944 e de 1976 a 1998 foram períodos de *El Niños* mais intensos, persistentes e mais frequentes. Enquanto nos outros períodos observam-se eventos de *La Niña* mais fortes, persistentes e mais frequentes. Esses períodos são conhecidos como fases quente e fria da ODP, respectivamente.

Um dos principais e mais completos índices de monitoramento do ENOS é o Índice Multivariado de ENOS (*Multivariate ENSO Index – MEI*). O MEI baseia-

se nas seis principais variáveis observadas sobre o Pacífico tropical, que são: pressão do nível do mar (PNM), componentes zonal (U) e meridional (V) do vento de superfície, temperatura da superfície do mar (TSM), temperatura do ar na superfície (A) e fração de nebulosidade total da atmosfera (C).

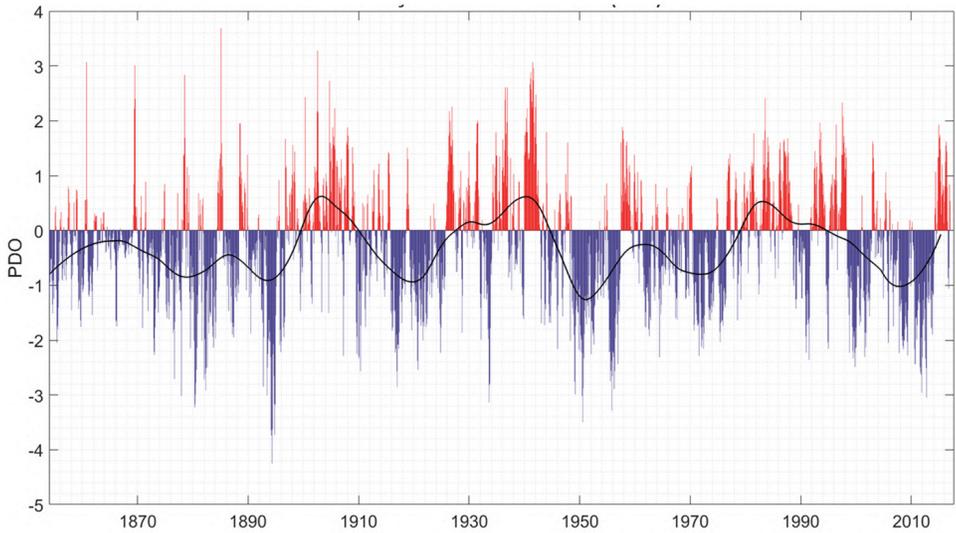


Figura 11 Índice da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). *Fonte:* Adaptado de NNVL/NOAA³³.

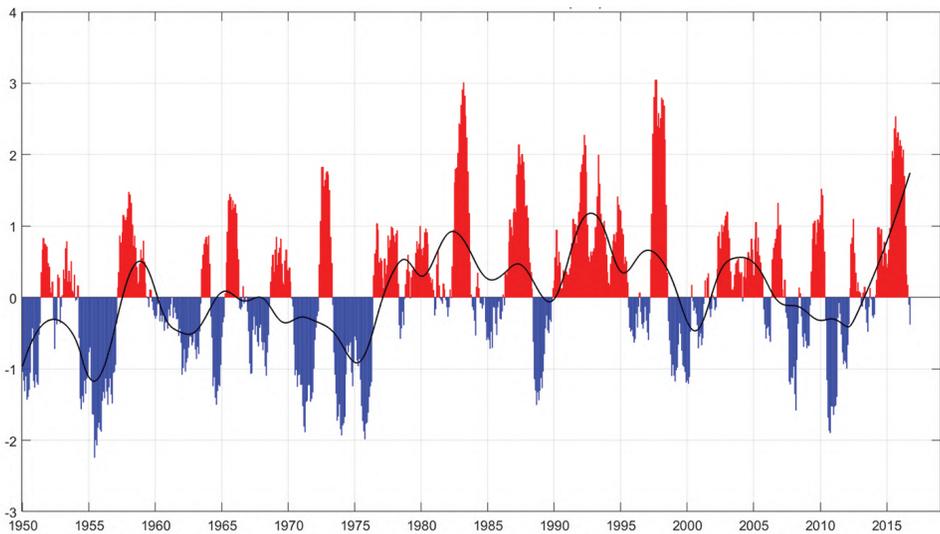


Figura 12 Valores mensais do Índice Multivariado de ENOS. *Fonte:* Adaptado de NNVL/NOAA³³.

O Índice da Oscilação Sul (Southern Oscillation Index – IOS) é um índice padronizado que se baseia nas diferenças de pressão observadas ao nível do mar entre Taiti e Darwin, Austrália. O IOS é uma medida das grandes flutuações na pressão do ar que ocorrem entre o Pacífico tropical ocidental e oriental (ou seja, o estado da Oscilação do Sul) durante os episódios de *El Niño* e *La Niña*. Em geral, as séries de tempo suavizadas do IOS correspondem muito bem às mudanças nas temperaturas oceânicas em todo o Pacífico tropical oriental.

A fase negativa do IOS representa uma pressão de ar abaixo do normal no Taiti e uma pressão de ar acima do normal em Darwin. Períodos prolongados de valores negativos (positivos) de IOS coincidem com águas oceânicas anormalmente quentes (frias) no Pacífico tropical oriental, típicas dos episódios de *El Niño* (*La Niña*). A Figura 13 apresenta valores mensais do IOS de janeiro de 1951 a outubro de 2016.

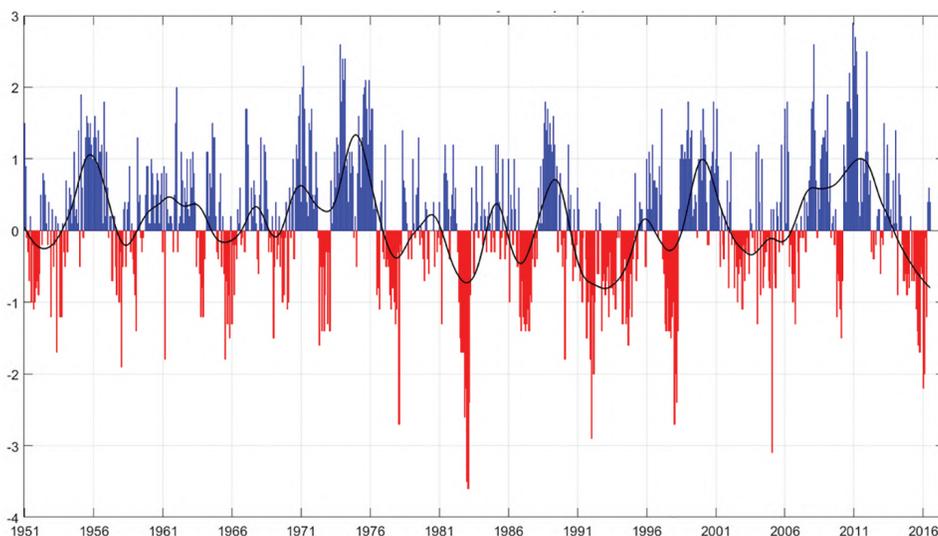


Figura 13 Valores mensais do Índice da Oscilação Sul (IOS), que consiste na diferença de pressão superficial padronizadas entre o Taiti (17° S, 149° O) e Darwin, na Austrália (12° S, 131° L). *Fonte:* Adaptado de NNVL/NOAA³³.

As teleconexões podem ser observadas em diferentes trabalhos que apontam para a análise climática em diferentes regiões da Terra. Na América do Sul existem estudos que compreendem o entendimento das correlações espaciais entre os oceanos Pacífico e Atlântico e suas respectivas influências na dinâmica climática regional, como o efeito da TSM do Oceano Atlântico durante períodos de verão⁴⁴.

Durante os períodos de ocorrência de aquecimento das águas oceânicas, a região equatorial desses oceanos pode influenciar a dinâmica pluviométrica na região sudeste da América do Sul (SESA). Ao mesmo tempo, as águas do Oceano Atlântico, na porção equatorial, encontram-se aquecidas e o efeito *El Niño* é menor, o que implica a correlação entre os oceanos e o clima continental por meio de anomalias⁴⁴.

Além disso, o aquecimento do Atlântico equatorial enfraquece as correntes baixas (jatos de baixos níveis) que transportam a umidade proveniente da Amazônia para o SESA, limitando, assim, a disponibilidade de umidade para a região e, dessa forma, alterando a dinâmica pluviométrica⁴⁴.

Um estudo realizado por pesquisadores da Argentina⁴⁵ apresentou a correlação entre as porções tropical e extratropical oceânicas e a ocorrência de chuvas intensas no país. Os autores apontam uma série de anomalias que podem influenciar o grande volume de chuvas em regiões distintas da Argentina, contudo, os resultados mostraram forte conexão entre as chuvas intensas e as temperaturas superficiais oceânicas, sendo, em diferentes áreas do país, com maior intensidade nas correlações pluviométricas.

As análises de variação temporal da TSM em diferentes regiões dos oceanos sugerem uma correlação entre a precipitação e a temperatura oceânica, sendo estas associadas, principalmente, à temperatura oceânica do Pacífico. Além disso, a consideração acerca de diferentes escalas na dinâmica climática é apontada como uma nova necessidade de abordagem a fim de identificar as correlações existentes em escala planetária e regional⁴⁵.

As chuvas associadas ao efeito *El Niño* também foram correlacionadas, em escala regional, ao efeito dos oceanos Atlântico e Pacífico por meio de suas anomalias cíclicas multidecais e da espacialização da precipitação associada a essas anomalias.

A partir daí, nota-se que, quando correlacionadas ao período de temperaturas baixas da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), são mais acentuadas e apresentam distribuição espacial horizontal disposta em áreas mais abrangentes, ou seja, apresentam-se mais dispersas no espaço do que nos períodos em que as águas do oceano, nessa mesma região, se encontram mais aquecidas⁴⁶.

A OMA e a Oscilação Sul (OS) apresentam-se correlatas, uma vez que os extremos de temperatura do Pacífico mostram-se fortemente conectados à oscilação do Atlântico, o que corrobora para um corredor atmosférico instaurado entre esses oceanos (no continente da América do Sul),

promovendo, dessa maneira, chuvas intensas condicionadas às anomalias climáticas⁴⁶. A Figura 14 apresenta a ST da OMA no período de 1948-2016.

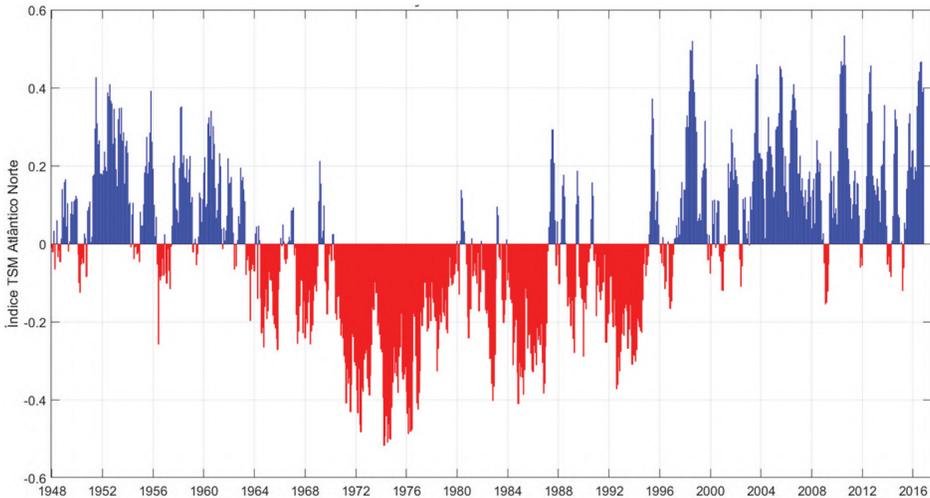


Figura 14 Índices da Oscilação Multidiedadal do Atlântico. *Fonte:* Adaptado de NNVL/NOAA (s/d).

Em associação às anomalias, nota-se que as chuvas se apresentam mais intensas e concentradas em regiões da América do Sul quando os extremos de TSM do Pacífico, em sua porção leste-equatorial, são reforçados pela TSM do Atlântico-equatorial⁴⁶.

Nessa porção oceânica, pode-se formar uma piscina aquecida em meio ao Pacífico. A região limítrofe dessa piscina quente formada pelos mecanismos de aquecimento do Pacífico é o principal fator condicionante do ENOS nessas áreas, que correspondem à borda oriental do Pacífico oeste-equatorial e onde a atmosfera conduz mudanças na temperatura superficial oceânica por meio da interface atmosfera-oceano comprovadas a partir de resultados de instabilidade³⁵.

A previsibilidade das teleconexões e a elaboração de cenários diante das anomalias climáticas em diferentes escalas estabelecem um nível de complexidade significativo em função de suas conectividades e até de seu caráter heterogêneo de influência.

Diante das relações e dos diferentes métodos de análise e das bases de dados, o contexto atual quanto às predições (cenários) aponta para melhor compreensão dessas anomalias, como o ENOS, por meio de métodos quantitativos dinâmicos, uma vez que algumas ferramentas não são substan-

ciais para sua averiguação ou, se apresentam com problemas dadas as falhas em longas séries de dados³⁵.

Outro aspecto relevante da dinâmica climática é sua relação com teleconexões em diferentes períodos do ano (estações), como o período de verão na América do Sul, que apresenta flutuações ao longo do tempo em função da ODP. Primeiramente, as fases do ENOS estão associadas à ODP, e esta, por sua vez, apresenta fases distintas (elevada, normal e baixa) de anomalias e, por consequência, tais anomalias podem contribuir para a ocorrência de variações pluviométricas na região, sendo que, quando as teleconexões entre o ENOS e a ODP, em suas respectivas fases, são significativas, as chuvas mostram-se com valores elevados. Contudo, quando as chuvas apresentam valores baixos (anuais), os valores do ENOS e da ODP apresentam-se desconexos, o que promove a necessidade de novo entendimento do ENOS a partir das diferentes fases encontradas na ODP⁴⁷.

Sendo assim, a gênese climática apresenta papel de destaque na dinâmica de planejamento em diferentes setores de atuação social, política e econômica, em que a pluviometria pode representar, por seus aspectos quantitativos e qualitativos, melhor compreensão temporal da atmosfera e em diferentes escalas, como, por exemplo, no planejamento territorial, na construção de barragens, adequação de plantio e muitas outras situações.

CLIMATOLOGIA DINÂMICA: BREVE DISCUSSÃO

Sabendo que as alterações climáticas representam uma das principais temáticas no que concerne à Climatologia, a variabilidade climática apresenta-se como uma das principais abordagens acerca dos estudos climáticos em diferentes pesquisas quantitativas e qualitativas.

Os registros meteorológicos, oceânicos e glaciais demonstram considerável variabilidade em todos os intervalos temporais. A variabilidade temporal é uma característica inerente do clima e do ciclo hidrológico, e evidências empíricas mostram que a maioria dos processos hidroclimatológicos, em longos prazos, desvia de estacionariedade.

A discussão de tais variações é atribuída, principalmente, aos elementos climáticos temperatura do ar e pluviosidade, uma vez que a climatologia de determinada região é comumente definida de acordo com esses elementos.

Entretanto, é necessário esclarecer que as variações climáticas sempre existiram. Os climas são estados dinâmicos e de constantes mudanças na atmosfera que interagem com os oceanos e continentes em diferentes escalas

de tempo e de espaço. O estudo dos climas tem por finalidade analisar os processos atmosféricos junto aos seus valores médios para compreender se correspondem a uma evolução observável em longos períodos de tempo.

Algumas discussões podem ser norteadas a partir da Organização Meteorológica Mundial (OMM), que apresenta uma série de análises integradas a partir de informações e dados hidroclimáticos.

Nos estudos de variabilidade climática há um fator complicador a mais, em decorrência da ausência de uma distinção universalmente aceita entre os termos “variabilidade” e “mudanças”¹³. Ambos os termos se referem a flutuações no clima em relação a um estado esperado ou ao estabelecimento de valores médios para os dados climáticos. Entende-se que variabilidade se refere a oscilações, ou padrões de flutuações, acerca de algum valor médio especificado, enquanto mudanças se referem a tendências seculares produzindo um deslocamento com relação à média.

A análise climática, para tanto, pode ser tratada de maneira dinâmica, ou seja, que não fique somente no caráter analítico-separativo e que busque a gênese dos fatos¹⁰.

A observação dos elementos atmosféricos, de sua gênese e sua dinâmica colaboram para uma análise mais aprofundada acerca dos climas, bem como pode contribuir para uma visão mais abrangente e menos individualizada, uma vez que recorre à Climatologia Dinâmica para melhor compreender esses processos.

Por se tratar de uma análise mais abrangente e integrada, a Climatologia Dinâmica se insere em um contexto amplo dos fenômenos atmosféricos e suas interferências, fato este que pode ser elencado a partir do tratamento dinâmico do clima na própria análise regional, que é válida em quaisquer escalas geográficas observadas¹⁴.

O Brasil, nesse contexto, apresenta condições climáticas bem definidas, como o clima árido do Nordeste e úmido no Sudeste e região da Bacia Amazônica. Em termos de condições de Tempo, apresenta uma sucessão de eventos extremos pluviométricas, como no polígono das secas nordestino e os eventos extremos na porção meridional do país⁹.

Ressaltam-se tais fatores a partir da compreensão dos sistemas atmosféricos presentes nessa faixa latitudinal próxima ao trópico de Capricórnio, onde há interações entre sistemas tropicais e extratropicais, além da ZCAS (Zona de Convergência da América do Sul) e de fenômenos frontogenéticos de massas de ar que atuam nessa região^{9, 15}.

A ZCAS é configurada por uma região de convergência de ventos que se associa à América do Sul por meio de dois processos físicos. Sendo o oceano Atlântico responsável pelo fornecimento de umidade para a convergência.

Os processos físicos são: I) Termodinâmico, uma vez que, devido ao aquecimento do continente sulamericano no verão, forma-se uma célula de circulação direta com movimentos ascendentes, baixa pressão e convergência à superfícies, e alta e divergência nos níveis superiores da atmosfera (AB – Alta da Bolívia). II) Dinâmico, uma vez que sistemas frontais (frentes frias) que se deslocam do sul em direção ao Equador, ficam ancoradas pela célula direta e permanecem estacionárias por um período de tempo de algumas semanas, criando a ZCAS com orientação Noroeste-Sudeste¹⁵.

Sendo assim, a existência de possíveis alterações climáticas corresponde a um dos principais palcos de discussão referentes ao clima. Deve-se ter em mente que distinções apenas podem ser feitas relativas à escala temporal de interesse. Em escalas temporais longas, a mudança é vista como um exemplo de variabilidade climática.

Diversas publicações recentes (artigos, dissertações, teses, etc.) envolvem as possíveis tendências de alterações climáticas no Brasil e em vários outros países. Nota-se que diversos métodos de análise (quantitativa e qualitativa) estão associados aos termos de alterações climáticas e que as precipitações pluviométricas se inserem com grande destaque^{16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23}.

Nessas publicações, os autores destacam uma série de mecanismos que possivelmente se relacionam com as variações nos regimes pluviométricos de diferentes ambientes, com séries histórico-temporais diversificadas, tratamentos quantitativos variados e modelagens computacionais.

Dentre esses, vale ressaltar as abordagens qualitativas, uma vez que, a fim de representar a dinâmica dos processos de possíveis alterações climáticas, muitos desses compreendem regiões densamente ocupadas, como grandes centros urbanos, ou áreas abrangentes cujo caráter regional de escolha foi amplamente utilizado como critério de delimitação espaço-temporal¹⁴.

Embora conceitos como anomalia e mudança climática sejam fundamentalmente distintos, não é possível dizer que ocorrem de maneira independente e que entre mudanças climáticas de curto prazo sofrem flutuações em algumas dezenas de anos²⁴.

As anomalias e as mudanças climáticas podem produzir efeitos que atuam em diferentes intensidades, além de se tornar mais complexo compreender e interpretar até que ponto as condições ambientais encontradas, em um

local da superfície terrestre, durante um intervalo de tempo, etc., podem representar uma anomalia e/ou mudança climática, além de compreender qual é o papel antropogênico nesse processo.

A partir dessas observações e da discussão dos termos associados às alterações climáticas, pode-se ressaltar a importância da compreensão dos elementos climáticos para fins de pesquisa e que estes atendam a diferentes requisitos e até critérios teórico-metodológicos, que podem ser observados em diferentes áreas do conhecimento, sendo aplicável à hidrologia, à geografia, à meteorologia, dentre outras.

As alterações climáticas preconizam diferentes efeitos associados à ação humana no planeta. Para tanto, a ocorrência de fatores como cenários referentes à evolução das temperaturas terrestres representa um dos efeitos de grande destaque junto a tais estudos, como apontado pelos relatórios do IPCC (*International Panel for Climate Changes*) e pelo relatório de Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança Climática no Brasil²⁵.

Os estudos agregam, principalmente, a concentração de gases estufa (GEEs), como o CO₂, que teria uma relação entre sua concentração na atmosfera e o potencial de aumento da temperatura média global em função de seu acúmulo ao longo do tempo.

Contudo, tais cenários não incluem os componentes sistemas climáticos de macroescala, como o Sol, a Lua, oceanos, vulcões e, é claro, água na atmosfera (vapor d'água) e seus processos de *feedback*. Sendo assim, considerando tais dificuldade e limitação dos modelos em representar a complexidade dos fatores climáticos, existe significativas discussões junto à climatologistas.

CLIMA E RECURSOS HÍDRICOS

O impacto dos elementos climáticos, principalmente a pluviosidade junto às bacias hidrográficas, representa um dos elementos de grande importância no uso dos recursos naturais, sendo que os recursos hídricos subsidiam diferentes usos para as populações.

Para os recursos hídricos, as técnicas que envolvem a análise e o planejamento são norteadas por parâmetros estacionários, com séries de vazões homogêneas e com amostras representativas, e por parâmetros não estacionários, que observam alterações climáticas e modificações no uso dos solos²⁶.

O impacto dos climas sobre o setor de recursos hídricos tem grande destaque nos aspectos sociais e ambientais, uma vez que esses estão atribuídos a²⁷:

- A. Abastecimento de água;
- B. Irrigação;
- C. Geração de energia;
- D. Navegação;
- E. Qualidade da água no ambiente;
- F. Inundações.

Outro fator de grande importância para o entendimento dos processos que atuam no ambiente natural é a escala espacial e sua variabilidade. Os processos hidrológicos têm suas escalas organizadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 Escalas espaciais de análise dos processos hidrológicos.
Fonte: Adaptada de BECKER (1992).

Escala	Dimensão (km ²)
Macro	$> 10^4$
Transição α	10^3 e 10^4
Meso	$10 - 10^3$
Transição γ	$10^{-4} - 10$
Micro	$< 10^{-4}$

Sendo assim, os processos hidrológicos estão diretamente associados à dinâmica climática, pois o regime pluviométrico infere diretamente na disponibilidade hídrica e seu escoamento superficial, além de realizar tal processo em diferentes escalas espaciais.

Outro elemento de destaque é sua variabilidade temporal que está associada ao processo de alterações no regime das chuvas e de outros elementos hidroclimáticos. A variabilidade espaço-temporal, portanto, corresponde à gênese dessa relação.

Como as chuvas representam um elemento dinâmico e heterogêneo dos climas, a análise temporal pode subsidiar e, em alguns casos, estimar a vazão em um sistema hídrico, especificamente, em uma bacia hidrográfica. A previsão de vazão corresponde à estimativa do escoamento no tempo, e a predição corresponde à estimativa da vazão com um fator de probabilidade baseado em séries de dados históricas de determinado local²⁷.

As previsões de vazão podem ser realizadas em curto prazo, que se entende com uma antecedência de algumas horas e dias a partir de informações hidrológicas e climáticas conhecidas na ocorrência da vazão. Essa pode ser contínua ou eventual de acordo com a disponibilidade de dados²⁷.

Essa predição pode contribuir para o entendimento de cenários com antecipação de alguns anos sobre o impacto e os efeitos da variabilidade climática e seus efeitos econômicos e sociais.

A previsibilidade pode ainda ser em longo prazo e:

[...] diminuir a incerteza da avaliação econômica de algumas “commodities” relacionadas com a água como: planejamento do preço da energia hidrelétrica, importante para países como o Brasil, Uruguai, Canadá e Noruega, onde grande parte da energia é hidrelétrica; produção agrícola de áreas irrigadas e mesmo irrigadas na medida em que seja possível estimar também a umidade do solo e o gerenciamento de conflitos da água [...] ²⁷.

Diante disso, pode-se observar uma relação entre os recursos hídricos e sua gestão, sendo que, no Brasil, a discussão se dá em meio à natureza impactante e de vulnerabilidade das águas no território, uma vez que os usos múltiplos desses, as mudanças no padrão de ocupação espacial das bacias hidrográficas, bem como a ocorrência de eventos extremos envolvendo os recursos hídricos, se fazem presentes. Em um trabalho referente às modelagens envolvendo predições a respeito das bacias brasileiras, o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação²⁶ aponta para a necessidade de melhorias de gestão dos recursos hídricos que envolvam, dentre outros elementos, a avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea, o cálculo da disponibilidade e da demanda *per capita* das águas e o mapeamento da população que vive em áreas de risco.

Uma das ferramentas utilizadas para observação do impacto junto aos recursos hídricos é o Índice de Exploração de Água (*Water Explotation Index – WEI*), estabelecido, no Brasil, pela Agência Nacional de Águas (ANA), que determina uma situação excelente, ou confortável, quando a exploração de água está no limiar de 10%; entre 10% e 20% de sua capacidade considera-se preocupante; e acima de 20% é considerado um cenário crítico; sendo que, em 40% ou mais, o índice aponta para uma condição de escassez hídrica. Vale ressaltar, ainda, que o volume das águas brasileiras é continental, ou seja, de dimensões muito amplas, e que a capacidade de uso das águas no país é baixa, quando comparada ao seu potencial de uso.

No caso brasileiro, em todos os períodos observados (chuvoso e de estiagem), foram apontadas algumas regiões hidrográficas em situação muito crítica, especialmente no Nordeste e Sudeste do país, conforme se observa na Figura 15.

Diante disso, observar a natureza de tais índices e seus usos se faz necessário, bem como o direcionamento para novas ferramentas que subsidiem a melhoria na gestão das águas.

Tal fato se deve ao número acentuado de impactos junto aos recursos hídricos, bem como à gestão eficiente desses. Para tanto, além de medidas pontuais, como o aproveitamento de águas pluviais, reuso, agricultura sustentável, dessalinização das águas, dentre outras, nota-se a necessidade de sua adaptação diante dos impactos das variações nos regimes hidroclimáticos.

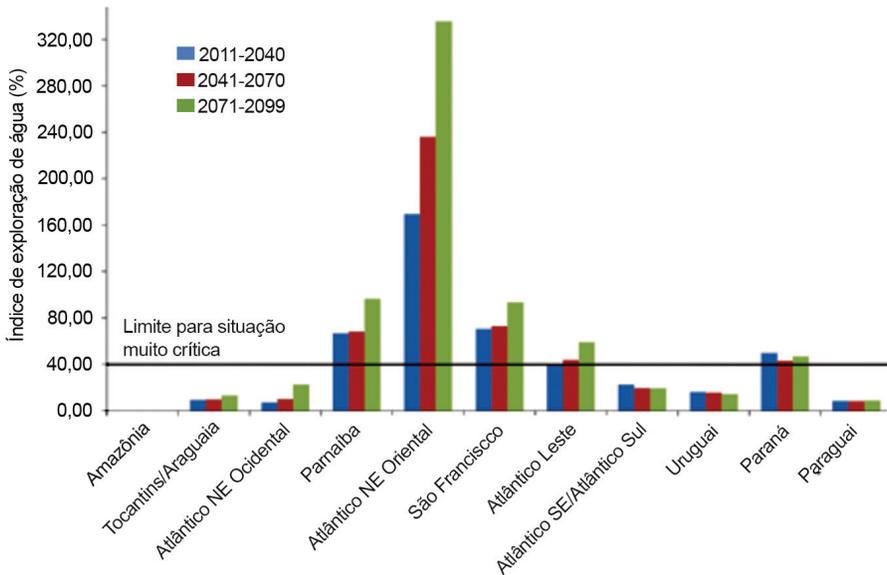


Figura 15 Valores médios para os cenários do WEI, por período. *Fonte:* BRASIL (2016).

APLICAÇÕES TÉCNICAS EM CLIMATOLOGIA

O RCLIMDEX COMO FERRAMENTA PARA ANÁLISE EM CLIMATOLOGIA

Um dos mecanismos utilizados para a interpretação de dados climatológicos é a análise estatística, que, por sua vez, permite avaliar um sistema climático a partir de inúmeras informações (variáveis climáticas) e, dessa forma, observar pressupostos quanto a mudanças num sistema climático⁴⁸.

Uma das características comuns aos trabalhos de análise estatística em climatologia é a admissão de que o caráter externo atmosférico (gases, variabilidade solar, vulcanismo, etc.) influencia a variabilidade climática, contudo, pressupõe ou deve admitir as possíveis alterações em sistemas climáticos para princípios como a incerteza, mesmo que haja vieses estatísticos e matemáticos em séries de dados do clima⁴⁸.

Diversas publicações (artigos, dissertações, teses, etc.) recentes envolvem as possíveis tendências de alterações climáticas no Brasil e em vários outros países. Nota-se ainda que diversos métodos de análise (quantitativa e qualitativa) estão associados aos termos de alterações climáticas e que as precipitações pluviométricas se inserem com grande destaque^{16,17,18,19,20,21,22,49}.

Nessas publicações nota-se uma série de mecanismos em que se observariam possíveis alterações nos regimes pluviométricos de diferentes ambientes, com séries histórico-temporais diversificadas e com tratamentos quantitativos (e modelagens computacionais) variados.

Um dos métodos adotados nos últimos anos é o cálculo de índices climáticos a partir de modelagem computacional estatística, a fim de compreender o comportamento e possíveis tendências dos climas a partir de longas séries de dados, sendo que uma das ferramentas utilizadas para tal análise é o *script* RClimate e o *software* R.

O *software* foi desenvolvido por Byron Gleason, do National Climate Data Center (NCDC), da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), cujo uso é apresentado em diversos workshops e reuniões do CCI/CLIVAR (International Research Programme on Climate Variability and Predictability) sobre elementos climáticos e sua variabilidade, desde 2001⁵⁰.

O *software* R é um ambiente e uma linguagem para computação estatística e gráfica, sendo esse um projeto GNU que representa a criação de um sistema operacional ambientado em um software livre, que é similar à linguagem e ao ambiente S, desenvolvido nos laboratórios Bell (antigo AT & T, agora Lucent Technologies) por John Chambers e colegas.

O R (disponível em www.r-project.org) fornece ampla variedade de modelagens lineares e não lineares, testes estatísticos clássicos, análise de séries temporais, classificação, *clustering*, dentre outras técnicas estatísticas e gráficas, além de fornecer uma rota *open source* para participação nessa atividade, uma vez que seu uso no que tange às alterações climáticas pode representar um avanço na interpretação dos dados climatológicos, já que utiliza dados diários em sua análise e cálculo dos índices.

Além da observação de possíveis alterações nos climas pela precipitação, as variações de temperatura também representam a variação climática.

Estudos⁵¹ realizados na América do Sul, no período de 1960-2000, apontam para possível aquecimento na região, observável a partir da ocorrência de mais noites quentes do que noites frias no verão e no outono (dezembro a maio). Esse estudo foi realizado a partir de 68 estações climatológicas, a fim

de prover um método consistente de análise climática, os autores apontam para a confiabilidade e validação dos dados quanto às mudanças nos regimes extremos climáticos pelo uso do RCLimdex.

Outro trabalho⁵⁰ que utilizou o *software* RCLimdex, realizado em Rio Claro (SP), apontou para o aumento das chuvas consideradas intensas nessas áreas a partir do máximo acumulado em cinco dias consecutivos (Rx5dias) e do número de dias acima de 50 mm de chuva. Os autores reafirmam a tendência de tais eventos se tornarem mais frequentes ao longo do tempo. Além disso, afirmam que existe correlação entre tais eventos interanuais com anomalias no Oceano Pacífico e Atlântico, sendo as regiões Nordeste e Sul do Brasil afetadas negativa e positivamente, respectivamente, nessas influências.

Outro aspecto interessante de tais associações se fez presente em um estudo⁵² que apontou para correlações com a produtividade agrícola e para a presença de tendências positivas junto a um fator de compensação com a perda de água, por evapotranspiração, dos organismos vegetais.

Os índices de máximo de dias consecutivos secos e úmidos, bem como o máximo acumulado de chuvas em um único dia e em cinco dias, expressam, com significativa relevância, um indicativo de acompanhamento diário e unificado sobre as mudanças nos extremos de chuva, enquanto índices para a observação de padrões anômalos individuais no clima e sem a interferência de uma força de grande escala. Os autores afirmam ainda que, para interpretação de padrões de mudança na região sudeste da América do Sul, a observação de padrões de circulação e da média anual de pressão atmosférica nos oceanos se faz necessária⁵⁴.

Com isso, os resultados obtidos subsidiam a identificação de alterações na atividade barométrica, que, a partir de uma análise voltada para a América do Sul, direcionam para o aumento dessas atividades em áreas de alta latitude para o sul, o que pode promover o aprisionamento de alguns sistemas atmosféricos que atuam ali e, dessa maneira, dificultar o deslocamento meridional da massa de ar polar para essas regiões⁵⁴.

Além disso, os autores consideram que, a partir do cálculo dos índices, houve aumento no número de dias com poucos milímetros de chuva em comparação aos dias considerados chuvosos intensos, o que pode ser associado à diminuição da precipitação média em dias chuvosos (acima de 1 mm), considerando ainda que há aumento no número máximo de dias consecutivos úmidos e diminuição no número máximo de dias consecutivos secos a partir de estações climatológicas na América do Sul⁵⁴.

As diferentes aplicações de escala espacial e temporal do *software* RClindex mostram-se adequadas ao tratamento de séries de dados longas, o que pode ser conferido no trabalho⁵² que analisou possíveis tendências de alterações climáticas na região amazônica brasileira próximo às áreas de Manaus (AM), onde, segundo os autores, notou-se o aumento das precipitações totais anuais, nos dias acima de 10, 20 e 50 mm de chuva, bem como aumento da intensidade das chuvas na região. Os autores afirmam ainda que os dias consecutivos secos apresentam tendência de aumento na série histórica, enquanto o máximo de dias consecutivos úmidos apresenta tendência de diminuição no mesmo período de observação⁵².

Um dos elementos discutidos nos trabalhos de aplicação dos cálculos de índices climáticos é a qualidade dos dados obtidos em estações climatológicas, sendo que em alguns trabalhos torna-se claro que a falta de dados pode comprometer o desenvolvimento de pesquisas ou influir diretamente na melhor observação climática por suas variáveis, como apontam⁵⁵ os dados obtidos em estações no estado de São Paulo.

Os autores afirmam, ainda, que alguns índices podem ser contraditórios, como na comparação entre o número máximo de dias consecutivos secos e os dias acima de 20 mm de precipitação, que, no período observado, mesmo com significância negativa para existência de tendência, as chuvas intensas se concentraram em poucos dias⁵⁵.

Nota-se que as conclusões acerca de tendências climáticas na pesquisa⁵⁵ sobre o estado de São Paulo apontam para a necessidade de futuros estudos que observem o uso do solo e o estudo da paisagem, além de ressaltar, dessa forma, a importância de estudos de que expressem a circulação atmosférica em diferentes níveis escalares e outras considerações para a melhor observação de tais tendências.

O uso do RClindex foi bem difundido em vários países, contudo, na realidade brasileira poucos trabalhos estabeleceram dados provenientes da região Sudeste do país, o que favorece para o entendimento do comportamento pluviométrico nessa região a partir de dados obtidos em estações climatológicas que se inserem em uma dinâmica climática semelhante entre si.

O *script* RClindex calcula 27 índices básicos recomendados pela ETCCDMI (*Climate Change Detection Monitoring Indices*) para temperatura e precipitação^{56,57} conforme apresentado no Quadro 1, com os limites estabelecidos pelo usuário. Para o presente projeto, serão utilizados apenas os índices associados à precipitação pluviométrica, que são apresentados, a seguir, em duas partes: a primeira referente à qualidade e à confiabilidade

no tratamento dos dados das estações e a segunda referente aos índices que serão calculados pelo autor no RCLimdex.

Quadro 1 Índices climáticos utilizados no RCLimdex 1.1.

ID	Nome do índice	Definição	Unidade observada
FD0	Dias frios intensos	Número de dias em que a temperatura mínima < 0°C	Dias
SU25	Dias quentes	Número de dias em que a temperatura máxima > 25°C	Dias
ID0	Dias frios	Número de dias em que a temperatura máxima < 0°C	Dias
TR20	Noites quentes	Número de dias em que a temperatura mínima > 20°C	Dias
GSL	Duração das estações do ano	Anualmente, 1° dia de janeiro ao 31° dia de dezembro para o hemisfério norte e do 1° dia de julho ao 30° dia de julho, conta-se o número de dias entre a primeira lacuna de pelo menos 6 dias em que a temperatura média > 5°C e a primeira lacuna depois de 1° de julho (1° de janeiro para o hemisfério sul) de 6 dias em que a temperatura média < 5°C	Dias
TXx	Máximo das máximas	Valor máximo de temperatura máxima registrada no mês	°C
TNx	Máximo das mínimas	Valor máximo de temperatura mínima registrada no mês	°C
TXn	Mínimo das máximas	Valor mínimo de temperatura máxima registrada no mês	°C
TNn	Mínimo das mínimas	Valor mínimo de temperatura mínima registrada no mês	°C
TN10p	Noites frias	Porcentagem de dias em que a temperatura mínima < 10° percentil	Dias
TX10p	Dias frios	Porcentagem de dias em que a temperatura máxima < 10° percentil	Dias
TN90p	Noites mornas	Porcentagem de dias em que a temperatura mínima > 90° percentil	Dias
TX90p	Dias mornos	Porcentagem de dias em que a temperatura máxima > 90° percentil	Dias
WSDI	Indicador de duração de dias mornos	Número de dias em que, nos últimos 6 dias consecutivos, a temperatura máxima > 90° percentil	Dias
CSDI	Indicador de duração de dias frios	Número de dias em que, nos últimos 6 dias consecutivos, a temperatura mínima > 10° percentil	Dias
DTR	Amplitude térmica diária	Diferença média mensal entre a temperatura máxima e a temperatura mínima diárias	°C
RX1day	Máximo de chuva acumulada em 1 dia	Máximo de chuva acumulada em um único dia	mm

Quadro 1 Índices climáticos utilizados no RCLimdex 1.1 (*continuação*).

ID	Nome do índice	Definição	Unidade observada
Rx5day	Máximo de chuva acumulada em 5 dias	Máximo de chuva acumulada em cinco dias consecutivos	mm
SDII	Índice simples de intensidade diária	Total anual de chuva acumulada dividido pelo número de dias úmidos (quando o dia esteve ≥ 1 mm) no ano	mm/dia
R10	Número de dias acima de 10 mm	Número de dias em que as chuvas ≥ 10 mm	Dias
R20	Número de dias acima de 20 mm	Número de dias em que as chuvas ≥ 20 mm	Dias
Rnn	Número de dias acima de nn mm	Número de dias em que as chuvas \geq nn mm, sendo nn o valor de chuvas controlado pelo usuário	Dias
CDD	Dias consecutivos secos	Número máximo de dias em que as chuvas < 1 mm	Dias
CWD	Dias consecutivos úmidos	Número máximo de dias em que as chuvas ≥ 1 mm	Dias
R95p	Dias muito úmidos	Valor total anual de chuvas que estiveram $>95^{\circ}$ percentil	mm
R99p	Dias extremamente úmidos	Valor total anual de chuvas que estiveram $> 99^{\circ}$ percentil	mm
PRCPTOT	Total de chuvas acumuladas em um ano	Valor total anual de chuvas acumuladas nos dias úmidos (dias ≥ 1 mm)	mm

Fonte: Adaptado de ZHANG; YANG (2001).

O entendimento acerca do comportamento dos índices climáticos contribui para a observação de eventos efêmeros ou duradouros em séries históricas. Tais aspectos reafirmam o dinamismo dos climas, uma vez que as interpretações de dados climáticos em séries longas de dados permitem apontar para eventos extremos de chuvas (ou temperaturas) nessas.

O *software* R e o *script* RCLimdex podem ser obtidos no site: etccdm1.pacificclimate.org. A obtenção do *script* RCLimdex está associada ao contato com seus desenvolvedores (Figura 16).

Software

The software packages for data homogeneity (RHtestsV4) and indices calculation (RCLimDex) are based on a very powerful and freely available statistical package R which runs under both MicroSoft Windows and Unix/Linux. Please see the Quick Guide below to download and install R:

- [Quick Guide to download and install R](#)

The software packages are available for download.

Contact Yang.Feng@ec.gc.ca for a user name and password

Data Homogenization

Indices calculation
RCLimDex
 The RCLimDex provides a friendly graphical user interface to compute all 27 core indices . It also conducts simple quality control on the input daily data. It has been developed and maintained by Xuebin Zhang and Yang Feng at Climate Research Division. The software was used first at the South Africa Workshop in Cape Town, South Africa, in June 2004 and has been used in other ET workshops .

- **RCLimDex Software Version 1.1 (updated 11/15/2013. There was a bug fix if you have an old version, download this one)**
- RCLimDex Users Guide
- RCLimDex Users Guide in Spanish, translated by José Luis Santos of CIIFEN
- RCLimDex Example Data
- RCLimDex Example Data1
- RCLimDex with some extra data quality control procedure developed by Enric Aguilar, documentation can be found here
- Additional guidance on quality control and homogeneity testing for calculation of extremes indices with RCLimDex developed by Carol McSweeney and John Caesar
- ETCCDI indices computed from outputs of global climate models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) and Phase 5 (CMIP5) are available for download

Figura 16 Obtenção do *software* R e do *script* RCLimdex. *Fonte:* Adaptado de R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2008).

O *script*, após sua obtenção, deve ser salvo com a extensão *.r*, para que o *software* R consiga interpretá-lo. Esse processo pode ser feito diretamente pelo R e, também, salvo em um diretório específico, como exemplificado pelas Figuras 17, 18 e 19.

A fim de estabelecer o controle de qualidade dos dados para o cálculo dos índices, o *software* RCLimdex utiliza diferentes etapas para elaboração dos índices calculados²³:

[...] 1) substitui todos os dados faltosos (atualmente codificados como -99.9) em um formato interno reconhecido pelo R, e 2) substitui todos os valores não aceitáveis por -99.9. Estes valores incluem as quantidades de precipitação diárias menores que zero²³.

A partir daí, os dados podem ser tabulados e organizados separadamente em planilhas referentes a cada estação climatológica a partir da conversão

de um arquivo de texto sem formatação. Esse formato foi utilizado para entrada de dados pluviométricos e descrito a partir dos seguintes passos²³:

- A elaboração de um arquivo de texto ASCII, ou seja, sem formatação e de visualização em diferentes editores de texto.
- A formatação de colunas sequenciais a partir do ano, mês, dia e precipitação (com unidades em milímetros), respectivamente.
- A delimitação descrita acima realizada por espaços entre os elementos.
- Os registros dos dados faltosos codificados como -99.9 e organizados em ordem cronológica⁵⁸.

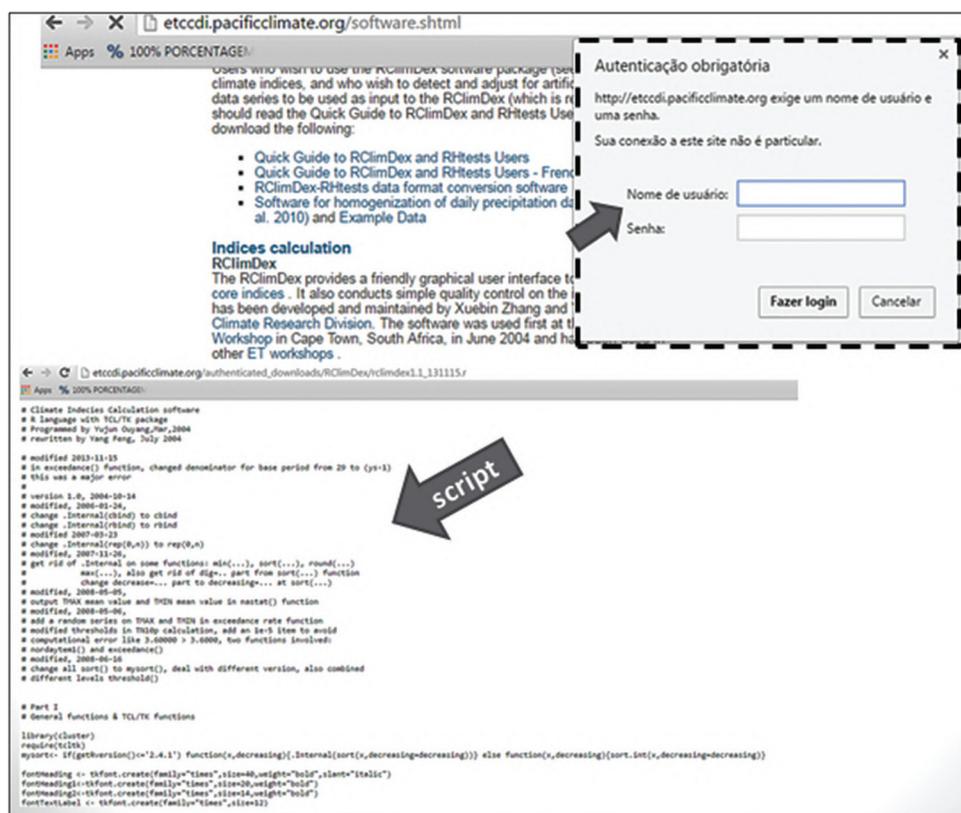


Figura 17 Carregamento do *script* RCLimDex. Fonte: Adaptada de R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2008).

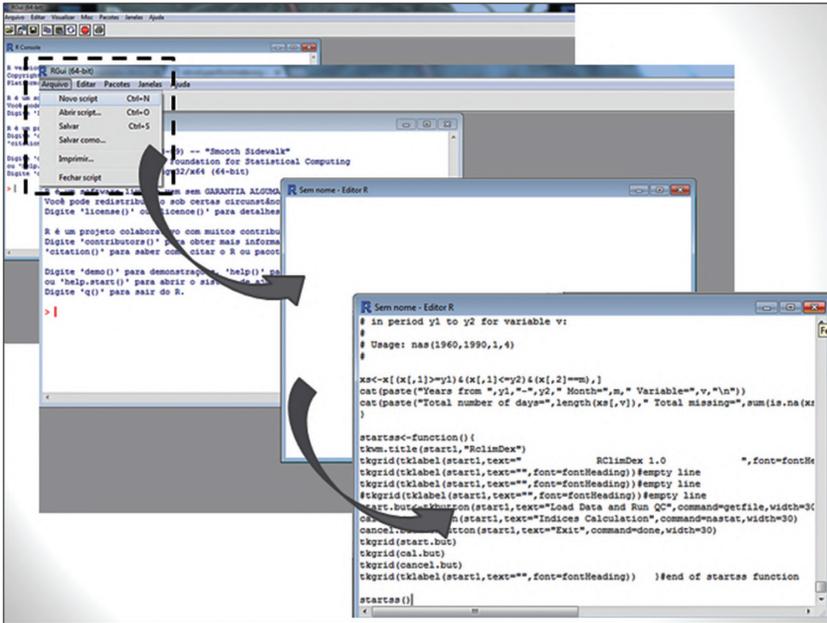


Figura 18 Descrição do salvamento do *script* no software R. Fonte: Adaptada de R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2008).

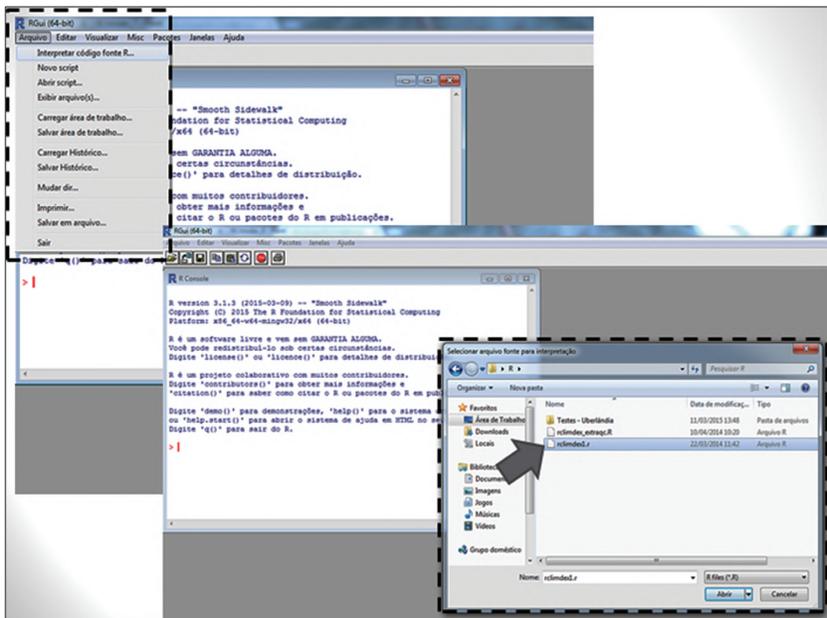


Figura 19 Interpretação do código-fonte Rclimdex. Fonte: Adaptada de R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2008).

Após a elaboração do arquivo de entrada de dados para a série histórica adotada, este apresenta o seguinte formato (exemplo):

1972	1	1	15.5
1972	1	2	0
1972	1	3	-99.9

O formato representado acima deve ser entendido pela leitura vertical e iniciado na primeira linha. Portanto, no dia 1º de janeiro de 1972, a precipitação foi de 15.5 mm (primeira linha); no dia 2 de janeiro de 1972, não houve precipitação registrada (segunda linha); e no dia 3 de janeiro de 1972 não houve registro dos dados de precipitação, sendo substituído por -99.9 quando inexistente (terceira linha), como demonstra a Figura 20.

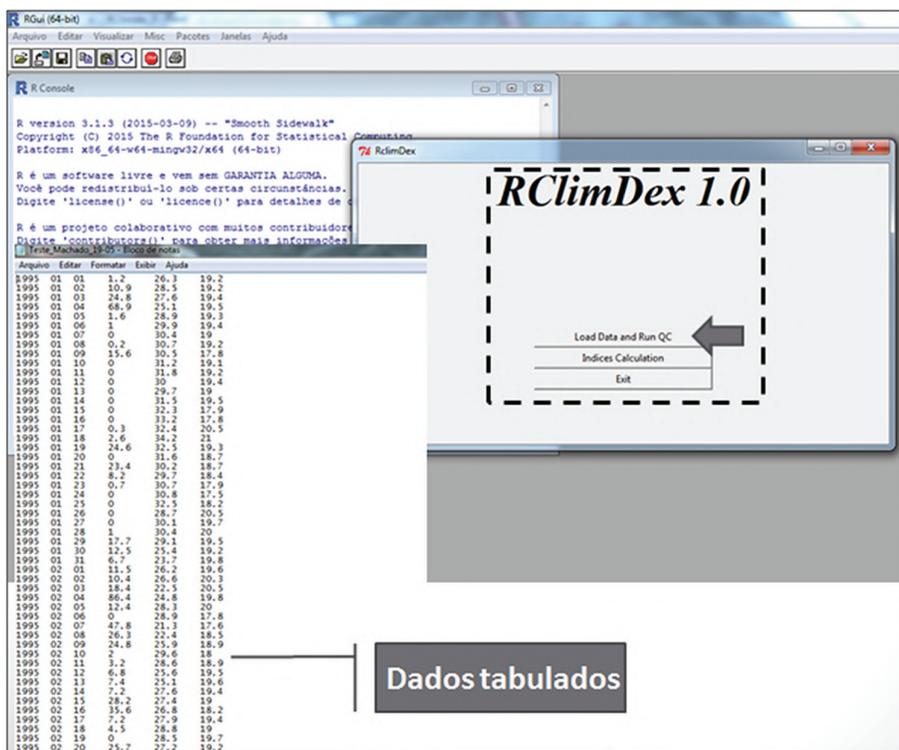


Figura 20 Entrada de dados no *script* RCLimdex. Fonte: Adaptada de R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2008).

Esse exemplo simula o modo como a entrada de dados é realizada, além de representar hipoteticamente a não ocorrência de pluviosidade e a entrada de dados faltosos na série histórica. Após tal processo, os dados serão inse-

ridos no *software* RCLimdex a fim de compreender o comportamento pluviométricos pelos índices climáticos elencados.

Após a inserção dos dados no RCLimdex, serão gerados diretórios referentes aos dados calculados pelos índices escolhidos, conforme as Figuras 21 e 22.

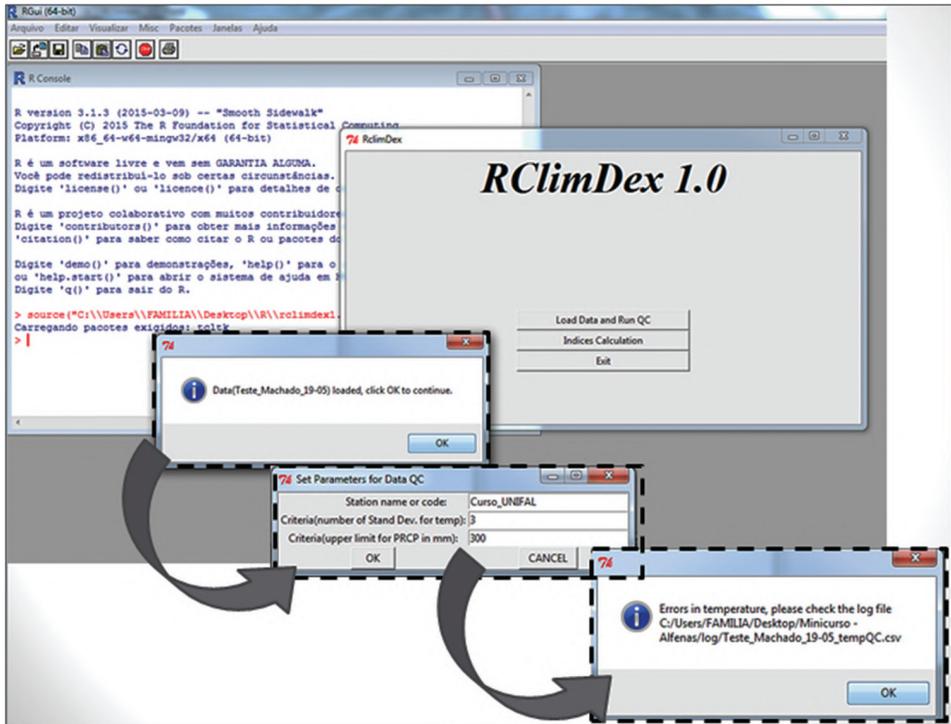


Figura 21 Escolha dos dados de entrada e determinação das estações. *Fonte:* Adaptado de R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2008).

Na Figura 22, pode-se observar a caracterização de erros de limite junto ao *script*. Para tanto, é necessário mudar os anos delimitados na série histórica adotada: se o ano inicial da série for "2014", deve-se alterar para o ano seguinte, ou seja, "2015"; se o ano final da série histórica for "2016", deve-se alterar o campo para "2015". Ressalta-se que, apesar das alterações referentes aos anos da série histórica, o *script* irá calcular normalmente todos os anos da série de dados inserida.

O uso do *software* R e do *script* RCLimdex é de grande valia para a interpretação da dinâmica climática, uma vez que apresentam índices distintos a fim de interpretar dados oriundos de estações climatológicas na escala local, o que permite a integração de inúmeras estações climatológicas a fim de estender

a escala espacial para os estudos climatológicos e, portanto, não dificultam a análise espaço-temporal para tal finalidade.

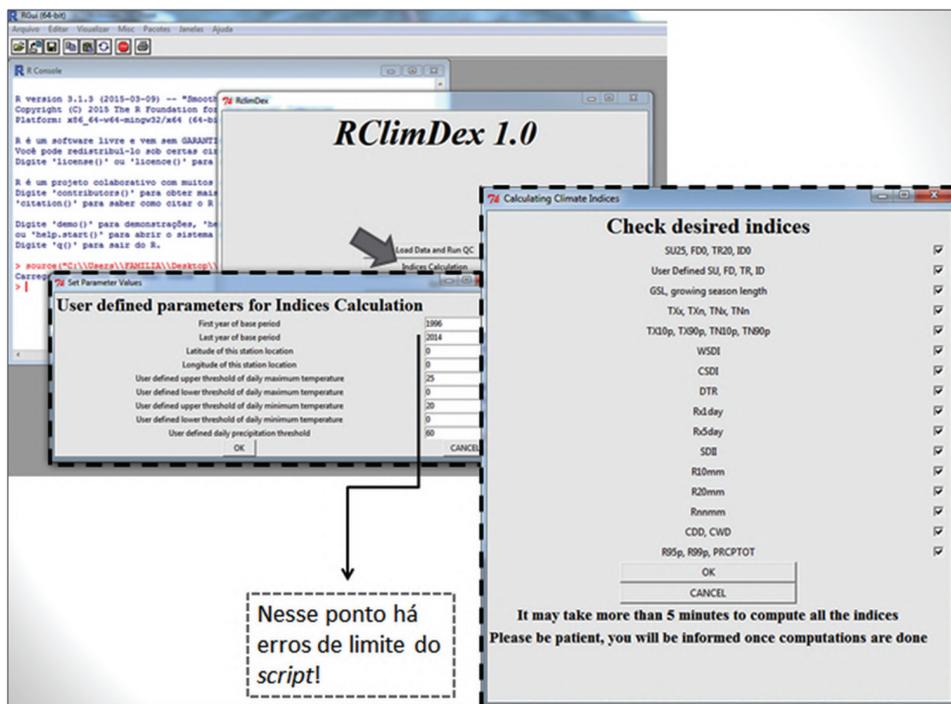


Figura 22 Escolha dos parâmetros e dos índices climáticos. *Fonte:* Adaptado de R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING (2008).

Contudo, além dessas potencialidades, as fragilidades existentes no *script* são facilmente detectáveis quando se trata da realidade climática tropical, uma vez que os cálculos dos índices climáticos não atendem à dinâmica dos climas nessa região do planeta, pois não se pode averiguar o comportamento diário pela escala anual, sendo, portanto, dificultosa a tarefa de compreender o comportamento de dias chuvosos por uma escala anual em uma região onde os sistemas atmosféricos, como entrada de frentes frias, massas de ar quente, massas de ar frias, entre outros, são os principais atores responsáveis pela gênese das chuvas.

Um dos fatores limitantes à análise dos dados pelo *script* RClindex diz respeito à análise de dados climatológicos a partir de dias consecutivos, pois o *script* estabelece apenas valores máximos e descarta o restante dos dados. Dessa maneira, a descrição completa dos dados climatológicos inseridos poderia suprir algumas das análises de tendência em função dos dados calculados.

Outro fator de destaque se associa à qualidade dos dados climatológicos, uma vez que esse tratamento contribui para a confiança nos dados e nas discussões, ou seja, quando a coleta e o tratamento de dados são realizados de modo controlado e adequado, e o entendimento de seu comportamento por uma ferramenta que apresente melhor visibilidade dos dados climatológicos por uma análise quantitativa seja estruturado com planejamento adequado, à tomada de decisão por aspectos políticos, econômicos, sociais, ambientais, entre outros aspectos, com um arcabouço teórico-metodológico viável, tornam-se mais precisos.

Em uma pesquisa⁵⁹ foi utilizada a ferramenta RClindex para análise do comportamento das chuvas para a região de São Carlos (SP) no período de 1993-2014. Notou-se que o uso de tal ferramenta mostrou-se insuficiente para comprovar anomalias pluviométricas, como a concentração de chuvas nos dias chuvosos, o aumento no número de dias sem chuvas ou até quanto à tendência de chuvas e sua correlação com outros dados climáticos da interação com os oceanos.

O RClindex mostrou-se de grande valia para a interpretação da dinâmica climática, uma vez que apresenta índices distintos a fim de interpretar dados oriundos de estações climatológicas na escala local, o que permitiu a integração de inúmeras estações climatológicas, estendendo, assim, a escala espacial para os estudos climatológicos e, portanto, facilitando a análise espaço-temporal para fins meteorológicos e climáticos.

Contudo, as fragilidades da ferramenta são facilmente detectáveis quando se trata da realidade climática tropical, uma vez que os cálculos dos índices climáticos não atendem à dinâmica dos climas nessa região do planeta, pois não pode ser averiguado o comportamento diário pela escala anual, sendo, portanto, difícil a tarefa de compreender o comportamento de dias chuvosos por uma escala anual em uma região onde os sistemas atmosféricos, como entrada de frentes frias, massas de ar quente, massas de ar frias, dentre outros, são os principais atores responsáveis pela gênese das chuvas. Além disso, os cálculos referentes às temperaturas mostraram-se insuficientes para suprir os limiares e a magnitude dessas junto ao comportamento climático regional.

Como sugestão para trabalhos futuros, a adequação das ferramentas teórico-metodológicas voltadas para a climatologia tropical faz-se necessária, uma vez que, sob o ponto de vista da climatologia dinâmica, essa região apresenta grande complexidade no entendimento de suas flutuações no tempo e no clima.

Além disso, a insistência em uma abordagem escalar global, atendendo apenas a uma característica estatística e que não respeite as especificidades de cada região climática, pode dificultar a observação de variações, oscilações, mudanças, etc. existentes nos climas tropicais.

PLATAFORMA DE ANÁLISE E PLOTAGEM DA NOAA

A Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA, *Nacional Oceanic & Atmospheric Administration*) é uma agência federal dos Estados Unidos focada no estudo do estado da atmosfera e dos oceanos. A partir da coleta e análise de diferentes conjuntos de dados climáticos, a NOAA disponibiliza previsões diárias, alerta de tempestades severas e, também, dados de monitoramento do clima voltados a aplicação em estudos e pesquisas.

Dentre as utilidades da base de dados, destacam-se os recursos e ferramentas da NOAA para extrair dados na forma gráfica, isto é, é possível elaborar mapas e gráficos em plataformas *on-line* da NOAA.

Os produtos gerados podem ser salvos em diferentes formatos, como, por exemplo: *netcdf data file*; *DAT file*; *text data file*; *postscript file*; *Portable Network Graphics*; dentre outros. Essas opções permitem que os dados possam ser tratados em alguns *softwares* posteriormente (ex.: Microsoft Office Excel®; R Statistics®; MathWorks MATLAB®; GrADS, dentre outros).

A Divisão de Ciências Físicas (PSD) do Laboratório de Pesquisa do Sistema Terrestre (ESRL) da NOAA realiza pesquisa de tempo e clima para observar e compreender o ambiente físico da Terra e melhorar as previsões climáticas e hidrológicas nas escalas global-local. Nessa plataforma, é possível encontrar literatura de referência na área de ciências ambientais (hidrologia, climatologia, física da atmosfera e oceanografia, etc.), principais pesquisas, monitoramento em tempo real, acesso a dados hidroclimáticos e análise e confecção de mapas.

Dentre as variáveis hidrológicas e climáticas disponíveis para análise pode-se citar: precipitação global; temperatura do ar; componentes de vento; temperatura superficial do mar (TSM); umidade relativa; campos de pressão atmosférica; água precipitável; evapotranspiração potencial (Ep); escoamento (*Runoff*); radiação de onda longa (ROLE); dentre outras. Grande parte das variáveis se encontram disponíveis desde janeiro de 1948.

Como utilização da ferramenta, serão apresentados dois exemplos de confecção de mapas. O primeiro é um mapa das diferenças na taxa de precipitação (mm/dia) com relação à normal climatológica (climatologia) de

30 anos (1981-2010). Para isso, selecionaremos dois períodos distintos de condições de TSM do Pacífico na região mais próxima à América do Sul.

Endereço da plataforma: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Na aba *Products*, selecionar: *Plotting & Analyses*. Na próxima página, selecionar *Monthly/Seasonal Maps and Composites* (Figura 23).

The image shows two screenshots of the NOAA Earth System Research Laboratory Physical Sciences Division website. The top screenshot shows the main navigation menu with 'Products' selected, and a dropdown menu where 'Plotting & Analyses' is highlighted with a red box. A red arrow points from this box to the bottom screenshot. The bottom screenshot shows the 'PSD Interactive Climate Analysis and Plotting Web-Tools' page. A search bar contains the text 'Monthly/Seasonal Maps and Composites: NCEP/NCAR Reanalysis and other datasets'. Below the search bar is a table of search filters:

Type of analysis:	Any	Variable:	Any
Time scale:	Any	Time range:	Any
Dataset:	Any	Reset	Show Web Pages

Below the table, the search results are displayed. The first result, 'Monthly/Seasonal Maps and Composites: NCEP/NCAR Reanalysis and other datasets', is highlighted with a red box. The text below the result states: 'Plots monthly and seasonal composites of variables (mean, anomalies and long-term means). Lat/Lon plots for any desired region, and height cross sections are available.'

Figura 23 Plataforma de dados e análises da Divisão de Ciências Físicas (*Physical Sciences Division*) da NOAA. Fonte: Adaptado de ESRL/PSD/NOAA³². Acesso em: 1 jan. 2017.

Na próxima página, de acordo com a Figura 24, selecionar *Monthly/Seasonal Maps and Composites*. Estando na página indicada, define-se os parâmetros para a confecção da análise e criação do mapa.

De acordo com a série temporal de TSM do Pacífico (Figura 10), o evento de El Niño mais forte ocorreu no ano de 1997. Por sua vez, observa-se que um dos eventos de La Niña mais significativo das últimas décadas ocorreu em 1988/1989. Portanto, foi verificado o impacto desses eventos de TSM na taxa de precipitação na América do Sul.

Primeiro, no item *Which variable?*, é selecionado a variável que desejamos analisar, no caso, escolhemos Precipitação combinada GPCC, dada em mm/dia. Os dados de taxa de precipitação são provenientes de reanálises.

The screenshot shows the NOAA ESRL Physical Sciences Division website. The main heading is "Monthly/Seasonal Climate Composites". On the left, there are several sections for configuring the plot: "Which variable?", "Beginning month", "Enter years for the LAST month", "To subtract one set", and "OR Enter range". A dropdown menu is open under "Which variable?", listing various climate variables. A red arrow points to "GPCC Precipitation V2018 Combined". The "Level?" dropdown is set to "1000mb". The "min" and "max" fields are empty. The "Background Information" and "Related Plot/Analysis" sections are visible on the right.

Figura 24 Plataforma de dados e análises da Divisão de Ciências Físicas (*Physical Sciences Division*) da NOAA. Fonte: Adaptado de ESRL/PSD/NOAA³². Acesso em: 1 jan. 2017.

Em seguida, nos tópicos *Beginning month of season* e *Ending month*, é definido os meses de início e término de nossa análise, respectivamente. Nas opções seguintes, define-se o tipo de análise a ser realizada: valor, anomalia, desvio-padrão, percentil.

No tópico *Plot type* é definido o tipo de plotagem, entre média, anomalia ou média de longo prazo. Os tópicos de contornos e intervalos são importantes quando se deseja realizar análises comparativas entre mapas (Figura 25).

The screenshot shows the NOAA Physical Sciences Division website interface for the 'Monthly/Seasonal Climate Composites' tool. The page is titled 'Monthly/Seasonal Climate Composites' and includes a navigation menu with links for 'Physical Sciences Division', 'About', 'Contact', 'Research', 'Data', 'Products', 'News/Events', and 'Learn'. A 'Help' section is visible on the left side, containing links for 'Instructions', 'Datasets and variables', 'Index time-series info', and 'Use your own time-series'. The main content area features a form with the following options:

- Which variable?** Precipitation Rate
- Level?** 1000mb
- Beginning month of season:** Jan
- Ending month:** Dec
- Enter years for composites (from 1 to 20):** e.g. 1972. For seasons that span a year (e.g. DJF), please enter year of the LAST month.

Below the form, there are instructions on how to subtract years and a grid of input boxes. The form also includes options for:

- OR Enter range of years:** 1981 to 2010 (optional minus)
- OR List of years:** Enter filename:
- OR Years from values in Time Series:** None
- If CUSTOM Time Series:** Value to composite on: [input box]
- Type of comparison:** Value Greater or equal to value
- Lag:** Plot composites for 0 months before or after dates chosen
- Color?** Color [dropdown] **Shading:** Shaded w/overlying contours
- Plot type?** Mean (selected) Anomaly Long Term Mean
- Scale plot size (%)** 150 **Plot contour labels?** No (selected) Yes
- Reverse colorbar?** No (selected) Yes
- Override default contour interval?** Interval: [input] Range: low [input] high [input]
- Map projection:** South America

Additional options include 'If CUSTOM projection' with fields for lowest/highest latitude and western/eastern-most longitude, and 'Choose height range if CROSSSECTION' with 'Lower level' 1000mb and 'Upper level' 10mb. At the bottom of the form are buttons for 'Create Plot', 'Reset Options', and 'Report Bugs'. The footer contains contact information for the U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory, Physical Sciences Division.

Figura 25 Plataforma de dados e análises da Divisão de Ciências Físicas (*Physical Sciences Division*) da NOAA. Fonte: Adaptado de ESRL/PSD/NOAA³². Acesso em: 1 jan. 2017.

Na opção *Map projection* delimitamos nossa área de análise, no caso, a América do Sul. Dentre as opções preestabelecidas é possível selecionar desde todo o globo até continentes e alguns países. Existe uma opção “*custom*” que permite selecionar uma dada região por meio de suas coordenadas geográficas.

A Figura 26 apresenta a normal climatológica da precipitação (mm) para mês de janeiro na América do Sul. É possível observar a alta taxa de precipitação na região equatorial, destacando-se a área da bacia amazônica superando 300 mm.

Observa-se na figura a faixa na orientação Noroeste-Sudeste com elevados índices pluviométricos, relacionados à Zona de Convergência de Umidade e à Zona de Convergência do Atlântico do Sul.

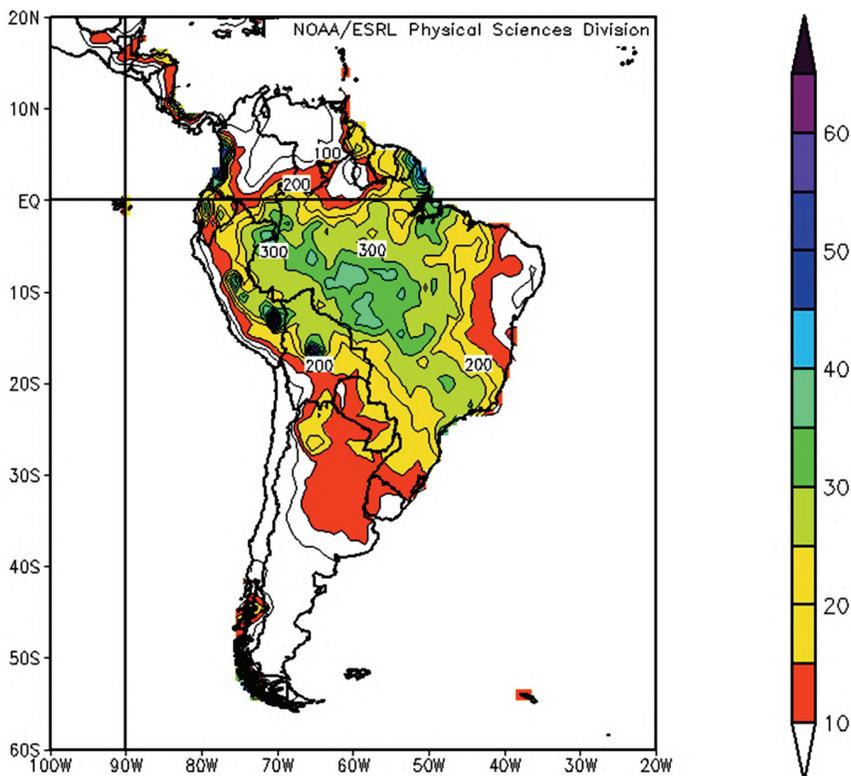


Figura 26 Climatologia da precipitação (mm) para o mês de Janeiro na América do Sul. Composição mensal de 1981 a 2010.

Ainda com relação à Figura 26, observa-se que a precipitação média para o mês de janeiro para o período 1981-2010 no Sudeste da América do Sul se encontra entre 200 e 300 mm. Destaca-se também o significativo déficit na taxa de precipitação na região Nordeste do Brasil, com menos de 100 mm por dia.

De acordo com os dados de TSM do oceano Pacífico (Figura 14) no ano de 1997, houve um *evento de El Niño* intenso; por outro lado, 1989 foi observado persistentes anomalias negativas de TSM.

A Figura 27 apresenta as anomalias de precipitação em janeiro durante os anos de 1989 (a) e 1997 (b) em relação à climatologia da região apresentada na Figura 26.

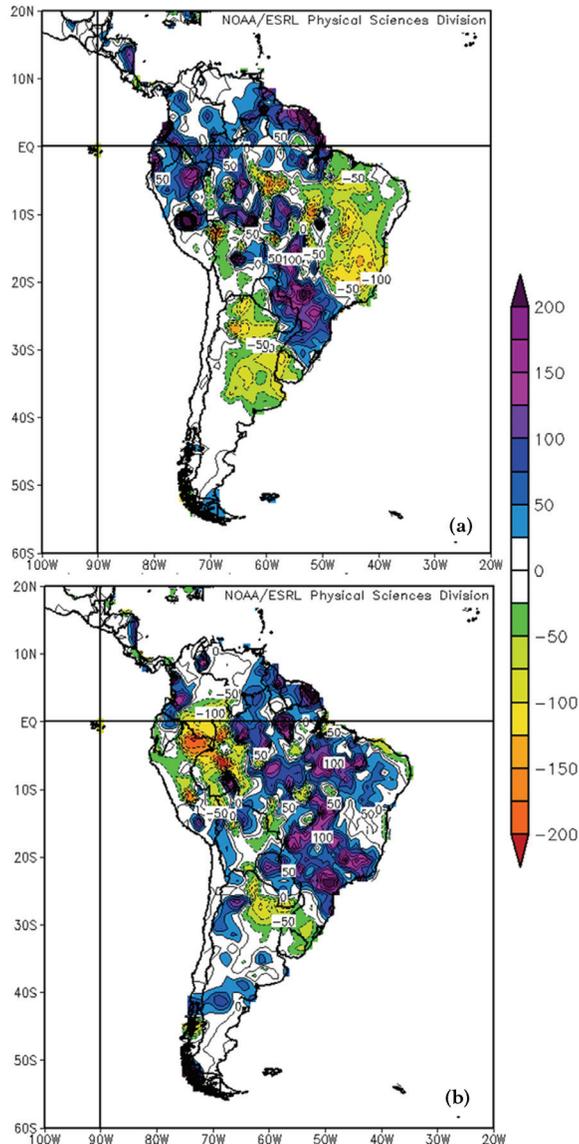


Figura 27 Anomalia na taxa de precipitação (mm) de janeiro nos anos de (a) 1989 e (b) 1997 em relação à normal climatológica.

Observa-se, na Figura 27a, anomalias positivas no sul do Brasil e na floresta Amazônica, enquanto grande parte do Nordeste brasileiro apresentou precipitações abaixo da média de janeiro.

Na Figura 27b observa-se, basicamente, uma situação inversa de anomalias. Uma grande oeste faixa da bacia Amazônica com desvios negativos na taxa

de precipitação e a faixa leste com desvios positivos. É possível destacar, também, os desvios positivos na região Sudeste do Brasil.

Os desvios climáticos registrados na precipitação estão associados, por meio das teleconexões atmosféricas, aos fenômenos *El Niño* de 1997 e *La Niña* de 1989, aquecimento e resfriamento da temperatura superficial do mar, respectivamente.

As ferramentas aplicadas à climatologia apresentadas são largamente utilizadas em pesquisas em diversas áreas. Podem ser usadas em estudos de inter-relação e teleconexão dos fenômenos dos diferentes componentes do sistema climático. Além disso, apresentam potencial aplicabilidade em estudos de análise de risco e vulnerabilidade a eventos hidroclimáticos.

Neste capítulo foi abordado o uso de ferramentas computacionais atuais em climatologia. Foram apresentados, também, exemplos práticos de análise estatística, confecção de mapas e plataformas de base de dados de diversos parâmetros.

RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Orgs.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CUADRAT, J. M.; PITA, M. F. **Climatología**. Madrid: Cátedra, 1997.

KÖEPPEN, W. P. **Climatología: com un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Economica, 1948.

MONTEIRO, C. A. F. O estudo geográfico do clima. **Cadernos Geográficos**, Florianópolis, n. 1, v. 1, 1999.

MONTEIRO, C. A. F.; SANT'ANNA NETO, J. L.; MENDONÇA, F.; ZAVATTINI, J. A. A. **A construção da climatologia geográfica no Brasil**. Campinas: Editora Alínea, 2015. 194 p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1979.

SERRA, A.; RATISBONNA, L. **Massas de ar na América do Sul**. Rio de Janeiro: Serviço de Meteorologia do Ministério da Agricultura, 1942.

QUESTÕES DE REVISÃO

- Diante da complexidade na compreensão climatológica, que fatores contribuem para o entendimento da dinâmica dos climas, temporal e espacialmente (ênfatar as diferenças entre tempo e clima)?
- Admitindo-se que a atmosfera e o balanço de radiação solar influem na gênese dos sistemas climáticos, qual(is) o(s) papel(éis) que sua estrutura e circulação (distribuição) desempenha(m) no tempo e no clima?
- Descreva como a climatologia dinâmica pode subsidiar os estudos climatológicos, por sua gênese e alteração (variabilidade, mudança, etc.).

- Qual a importância de novas ferramentas em climatologia? Quais as contribuições possíveis apontadas pelas ferramentas descritas no final do capítulo?

BIBLIOGRAFIA

- [1] HAESBAERT, R. H.C. **Regional-global: dilemas da região e da regionalização na geografia contemporânea**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.
- [2] AB´SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- [3] MONTEIRO, C. A. F. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: Ed. UFSC, 1991. 241 p.
- [4] MONTEIRO, C. A. F. **O clima e a organização do espaço no estado de São Paulo: problemas e perspectivas**. São Paulo: IGEOG/USP, 1976. n. 28. (Série Teses e Monografias).
- [5] LUTGENS, K. F.; TARBUCK, E. J. **The atmosphere an introduction to meteorology**. 12. ed. Boston: Pearson Education, 2001.
- [6] CAVALCANTI, I. R. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A.; DIAS, M. A. F. S. (Orgs.) **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- [7] BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologias. **Imagem Infravermelho Termal**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/satelites>> Acesso em: 1 jan. 2017.
- [8] MORAN, J. M.; MORGAN, M. D. **Meteorology: the atmosphere and the science of weather**. Minneapolis: Burgess Publishing, 1986.
- [9] SANT'ANNA NETO, J. L.; ZAVATTINI, J. A. (Org.). **Variabilidade e mudanças climáticas**. Maringá: Eduem, 2000.
- [10] ZAVATTINI, J. A.; BOIN, M. N. **Climatologia geográfica: teoria e prática de pesquisa**. Campinas: Alínea, 2013.
- [11] KIEHL J. T.; TRENBERTH, K. E. Earth's Annual Global Mean Energy Budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research, 1997.
- [12] MOLION, L. C. B. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e oscilação decadal do Pacífico. **Revista Climánálise**, ano 3, n. 1, 2006.
- [13] SHELTON, M. L. **Hydroclimatology: perspectives and applications**. Cambridge University Press, 2009.
- [14] MONTEIRO, C. A. F. **A Frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada Sul-Oriental do Brasil: contribuição metodológica à análise rítmica dos tipos de tempo no Brasil**. São Paulo: IG/USP, 1969. (Série Teses e Monografias, 1).
- [15] MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia (RBMET)**, v. 17, n. 01, 2002.
- [16] AGHAKOUCHAK, A. et al. Geometrical characterization of precipitation patterns. **Journal of Hydrometeorology**, American Meteorological Society, v. 12, p. 217-285, Apr. 2011.
- [17] BALDO, M. C. **Variabilidade pluviométrica e a dinâmica atmosférica na bacia hidrográfica do Rio Ivaí – PR**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2012.
- [18] BORSATO, F. P.; ELY, D. F.; BORSATO, V. A. Apontamentos sobre a análise da variabilidade da precipitação pluviométrica e dos principais sistemas atmosféricos atuantes em dois anos de eventos de El Niño na mesorregião centro ocidental paranaense. **Revista Geonorte**, v. 2, n. 5, p. 946-966, 2012.

- [19] HIGGINS, R. W. et al. Relationships between climate variability and fluctuations in daily precipitation over the United States. **Journal of Climate**, v. 20, n. 14, p. 3561-3565, July 2007.
- [20] NEW, M. et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. **International Journal of Climatology**, v. 21, p. 1899-1922, 2001.
- [21] RUSSEL, A.; HUGHES, M. Is the changing precipitation regime of Manchester, United Kingdom, driven by the development of urban areas?. **International Journal of Climatology**, n. 32, p. 967-974, 2012.
- [22] SANTOS, C. A. C.; BRITO, J. I. B. Relação entre mudanças climáticas e área colhida no Rio Grande do Norte e Paraíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.
- [23] SANTOS, E. M. **Estudo da variabilidade e mudanças climáticas na região de Manaus**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Universidade do Estado do Amazonas, Amazonas, 2010.
- [24] SUGUIO, K. **Mudanças ambientais da Terra**. São Paulo: Instituto Geológico, 2008.
- [25] INPE. **Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Relatório), 2011.
- [26] BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.
- [27] TUCCI, C. E. M., BRAGA, B. (Org.). **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- [28] MONTEIRO, C. A. F.; SANT'ANNA NETO, J. L.; MENDONÇA, F.; ZAVATTINI, J. A. A. **A construção da climatologia geográfica no Brasil**. Campinas: Editora Alínea, 2015. 194 p.
- [29] AMBRIZZI, T.; SACCO, M. A. L.; FERRAZ, S. E. T. A importância das teleconexões para a previsão sazonal. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, 31 out. 2014.
- [30] LEHODEY, P. et al. Climate variability, fish, and fisheries. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 5009-5030, 2006.
- [31] OSE/NOAA. **Ocean Service Education. National Oceanic and Atmospheric Administration**. Disponível em: <<http://oceanservice.noaa.gov>> Acesso em: 1 jan. 2017
- [32] **Laboratório de Pesquisa em Sistemas Terrestres. Divisão de Ciências Físicas. National Oceanic and Atmospheric Administration**. Disponível em: < <https://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl> > Acesso em: 1 jan. 2017
- [33] NNVL/NOAA. **Laboratório de Visualização Ambiental**. National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponível em: <https://www.nnvl.noaa.gov/>. Acesso em: 1 jan. 2017
- [34] PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of climate**. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [34] SETO, K. C. et al. Urban land teleconnections and sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 20, p. 7687-7692, 2012.
- [35] CLARKE, A. J. El Niño physics and El Niño predictability. **Annual Review of Marine Science**, v. 6, n. 1, p. 79-99, 3 jan. 2014.
- [36] MANTUA, N. J. et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069-1079, 1997.
- [37] BEAMISH, R. J.; BOUILLON, D. R. Pacific salmon production trends in relation to climate. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 50, n. 5, p. 1002-1016, 1993.
- [38] FRANCIS, R. C.; HARE, S. R. Decadal-scale regime shifts in the large marine ecosystems of the north-east Pacific: a case for historical science. **Fisheries Oceanography**, v. 3, n. 4, p. 279-291, 1994.

- [39] LEHODEY, P. et al. Climate variability, fish, and fisheries. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 5009-5030, 2006.
- [40] BOND, G. et al. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice. **Nature**, v. 365, n. 6442, p. 143-147, 1993.
- [41] ALLEY, R. B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland. **Quaternary Science Reviews**, v. 19, n. 1-5, p. 213-226, 2000.
- [42] SIME, L. C. et al. Evidence for warmer interglacials in East Antarctic ice cores. **Nature**, v. 462, n. 7271, p. 342-345, 2009.
- [43] BIGG, G. R. et al. The role of the oceans in climate. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 10, p. 1127-1159, 2003.
- [44] BARREIRO, M.; TIPPMANN, A. Atlantic modulation of El Niño influence on summertime rainfall over southeastern South America. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 16, 21 ago. 2008.
- [45] ROBLEDO, F. A.; PENALBA, O. C.; BETTOLLI, M. L. Teleconnections between tropical-extratropical oceans and the daily intensity of extreme rainfall over Argentina. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 3, p. 735-745, 15 mar. 2013.
- [46] KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall: amo modifies enso influence. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162-178, jan. 2014.
- [47] KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 4, p. 531-540, 30 mar. 2007.
- [48] ZWIERS, F. W., VON STORCH, H. (2004). On the role of statistics in climate research. **International Journal of Climatology**, n. 24, v. 6, 665-680, 2004.
- [49] SANTOS, C. A., SATYAMURTY, P., MENDES, E. **Tendências** de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. **Acta Amazônia**, n. 42, v. 3, 329-336, 2007.
- [50] SANTOS, C. A., SATYAMURTY, P., GOMES, O. M., DA SILVA, L. E. M. G. Variability of extreme climate indices at Rio Claro, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 395-400, 2012.
- [51] VINCENT, L. A. et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. **Journal of Climate**, v. 18, p. 501-5024, 2005.
- [52] SANTOS, C. A., SATYAMURTY, P., GOMES, O. M., DA SILVA, L. E. M. G. **Variability Of Extreme Climate Indices at Rio Claro, São Paulo, Brazil**. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v.27, n.4, 395 - 400, 2012.
- [54] HAYLOCK, M. R. et al. **Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature**. *Journal of Climate*. Vol. 19. 1490-1512, 2006.
- [55] DUFEK, A. S., AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, n. 93, v. 3-4, p. 167-178, 2007.
- [56] KARL, T. R.; NICHOLLS, N.; GHAZI, A. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: workshop summary. **Climatic Change**, v. 42, p. 3-7, 1999.
- [57] PETERSON, T. C. et al. **Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs: 1998-2001**. Geneve: International Council for Science; Intergovernmental Oceanographic Commission; World Meteorological Organization, 2001.
- [58] CANADIAN INTERNATIONAL DEVELOPMENT AGENCY. **RClimdex user manual**. [S.l.: s.n.], 2004.
- [59] SANCHES, R. G. **Análise das chuvas na região de São Carlos/SP: o entendimento e o comportamento pluviométrico a partir de estações climatológicas, 1993-2014**. 2015. 185 f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

CAPÍTULO 2

PROCESSOS E SISTEMAS ATMOSFÉRICOS: Contribuições Teóricas e Aplicadas em Climatologia Dinâmica

Bruno César dos Santos
Isabela Taici Lopes Gonçalves Horta



Resumo: O presente capítulo tem o intuito de apresentar, de forma breve, conceitos sobre a gênese climática ao longo do território da América do Sul e do Brasil. Em especial, discutem-se questões sobre os eventos climáticos excepcionais e seus impactos nas esferas social e ambiental. O leitor ainda encontra um subcapítulo a respeito das ferramentas de sistema de informação climática utilizadas pelos estudiosos e autoridades no combate à vulnerabilidade climática. E, por último, um estudo de caso na cidade de São Luiz do Paraitinga (SP) que objetivou o entendimento de eventos climáticos extremos de precipitações e os impactos ocorridos no município.

INTRODUÇÃO

A ciência do clima busca entender o comportamento do sistema atmosférico e sua interação com a biosfera. Nos últimos anos, estudos na área têm se tornado cada vez mais significativos e de grande interesse científico.

Autores afirmam que: “Conhecer a atmosfera do planeta Terra é uma das aspirações que vem sendo perseguida pela humanidade desde os tempos mais remotos”.¹ Entender a dinâmica atmosférica tornou-se decisivo no planejamento de qualquer sociedade diante das variações do clima ao longo do tempo e espaço.

Em virtude da complexidade dos eventos climáticos e sua interação com os outros fenômenos naturais e sociais, os climatologistas desenvolveram métodos quantitativos para sistematizar e, assim, compreender a influência da atmosfera na superfície terrestre. Os primeiros estudos em climatologia foram realizados considerando os valores médios das variáveis climáticas, estudadas de forma isolada; tal forma de estudo ficou conhecida posteriormente como Climatologia Clássica².

Do ponto de vista geográfico, o método usado na Climatologia Clássica era insuficiente para explicar todo o dinamismo climático. Os valores médios referentes à precipitação, temperatura, umidade, etc. impossibilitavam a compreensão da realidade, principalmente em relação aos eventos extremos³. Sendo assim, os climatologistas buscaram novas formas de abordar os fenômenos atmosféricos, não mais de maneira sistematizada, porém holística.

Diante desse paradigma, surgiu a climatologia dinâmica com o objetivo de estudar os elementos climáticos de maneira unificada, possibilitando a compreensão de como se manifesta sua ação física e seu ritmo em determinado lugar. O professor e climatologista Carlos Augusto de Figueiredo

Monteiro foi o pioneiro na utilização desse novo método no Brasil, estabelecendo uma metodologia inovadora de análise do clima.

Essa nova forma de examinar a atmosfera propõe que todos os atributos do clima, tais como massas de ar, pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, precipitação, dentre outros, sejam analisados de maneira conjunta e em diversas escalas, permitindo a visualização dos fenômenos temporais diários e do seu ritmo, bem como da gênese dos fenômenos meteorológicos e climáticos.^{4,5}

Para alguns autores, a aplicabilidade da análise dinâmica, permite relacionar estudos em diversas áreas, como a econômica, por exemplo. A produção de alimentos, a geração de energia, a distribuição da população pelo globo são questões diretamente relacionadas com o clima ^{6,7}.

Sobre o aprofundamento da pesquisa em climatologia geográfica:

[...] a concepção geográfica do clima na sua organização do espaço deve ser vista, fundamentalmente, como a geradora de tipos de tempo cujas características são absolutamente dinâmicas, complexas e muito sensíveis a qualquer alteração imposta, influenciando cada parte do planeta, em função da interação entre as diferentes esferas do globo e da ação do homem ⁸.

Se estudar o ritmo climático é importante para a economia e o bom desenvolvimento da sociedade, estudar os extremos climáticos se faz mais importante ainda. As variações inesperadas do clima, no caso, os eventos extremos, podem ter implicações no desenvolvimento de uma sociedade uma vez que rompem com o comportamento habitual dos elementos climáticos e conseqüentemente com o funcionamento habitual da sociedade.

Sendo assim, o clima deve ser estudado em todas as suas variáveis, abordando não somente os elementos que o compõem, mas também sob vários níveis de escala espacial de abordagem que lhe cabe. No presente capítulo será abordado os processos e sistemas atmosféricos responsáveis por caracterizar o clima da América do Sul e, especificamente do Brasil, tanto em seu comportamento habitual como em alguns casos de excepcionalidades, sob o ponto de vista da climatologia dinâmica.

CLIMATOLOGIA DA AMÉRICA DO SUL E DO BRASIL

América do Sul

O continente sul-americano compreende desde 12°N até 55°S de latitude e apresenta diversas formas de relevo, tais como: planaltos, planícies, cadeia

de montanhas, depressões e; também, uma diversa cobertura vegetal. Além disso, o continente é circundado por dois oceanos: Pacífico (oeste) e Atlântico (leste). Todo esse conjunto, proporciona o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos que contribuem para a diversidade climática do continente, marcada pela atuação de massas de ar equatoriais, tropicais e polares, dentre outras sazonalidades.^{1,9}

Próximo à zona equatorial, é possível observar uma intensa faixa de nebulosidade muito freqüente nas proximidades do oceano Atlântico, indicando a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Essa zona tem importância na transferência de calor e umidade para os trópicos.^{1,9,10,11} Além desses, outros sistemas atmosféricos são produtores de tempo e contribuem para a variabilidade climática nas diferentes regiões da América do Sul.

Diante disso, diversos autores caracterizaram as massas de ar que atuam no continente de acordo com a natureza da superfície, as regiões de origem e a localização das frentes.¹²

O Quadro 1 sintetiza a caracterização das massas de ar que atuam espacialmente no continente sul-americano.

Quadro 1 Massas de ar da América do Sul.

NATUREZA DA SUPERFÍCIE	
GELADA (Continente Antártico)	Sua área compreende a zona no interior do círculo polar antártico, com o continente sempre coberto de gelo e os mares permanentemente gelados. Na classificação climática de Köppen, pertence ao clima de neves eternas.
LÍQUIDA (Áreas Oceânicas)	Sua área compreende os dois oceanos (Atlântico e Pacífico) e a região subantártica, onde a superfície intermediária é constituída pelos oceanos gelados e gelos flutuantes. Essa região também sofre influência das correntes marinhas sobre a temperatura média da "superfície do mar".
CONTINENTAL (Área Continental)	Associada à vegetação nas regiões interiores da América do Sul. Em virtude das duas zonas de grande umidade (bacia Amazônica e litoral do Brasil), o clima da região é, segundo Köppen, "tropical chuvoso". Entre essas duas zonas, ao norte do trópico e a leste dos Andes, se estende uma região seca. Entre o trópico e 40°S, a parte oriental do continente, o clima é "temperado úmido". Da costa pacífica, desde o equador até a cordilheira, a partir de 15°S, e a parte meridional do continente, o clima é seco e "desértico". E a partir de 35°, a oeste dos Andes da Patagônia, o clima é "temperado úmido".

Quadro 1 Massas de ar da América do Sul (*continuação*).

REGIÕES DE ORIGEM DAS MASSAS DE AR	
ANTÁRTICA	É a zona polar de superfície gelada, onde se instala um anticiclone permanente com ventos de SE e E. Sua região é limitada pela zona de separação entre os ventos polares de W e os de SE e E do anticiclone antártico entre 60° e 65°S.
POLARES	É a zona subantártica, percorrida pelas correntes antárticas frias e pelos gelos flutuantes levados por essas correntes. Nessa zona se originam os anticiclones subpolares que invadem periodicamente o continente. No verão, eles se encontram a 40°S e, no inverno, a 35°S. O limite meridional das massas polares é a região antártica.
TROPICAIS	São ocupadas, sobre os oceanos, pelos ventos variáveis e divergentes, e calmarias dos anticiclones fixos do Atlântico e Pacífico. As massas tropicais encontram ao sul as massas polares, estendendo-se a norte até a zona dos Alísios, cujo limite está a 20°S na costa do Atlântico. No Pacífico, seu limite com os Alísios não é muito claro. Na estreita faixa árida do continente (desertos) verifica-se as maiores máximas de temperatura, acompanhadas de ventos fracos, considerada como uma região de origem da "massa tropical continental", que vai ter maior importância no período do verão, mas também se apresenta durante o inverno.
EQUATORIAIS	A origem é separada por três fontes marítimas e uma continental. A circulação permite separar, em primeiro lugar, a região das correntes oceânicas de temperatura superficial homogênea dos Alísios de SE do Atlântico, como a de origem da massa "equatorial atlântica". Em segundo lugar, a dos Alísios de SE do Pacífico como a fonte da massa "equatorial pacífica". Finalmente, a zona dos Alísios de NE do hemisfério norte como a de origem da massa "equatorial norte". Essas três fontes são separadas entre si pelo continente e pelas calmas equatoriais. A região de origem da massa "equatorial continental" é caracterizada pela superfície de florestas e ventos fracos continentais sobre toda a depressão geográfica, a partir de 23°S até o equador. Portanto, é uma zona de elevada umidade relativa.
SUPERIORES	As massas aqui formadas originam-se nos níveis elevados dos anticiclones pela sua subsidência superior. As maiores e mais importantes regiões de origem dessas massas são as zonas dos Alísios, onde elas constituem a corrente seca e quente superior oriunda da subsidência dos anticiclones semifixos oceânicos.

LOCALIZAÇÃO DAS FRENTES	
POLAR ATLÂNTICA (FPa)	Em virtude da direção geral do gradiente de temperatura sobre o Atlântico e o campo de deformação entre as duas células subtropicais de alta pressão, a "frente atlântica" tem posição média entre 35° e 40°S, estendendo-se em uma direção quase zonal a princípio e curvando-se em seguida para o sul, na direção do Antártico, onde são notáveis suas oscilações. No fim da família ciclônica, a frente caminha até o centro de ação do Atlântico, sob cujo campo frontolítico se dissolve após o aquecimento da massa polar.

Quadro 1 Massas de ar da América do Sul (*continuação*).

LOCALIZAÇÃO DAS FRENTES	
POLAR PACÍFICA (FFp)	Constitui-se no campo de deformação criado entre as duas células do Pacífico. No inverno, a frente ocupa a posição mais setentrional, onde atravessa o extremo sul do continente americano na direção NW-SE. E no verão, com o enfraquecimento da célula, a frente fica recuada para SW e muito afastada do continente.
INTERTROPICAL (FIT)	A zona frontal intertropical é formada pela convergência dos Alísios dos dois hemisférios e tem direção aproximadamente zonal sobre os oceanos. Essa frente só se forma com alguma intensidade quando as grandes invasões polares, incorporadas aos alísios, colocam em oposição ar frio e massa equatorial. De modo geral, ela é mais intensa no outono e na primavera.
ANTÁRTICA (FA)	Diante do grande contraste de temperatura que existe entre o Pacífico e o continente Antártico, o campo de deformação é formado pelo encontro da corrente geral de oeste com os ventos governados pelo anticiclone polar e no mar de Weddell. Desse modo, a frente antártica toma direção SW-NE, passando do Pacífico para o Atlântico, sendo no inverno sua presença, quando o gradiente é bem forte, e a circulação mais ativa com o reforço das depressões sobre os mares antárticos.

Fonte: Organizado pelos autores (2019).

Uma síntese dos sistemas atmosféricos atuantes nas diversas regiões do continente sul-americano pode ser encontrada na Figura 1. Em relação à baixa troposfera, têm-se: **ANE** (Ventos Alísios de Nordeste), **ASE** (Ventos Alísios de Sudeste), **ASAS** (Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul), **ASPS** (Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul), **B** (Baixa pressão), **BC** (Baixa do Chaco – região de baixas térmicas), **BNE** (região de Baixas Térmicas no Noroeste Argentino), **CCM**, (Complexo Convectivo de Mesoescala), **FF** (Frente Fria), **FQ** (Frente Quente), **JBN** (Jato de Baixos Níveis a leste dos Andes), **LI** (Linha de Instabilidade), **LIP** (Linha de Instabilidade Pré-frontal), **NV** (Nuvem Vírgula), **RC** (Regiões Ciclogénicas), **ZCAS** (Zona de Convergência do Atlântico Sul), e **ZCIT** (Zona de Convergência Intertropical).

Já em relação à alta troposfera, têm-se: **AB** (Alta da Bolívia), **BL** (região de Bloqueios Atmosféricos), **CNE** (Cavado do Nordeste do Brasil), **JS** (Jato Subtropical), **JP** (Jato Polar) e **VCAN** (Subvórtices Ciclônicos de Altos Níveis Subtropicais ou Tropicais). É importante destacar que **AB** e **CNE** são sistemas que se configuram somente no verão.

Além disso, o continente possui oito diferentes ciclos anuais de precipitação (Figura 2) distribuídos espacialmente, em que **R1** corresponde ao sudoeste da AS; **R2**, ao norte do Chile, noroeste e centro-sul da Argentina; **R3**, ao oeste do Peru, oeste e sul da Bolívia, norte e centro-leste da Argentina e

centro-norte do Paraguai; **R4**, ao sul do Brasil, sul do Paraguai e Uruguai; **R5**, ao noroeste a sudeste do Brasil; **R6**, ao norte da região Norte do Brasil e litoral do Nordeste; **R7**, ao sertão nordestino do Brasil; e **R8**, ao norte da AS, incluindo o estado de Roraima (Quadro 2)⁹.

Como verificado, em virtude da extensão latitudinal do continente e suas diversas geomorfologias, o desenvolvimento e a atuação dos diferentes sistemas atmosféricos, contribuem para a grande variação de índices de precipitação e temperatura ao longo da América do Sul.

Os estudos realizados nessa temática, especificamente para o Brasil permitiram caracterizar a ação de massas de ar no país de acordo com as regiões de origem e suas propriedades. O sumário abaixo sintetiza essas informações:

[...]1- Um sumário da classificação, propriedade e regiões de origem das massas de ar que afetam a região:

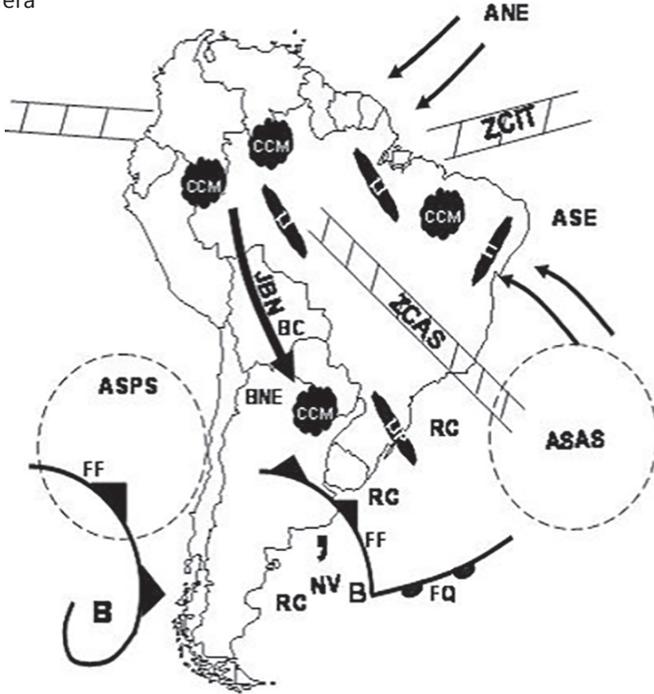
a) Estudos das frequências de cada massa de ar expressas em porcentagem do tempo em que cada uma está presente sobre a região, nas estações do ano.

b) Estudo das propriedades físicas das massas de ar, as quais são mais bem expressas em mapas de isoietas, número de dias de chuvas, mapas de temperaturas mensais e diurnas e outros elementos significativos, sempre correlacionando à situação dinâmica da atmosfera daqueles momentos e períodos observados.

2 - Trajetória dos ciclones, anticiclones e frentes que afetam a região, com a observância das modificações das massas de ar e precipitação, períodos de seca e períodos de chuva associados a esses deslocamentos e observados no seu padrão.

3 - Finalmente, com base nas observações dos fatos dinâmicos, podemos repartir o ano em estações, que podem dar resultados que diferem de uma repartição baseada apenas em considerações de ordem física; ajudamos a explicar muitos fenômenos climáticos que são inexplicáveis sem uma análise da circulação. E, por último, o relevo, a latitude e a continentalidade que complementam a circulação atmosférica, e só podem ser explicadas com um estudo dos fenômenos dinâmicos: massas de ar, anticiclone, frentes, ciclones, instabilidades tropicais, etc., cuja atuação, não apenas é maior ou menor para as diversas regiões, como também sofre variação de intensidade no decorrer do ano em épocas diferentes para cada fenômeno.¹³

Baixa Troposfera



Alta Troposfera

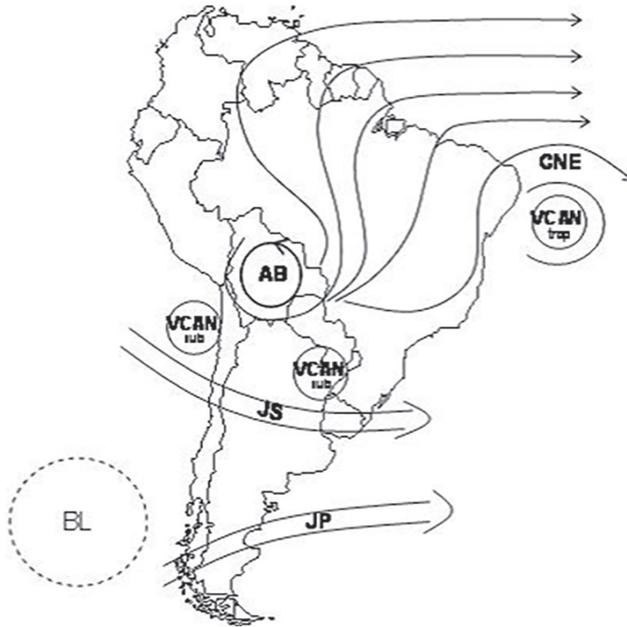


Figura 1 Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul. *Fonte:* Reboita et al. (2010).

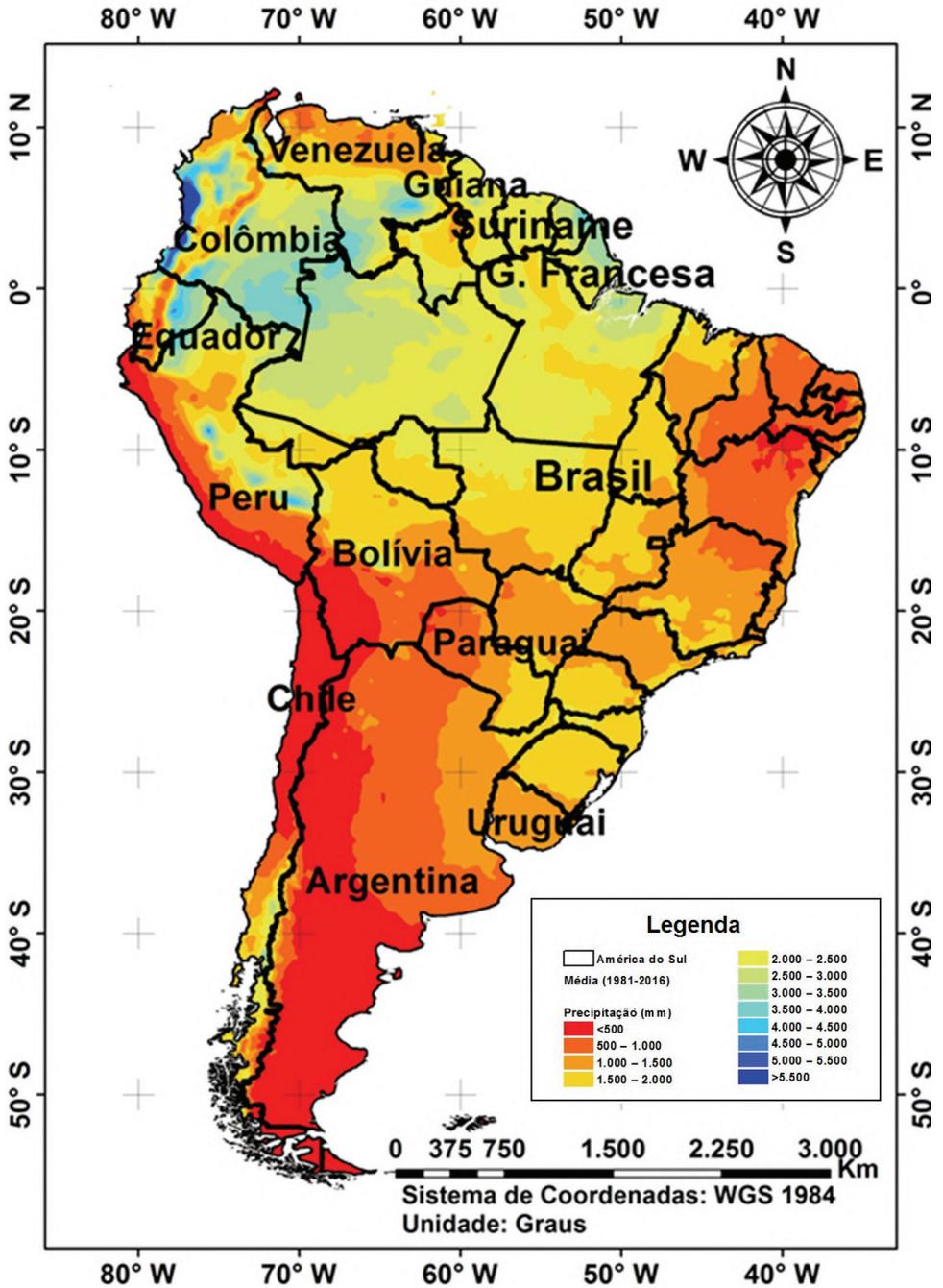


Figura 2 Precipitação média anual entre o período de 1981 a 2016, na América do Sul. Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Quadro 2 Características dos oito regimes de precipitação sobre a América do Sul.

Região		Característica do Ciclo Anual de Precipitação	Sistemas Atmosféricos Atuantes
R1	Sudoeste da AS (Centro-Sul do Chile e Extremo Oeste do Centro-Sul da Argentina).	Máximos de precipitação no inverno e mínimos no verão, exceto na parte mais austral da R1, onde a precipitação é praticamente homogênea ao longo do ano. Total anual varia entre 1000 e 1700 mm.	ASPS; frentes; ciclones.
R2	Norte do Chile, Noroeste e Centro-Sul da Argentina.	A precipitação é praticamente homogênea ao longo do ano e com baixo total anual (inferior a 350 mm/ano). No deserto do Atacama, norte do Chile, a precipitação é inferior a 100 mm/ano.	ASPS; frentes; ciclones.
R3	Oeste do Peru, Oeste e Sul da Bolívia, Norte e Centro-Leste da Argentina e Centro-Norte do Paraguai.	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno. O total anual varia entre 350 e 700 mm, exceto no centro-leste da Argentina e Paraguai, que varia entre 700 e 1400 mm.	Convecção por aquecimento radiativo da superfície; CCMS subtropicais, frentes, ciclones, VCANS subtropicais; JBN a leste dos Andes.
R4	Sul do Brasil, Sul do Paraguai e Uruguai.	A precipitação é praticamente homogênea ao longo do ano. O total anual é elevado (1050-1750 mm/ano), sendo ainda maior no oeste do sul do Brasil na fronteira com o Paraguai (1750-2100 mm/ano).	Frentes; ciclones; VCANS subtropicais; LI pré-frontais; nuvens vírgula; CCMS subtropicais, bloqueios atmosféricos; ZCAS; ASAS; JBN a leste dos Andes; circulação de brisa.
R5	Noroeste a Sudeste do Brasil, incluindo ainda o Equador e Norte do Peru.	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno. O total anual varia ao longo da R5: no setor norte é superior a ~2450 mm, já no centro-oeste sudeste é de ~1500 mm.	Ventos alísios; JBN a leste dos Andes; ASAS; convecção por aquecimento radiativo da superfície; AB; ZCIT; circulação de brisa; LI tropicais e pré-frontais; CCMS tropicais; frentes; VCANS subtropicais; ciclones.
R6	Norte da Região Nortedo Brasil e Litoral do Nordeste do Brasil	Máximos de precipitação no primeiro semestre do ano. No norte da região Norte do Brasil o total anual é de 2000 mm, enquanto no litoral do Nordeste do Brasil é de 1500 mm.	ZCIT; convecção por aquecimento radiativo da superfície; CCMS tropicais; ventos alísios, circulação de brisa; LI; ondas de leste; cavado do Nordeste do Brasil; VCANS tropicais; ASAS; frentes.
R7	Sertão Nordestino do Brasil	Máximos de precipitação no verão e mínimos no inverno, mas os totais são reduzidos (entre 200 e 500 mm/ano).	Ramo descendente da circulação zonal propiciada pela atividade convectiva na Amazônia; ZCIT; VCANS tropicais; frentes; ASAS.
R8	Norte da América do Sul (Colômbia, Venezuela e Guiana)	A precipitação é abundante o ano todo, mas com maiores totais no inverno. O total anual é superior a 1500 mm.	Ventos alísios; ZCIT; ondas de leste; cavados em altos níveis; convecção por aquecimento radiativo da superfície; CCMS tropicais; circulação de brisa; LI tropicais.

Fonte: Reboita et al.(2010).

Brasil

Todas as massas de ar responsáveis pelas condições climáticas sobre o território brasileiro são apresentadas na Figura 3. Destaca-se a atuação das massas de ar equatoriais (m_{Ec} , m_{Ea}), tropicais (m_{Tc} e m_{Ta}) e polares (m_{Pa}) como as responsáveis por gerar os diferentes tipos de tempo em cada período sazonal do ano.

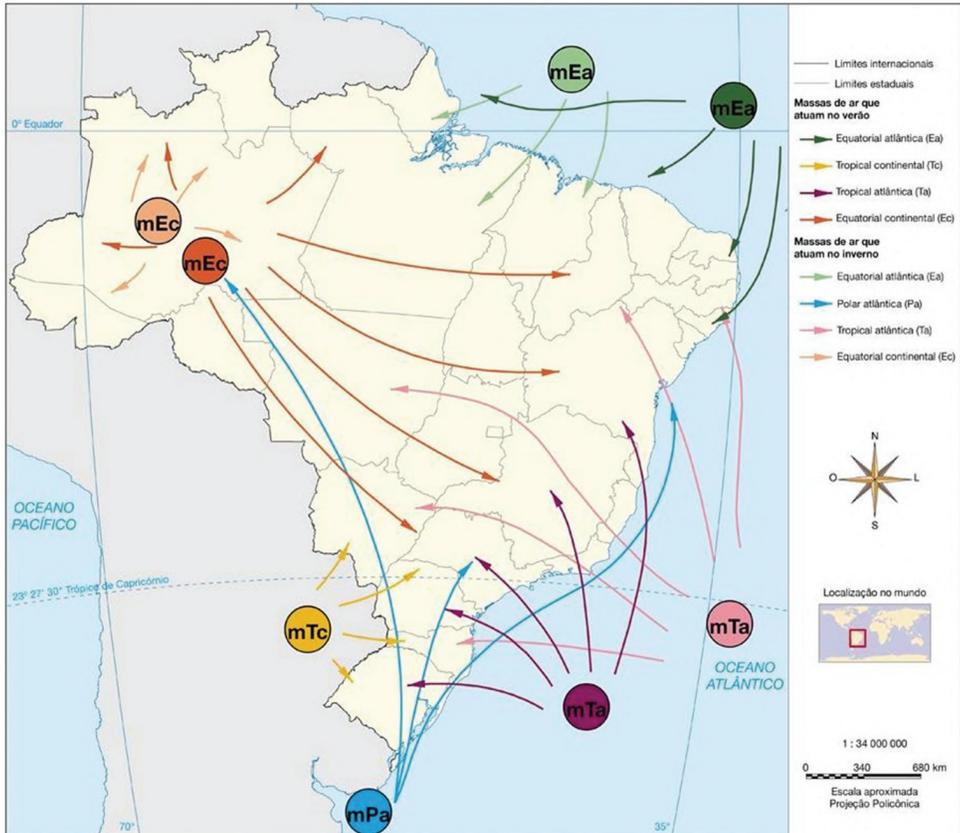


Figura 3 As massas de ar do Brasil. Fonte: Nimer (1979).

No período de outubro a março (primavera-verão), as temperaturas são mais elevadas em virtude do maior aquecimento do continente. Nessa época, as massas de ar (m_{Ec} e m_{Tc}) expandem seus campos de pressão, dando condições aos sistemas atmosféricos de se deslocarem mais para o sul do Brasil. Essas condições favorecem o transporte de umidade e a elevação do ar (áreas de baixa pressão) para as áreas Centro-Sul do país, resultando em forte atividade convectiva, ou seja, valores de precipitação mais elevados (Figura 4).

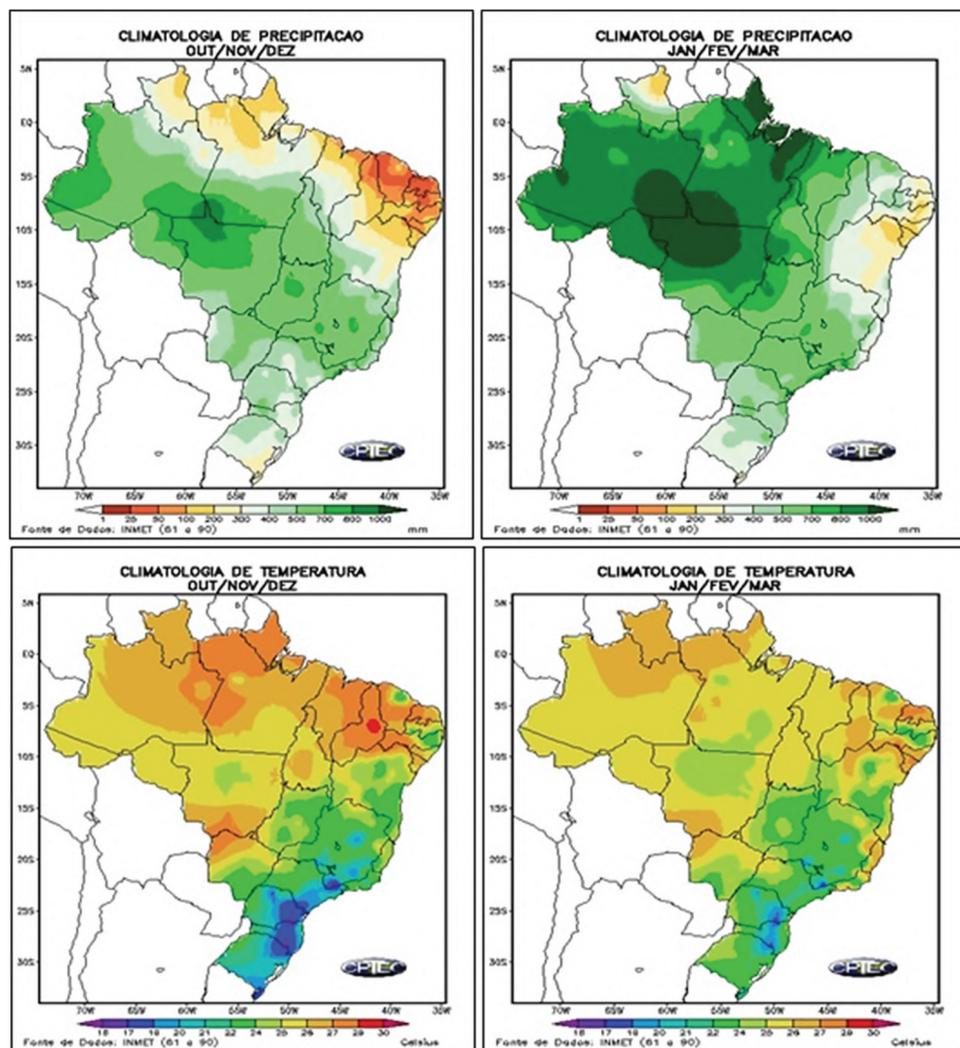


Figura 4 Distribuição média da precipitação (mm) e temperatura (°C) no território brasileiro durante o período (1961-1990) de primavera/verão. *Fonte:* CPTEC (2016).

Portanto, a ação da Massa Equatorial Continental (quente e úmida) tem por características transportar a fonte de umidade trazidas das áreas do oceano Atlântico Equatorial, para a região Amazônica e, posteriormente, para as regiões centrais do Brasil. Além disso, a ação dos sistemas frontais, também, contribui para a gênese das chuvas, em virtude do avanço da Massa Polar Atlântica (fria e seca) em direção ao sul-sudeste, sobre a Massa Tropical Atlântica (fria e úmida).^{9,15}

No período de abril até setembro (outono-inverno), principalmente nos meses de inverno, as massas de ar (mEc e mTc) que atuavam durante o período chuvoso, trazendo umidade para a região Centro-Sul do Brasil, enfraquecem.

Dessa forma, a Massa Tropical Atlântica expande seu centro de pressão máximo, avançando sobre o leste do continente e deixando o tempo bom. Também nesta época, o período de chuvas é menor e as temperaturas são baixas (Figura 5), pelo fato de as Massas Polares atuarem com maior frequência e alcançando facilmente latitudes mais baixas e trazendo com ela temperaturas mais baixas e em alguns casos, precipitação.¹³

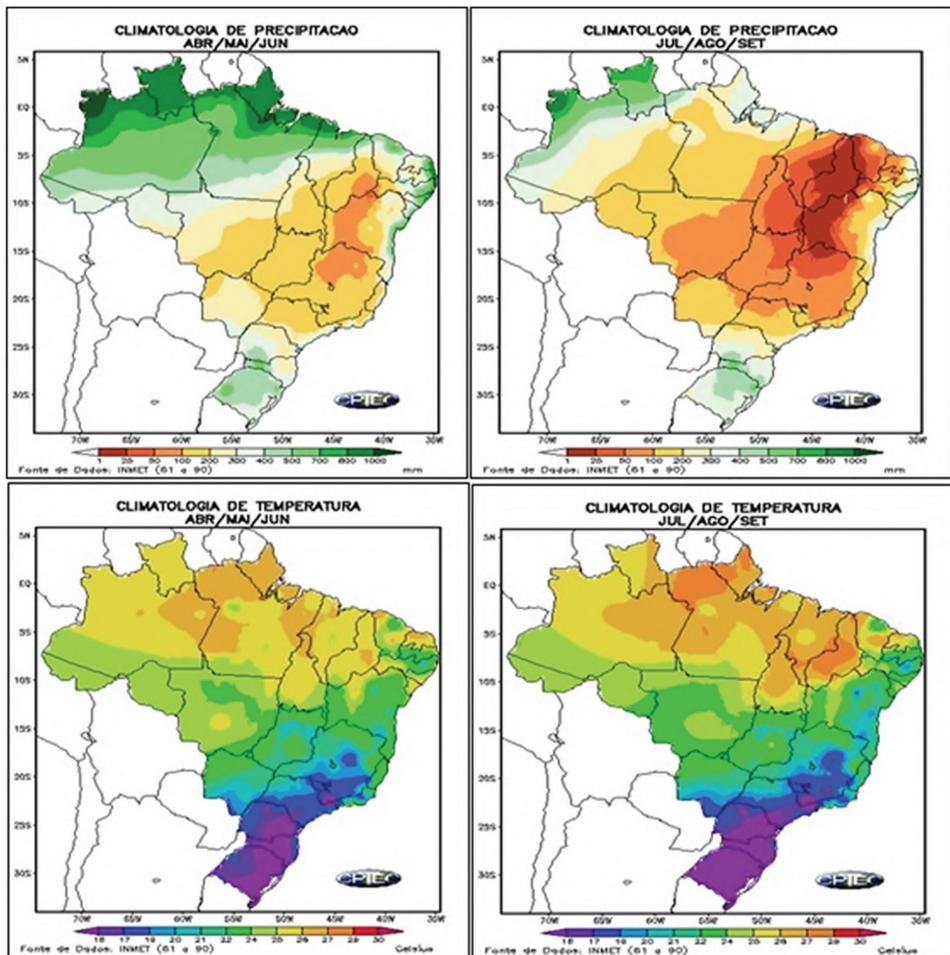


Figura 5 Distribuição média da precipitação (mm) e temperatura (°C) no território brasileiro durante o período (1961-1990) de outono/inverno. *Fonte:* CPTEC (2016).

Portanto, as estações do ano são marcadas pelo regime de chuvas, caracterizadas por distribuição abundante na Região Norte e escassa no Nordeste, enquanto nas regiões Centro-Oeste e Sudeste as precipitações se concentram no período primavera-verão (outubro a março). Já no Sul do país, as chuvas são relativamente bem distribuídas ao longo do ano.

Fonte de dados sobre precipitação

Entender a dinâmica atmosférica e a variabilidade climática no Brasil é, muitas vezes difícil, em decorrência da falta de informações e subsídios em determinadas regiões.

As regiões Centro-Oeste e Norte (Figura 6), por exemplo sofrem com a falta de dados de superfície, devido à existência de poucas das estações meteorológicas em seus territórios.¹⁶

Porém, hoje com o avanço tecnológico e com a utilização dos satélites meteorológicos, aquelas regiões onde não se encontram informações (dados de superfície) podem ser estudadas por meio dos sensores dos satélites e, assim, promovendo uma alternativa no preenchimento dessas lacunas (variáveis climáticas), naquelas regiões com a ausência de estações.

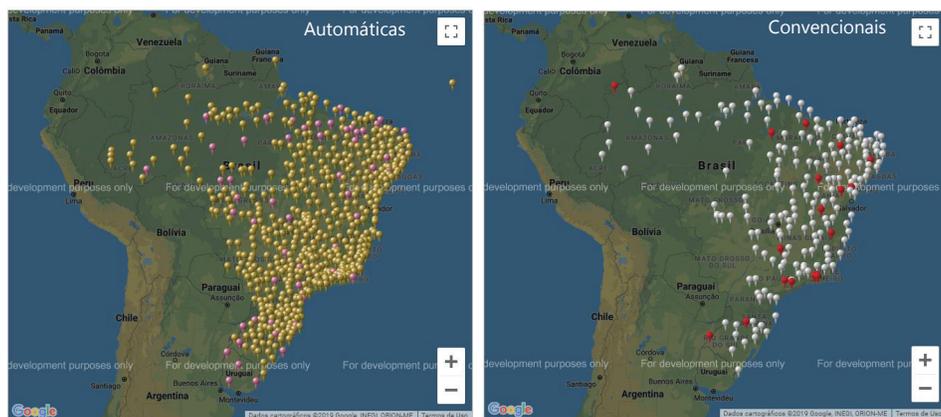


Figura 6 Rede de estações meteorológicas automáticas e convencionais do INMET. *Fonte:* INMET (2017).

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) os estudos de climatologia devem conter análise de dados de séries com no mínimo 30 anos. A partir de então pode-se falar em normais climáticas, comportamento habitual ou extremo. Por isso a importância de se obter fontes confiáveis de dados que seguem um rigor científico.

RECURSOS PARA ANÁLISE CLIMATOLÓGICA - FERRAMENTAS E BANCO DE DADOS

Atualmente, com os avanços tecnológicos, é vasto o número de recursos disponíveis que podem ser utilizados nos estudos e pesquisas nas diversas áreas da ciência, e a Climatologia Geográfica faz parte dessa realidade.

A necessidade do domínio e entendimento sobre o clima proporcionou o desenvolvimento de diversos equipamentos capazes de obter as informações necessárias para isso.

As aplicações do saber climático podem ser encontradas em diversos setores estratégicos tais como para planejamento agrícola, a gestão de recursos hídricos, a prevenção de inundações, a disponibilidade hídrica, o conforto térmico, entre outras.

A seguir, estão descritas algumas das ferramenta e produtos usados para a obtenção de dados climáticos.

Cartas Sinóticas

As cartas sinóticas (Figura 7) são uma forma cartográfica representada por meio de mapas, que descrevem os centros de pressão atmosféricas (altas e baixas) atuantes no continente e no oceano, lançadas diariamente pela diretoria de hidrografia e navegação do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O termo *sinóptico* significa visão simultânea, ou seja, cartas sinóticas são representações cartográficas das massas de ar, frentes frias e quentes e centros de pressão atmosférica sendo visualizadas simultaneamente⁴⁰. As representações devem obedecer à simbologia universal e ser embasadas em dados de estações oficiais.

Por meio dessas cartas, o usuário consegue visualizar a atuação geral das correntes atmosféricas regionais, classificar e identificar a atuação de frentes frias ou quentes, sistemas de baixa ou alta pressão, zonas de convergência e linhas de instabilidade. As cartas da Marinha apresentam um enfoque para os sistemas atmosféricos atuantes no oceano, já as cartas geradas pelo INPE enfocam nos sistemas atmosféricos atuantes no continente.

Esses produtos podem ser obtidos gratuitamente por meio dos links: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas> e <http://tempo.cptec.inpe.br/>.

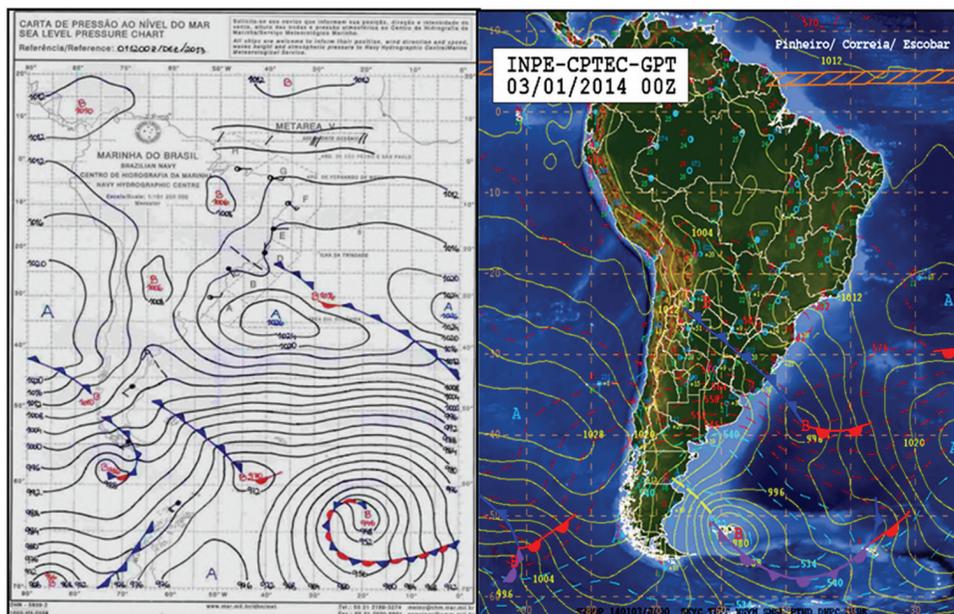


Figura 7 Cartas sinóticas da Marinha do Brasil e do INPE. *Fonte:* Marinha do Brasil e INPE.

Imagens de Satélites Meteorológicos

Por meio dos sensores nos satélites meteorológicos podemos adquirir imagens da movimentação atmosférica, isso graças à imagem negativa das nuvens em diversas camadas da atmosfera.

Com essa visualização é possível descrever a entrada de frentes e de massas atuantes diariamente. Por meio das imagens do satélite geoestacionário (GOES-16), por exemplo, entre os canais infravermelhos IR-Realçada, WV-Realçada, Colorida, dentre outros (Figura 8), é possível visualizar os fenômenos que ocorrem de maneira dinâmica sobre a superfície terrestre.

Algumas dessas aplicações têm se aprimorado com a utilização de satélites meteorológicos (GOES, NOAA, TERRA/AQUA e EUMETSAT) para projetos ambientais ou pesquisas espaciais, disponibilizando as imagens em pequenos intervalos de tempo, de forma a permitir acompanhamento do deslocamento de nuvens.

As imagens obtidas pelos satélites meteorológicos são complementares à análise feita pelas cartas sinóticas. Essas imagens podem ser acessadas no seguinte endereço: <http://satellite.cptec.inpe.br/home/index.jsp>.

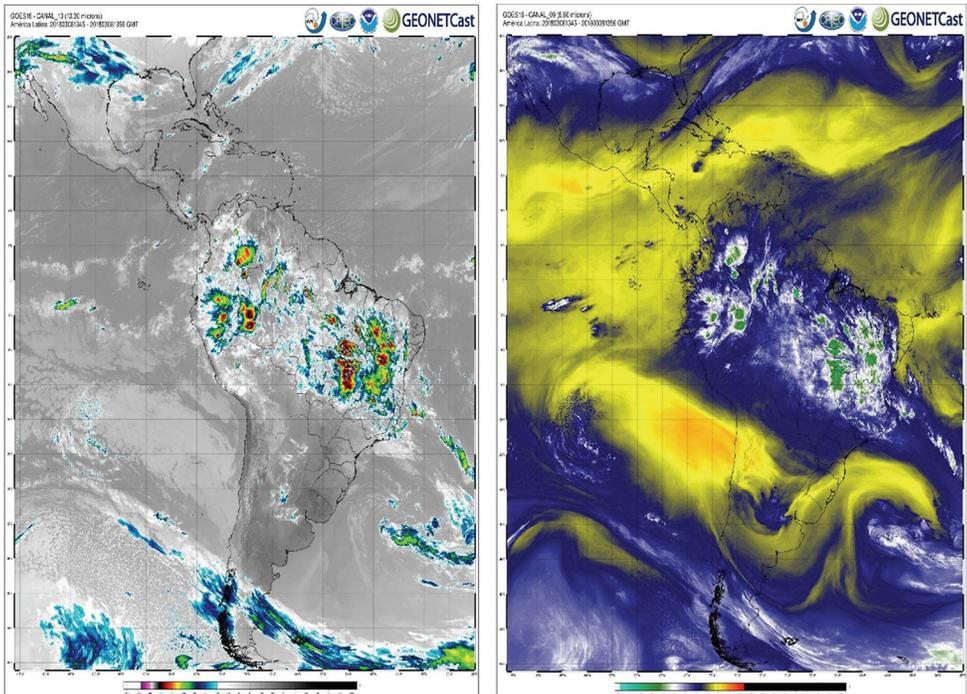


Figura 8 Imagem de satélite GOES 16: IR realçada e WV realçada. *Fonte:* CPTEC.

Boletins Climatológicos

Um volume expressivo de informações climatológicas é veiculado por meio de estudos e de boletins informativos. Para isto, boletins ou revistas, como a *Climanálise*, *Infoclima* e *Progclima* (Figura 9) servem de apoio para verificar as possíveis ocorrências atmosféricas que aconteceram nos últimos meses e anos.

Essas revistas são boletins lançados mensalmente, elaborados por meteorologistas do CPTEC/INPE e INMET, que contêm informações e previsões climáticas dos sistemas meteorológicos. Desde outubro de 1986, a revista *Climanálise* tem documentado o comportamento dos principais sistemas sinóticos sobre o Brasil, as características atmosféricas e oceânicas de grande escala, além de manter também um registro mensal de parâmetros como precipitação, temperatura, dados hidrológicos e de suas anomalias em relação à climatologia mensal.

Grande parte das análises é feita com a utilização de imagens de satélite do CPTEC e de campos de variáveis meteorológicas obtidas do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), EUA, além dos dados coletados pelo INMET, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE). A análise

hidrológica é realizada a partir de dados fornecidos por órgãos relacionados à gestão da água e energia elétrica.

Já as características mensais de grande escala são fornecidas, por exemplo, pelo *Climate Prediction Center* (CPC), NCEP, EUA. Para análises do Oceano (Temperatura Superficial do Mar- TSM) Atlântico são utilizados os dados do *Institut Français Pour le Developpement et Cooperation* Orston, França. E as análises regionais são feitas com o auxílio de dados enviados pelos respectivos órgãos regionais de meteorologia. No caso de tópicos especiais, como queimadas, são utilizados dados de imagens de satélite coletados pelo INPE.

Dessa forma, a utilização das informações contidas nos boletins corrobora a identificação dos efeitos causados pela atmosfera e, também, auxiliam nos estudos sobre aspectos climáticos e institutos de pesquisas.

Os boletins podem ser acessados no link: <http://clima1.cptec.inpe.br/>.

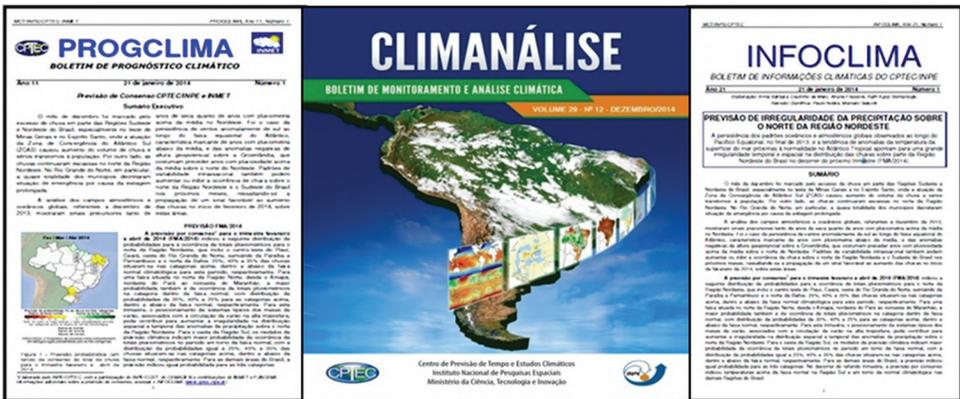


Figura 9 Boletins climatológicos. Fonte: CPTEC.

Banco de Dados Meteorológicos do INMET

Os dados meteorológicos são as informações mais importantes para entender o clima. Por meio dos dados, que são obtidos pelas estações automáticas ou convencionais, pode-se conseguir toda informação sobre a interação física da atmosfera com o meio geográfico de um lugar (Figura 10).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é o órgão responsável por organizar uma completa rede de estações meteorológicas espalhadas pelo Brasil, que fornecem informações meteorológicas que subsidiam o processo de decisão e contribuem para o desenvolvimento do País.



Figura 10 Rede de estações meteorológicas do INMET. *Fonte:* INMET (2019).

O INMET foi criado pelo Decreto 7.672 do presidente Nilo Peçanha, em 18 de novembro de 1909, com o nome de Diretoria de Meteorologia e Astronomia, órgão do Observatório Nacional, vinculado ao Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. Ao longo de sua trajetória, o instituto ganhou várias denominações até chegar a Instituto Nacional de Meteorologia (Lei 8.490, de 19 de novembro de 1992), órgão da administração direta do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Diariamente, o INMET elabora e divulga a previsão do tempo, avisos e boletins meteorológicos especiais: promovendo a execução de estudos e levantamentos meteorológicos e climatológicos aplicados à agricultura e outras atividades correlatas; coordenando projetos de pesquisas agrometeorológicas e de acompanhamento das modificações climáticas e ambientais; operando as redes de observações meteorológicas e de transmissão de dados, inclusive aquelas integradas à rede internacional, dentre outros.

O Sistema de Coleta e Distribuição de Dados Meteorológicos do Instituto (temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, entre outras variáveis) é dotado da maior rede de estações convencionais e automáticas da América do Sul.

Os dados coletados por essa rede são acessíveis, de forma democrática e gratuita, em tempo real, na página <http://www.inmet.gov.br>. Esse banco de dados digital contém séries históricas, a partir de 1961, das várias estações que compõem a rede do INMET, com informações referentes às medições diárias, de acordo com as normas técnicas da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Banco de dados de Desastres Naturais - Centro de Meteorologia de Bauru IPMet

Pellegrina desenvolveu um banco de dados no qual reúne informações sobre as ocorrências registradas na Defesa Civil que relatam os danos causados por fenômenos meteorológicos, tais como chuvas fortes, chuva de granizo, inundações, entre outros. O banco de dados compreende o período de 1995 a 2019 e é alimentado constantemente⁴⁶ (Figura 11).

The image shows a web interface for the 'BANCO DE DADOS DE DESASTRES NATURAIS' (Natural Disasters Data Bank) at IPMet-UNESP. The page has a blue header with the UNESP logo and the text 'UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" Câmpus de Bauru'. Below the header, there is a navigation menu on the left with various options like 'Instituição', 'Cadastro', 'Radar Cidades', etc. The main content area is titled 'BANCO DE DADOS DE DESASTRES NATURAIS' and contains a search form. The search form has the following fields: 'Data Início' (01, 01, 1980), 'Data Fim' (30, 01, 2017), 'Fenômeno' (Todos), 'Dano' (Todos), 'Estado' (Todos), and 'Cidade' (empty). There is a 'Consultar' button at the bottom of the search form. The footer of the page includes 'Página inicial | Expediente | WebMail | Fale conosco' and a small globe icon.

Figura 11 Banco de desastres naturais. *Fonte:* IPMet-UNESP.

As informações ali disponíveis são referentes à data, ao horário, ao tipo de evento meteorológico, ao tempo de duração e aos danos causados. Tal ferramenta gera um inventário sobre desastres naturais, possibilitando, assim, melhor análise dos riscos, vulnerabilidades, eventos deflagradores e seus impactos.

O banco de dados pode ser acessado na página do IPMet – Centro de Meteorologia de Bauru, acionando a aba “Banco de Dados” e, posteriormente, “Desastres Naturais”. A busca no banco de dados pode ser feita a partir da seleção dos seguintes critérios: “Data início”, “Data fim”, “Fenômeno”, “Dano”, “Estado” e/ou “Cidade”.

Hidroweb

O Hidroweb é uma plataforma mantida pela Agência Nacional de Águas que atua em consonância com a Lei de Acesso à Informação (Lei nº 12.527/2011) e com a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, disponibilizando dados convencionais e dados telemétricos georreferenciados. A partir de uma análise superficial dos pontos que representam as estações disponíveis no sistema é possível notar a diferença de distribuição das estações hidrológicas e meteorológicas pelo Brasil. Enquanto no Sul, Sudeste e Nordeste a rede de estações é densa e atual, nas outras regiões do Brasil ela é limitada.

Os dados hidrológicos de uma bacia hidrográfica são as informações base para o planejamento da gestão dos recursos hídricos. A escassez dessas informações dificulta o entendimento do balanço hídrico do local, o conhecimento sobre o regime hídrico, a previsão de eventos hidrológicos cíclicos, entre outras questões essenciais para a gestão local. A informação hidrológica é estratégica tanto para o setor público quanto para o privado.

Um material desenvolvido em conjunto entre a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) enfatiza a questão dos dados para planejamento em uma perspectiva econômica:

O valor econômico das informações hidrológicas obtidas de uma rede hidrométrica através de dados e previsões pode ser aferido através da prevenção e redução das perdas em fenômenos hidrológicos extremos (cheias e secas), perdas de oportunidade de uso devido à falta de conhecimento dos potenciais e com a segurança de que os projetos e obras serão dimensionados adequadamente, sem que haja super ou sub dimensionamento de estruturas devido a fatores hidrológicos. (Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos).⁴⁸

Disponível no site www.snirh.gov.br/hidroweb/, a plataforma se apresenta com uma interface muito intuitiva, o que facilita a utilização por todos os tipos de usuários, desde leigos até profissionais. Nela é possível buscar as informações dentro do banco de dados “Inventário das Estações”, “Dados Convencionais” ou “Dados Telemétricos”.

Para isso, deve-se selecionar qual banco de dados deseja consultar e em seguida indicar o que se sabe dos campos: tipo de estação (fluviométrica ou pluviométrica), código da estação, nome da estação, nome do rio, nome da bacia, nome da sub-bacia, UF do país, município, órgão responsável pela estação, operador e área de drenagem.

A própria plataforma gera gráficos a partir dos dados armazenados, porém, é possível também exportar esses dados em formato access, excel ou texto. O usuário pode processar tais dados no *software* de sua preferência, ou então baixar o Hidro – Sistemas de Informações Hidrológicas, o gerenciador de banco de dados da ANA.

A vantagem desse gerenciador é que sua interface também se apresenta amigável e é possível selecionar apenas as informações com as quais se quer trabalhar. A Figura 12 mostra o layout da plataforma Hidroweb.

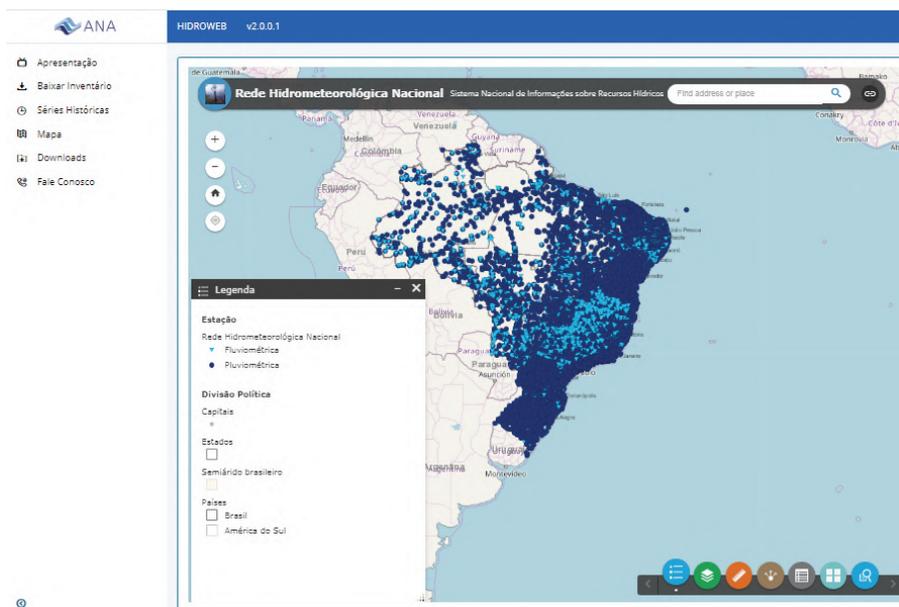


Figura 12 Rede de postos pluviométricos e fluviométricos no Brasil. *Fonte:* ANA (2019).

Tendo em vista a importância da informação para gestores, cientistas e cidadãos comuns, torna-se indispensável sua divulgação em sistemas de informação como o Hidroweb ou o Banco de Dados de Desastres Naturais, apresentados aqui. As próximas páginas deste capítulo trazem um exemplo de aplicação dessas ferramentas em estudo acadêmico.

TEMPESTADES TROPICAIS, SECAS E INUNDAÇÕES

Tratando-se de eventos naturais deflagradores de desastres no Brasil, poucos deles são frequentes se comparados com outros países que estão localizados na rota de furacões ou no limite de placas tectônicas. O país não sofre por terremotos ou maremotos, não há vulcões ativos nem fortes nevascas. Alguns dos problemas que podem ser elencados referem-se às fortes chuvas de verão no Centro-Sul, seca no Nordeste e, já no âmbito social, à vulnerabilidade de algumas comunidades às consequências dessas intempéries.

Durante o verão, predominantemente quente e chuvoso, tem-se a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que proporciona chuvas fortes e por vários dias, principalmente na região Sudeste do país.

Esse mesmo fenômeno pode ser chamado também de Zona de Convergência na América do Sul. De acordo com os autores³⁰ que a denominam assim, esse fenômeno está ligado à alta atividade convectiva sobre o continente devido aos fatores termodinâmicos e dinâmicos, e ocasiona intensas chuvas também sobre o continente Sul Americano, especificamente na faixa Noroeste – Sudeste do Brasil.

A ZCAS pode ser entendida como uma banda de nebulosidade semi-estacionária que se estende desde a região amazônica até o Oceano Atlântico e está associada às chuvas abundantes, descargas elétricas, rajadas de vento e queda de granizo.

Dessa forma, para que ocorra a formação da ZCAS é necessário ^{31,32}:

- ◆ Convergência de umidade em 850 hPa na faixa do Oceano Atlântico até a Amazônia Brasileira;
- ◆ Presença de um cavado em 500 hPa na costa leste da América do Sul com orientação NW-SE;
- ◆ Presença de uma crista de temperatura potencial equivalente em 500 hPa, na região da ZCAS;

- ♦ Intenso gradiente que separa a massa de ar quente e úmida vinda dos trópicos, do ar frio e seco vindo do sul e;
- ♦ Vorticidade relativa positiva (anti-horária) em 200 hPa.

A Figura 13 demonstra os sistemas atmosféricos que atuando juntos por no mínimo 4 dias caracterizam a ZCAS.



Figura 13 Sistemas atmosféricos atuantes para a formação da ZCAS. *Fonte:* Climatempo.

O resultado da ZCAS pode ser comparado às conseqüências das monções que ocorrem no Sudeste Asiático (Figura 14), são essenciais para a atividade agrícola, mas podem desencadear transtornos para o funcionamento da sociedade se esta não estiver preparada.

A Figura 15 traz o registro fotográfico da cidade de São Luiz do Paraitinga (SP) após dias de chuvas fortes e o transbordamento do rio Paraibuna, o que causou inundação e desabamento dos prédios.



Figura 14 Monções do sudoeste da Índia têm entrado em colapso? Aljazeera, 1 July 2015. *Fonte:* Disponível em: <http://www.aljazeera.com/news/2015/06/india-southwest-monsoon-collapsed-150630100226092.html>. Acesso em: 01 dez. 2016.



Figura 15 São Luiz do Paraitinga após inundação de dezembro de 2009. *Fonte:* IPT.

Do outro lado do extremo climático estão as secas e as estiagens, as quais também assolam a população brasileira, especialmente no Nordeste do país, considerado de clima semiárido, caracterizado não só pelos sistemas atmosféricos atuantes, mas também pelo relevo.

Autores descreveram alguns dos fatores e mecanismos que mais influenciam as chuvas – e a falta delas – sobre a região Nordeste brasileira. São eles: eventos El Niño – Oscilação Sul (ENOS), Temperatura da Superfície do Mar (TSM), Ventos Alísios, Pressão ao Nível do Mar (PNM), Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico, Frentes Frias, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Linhas de Instabilidade (LI), e Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM).³⁶

Molion destaca também que, o semiárido é resultante da subsidência de ar seco associada ao ramo descendente da célula Hadley – Walker ³⁷.

Se, para configurar o clima das regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste do Brasil, a ZCAS é o mecanismo principal, para as regiões Norte e Nordeste temos como mecanismo principal a ZCIT, que, por sua vez, está condicionada à TSM, já que sua atuação é mais significativa sobre os oceanos.³⁶

Do ponto de vista climatológico, a estiagem ocorre quando há atraso superior a quinze dias para o início da temporada de chuvas e “quando as médias de precipitação pluviométrica mensais dos meses chuvosos permanecem inferiores a 60% das médias mensais de longo período, da região considerada”. Já a seca ocorre pelo prolongamento e agravamento da estiagem, causando redução brutal das reservas hídricas do local afetado.³⁸

Assim como todos os fenômenos climáticos, a seca e a estiagem apresentam ritmo e variabilidade de ocorrência e, dessa forma, podem ser previstas, com certa limitação, em decorrência dos erros dos modelos de previsão.

Os sistemas atmosféricos condicionam as chuvas, ou a falta delas. Já no âmbito da administração, o gerenciamento hídrico pode condicionar crises ou colapsos, gerando consequências econômicas, ambientais e sociais. A água está presente desde a produção agrícola, industrial, têxtil, até no abastecimento e higiene animal e humana. Sua escassez, portanto, atinge todos os setores da economia, podendo instaurar o caos em comunidades despreparadas.

Impactos causados pelos eventos extremos

É na interação entre os sistemas atmosféricos com a superfície do planeta que se pode perceber a atuação do tempo e do clima. Os elementos atmosféricos (temperatura, umidade, pressão, etc.) interagem com cada fator regional (relevo, latitude, altitude, vegetação, cobertura do solo, etc.) de

maneira diferente, e os organismos vivos também reagem a essa interação de acordo com o metabolismo de cada indivíduo. Mais detalhes sobre esse assunto podem ser encontrados no Capítulo 4.

É importante lembrar que há diversas escalas de atuação dos sistemas atmosféricos, elas oscilam tanto no espaço como no tempo, e essa variação determina características como intensidade e duração do evento atmosférico.

Os sistemas atmosféricos podem abranger desde pequenas áreas até quilômetros de extensão. Na Figura 16 pode-se observar as escalas de atuação desses no tempo e no espaço. O gráfico mostra, em sua abscissa, a abrangência dos processos atmosféricos em metros e, no eixo das ordenadas a duração em segundos.

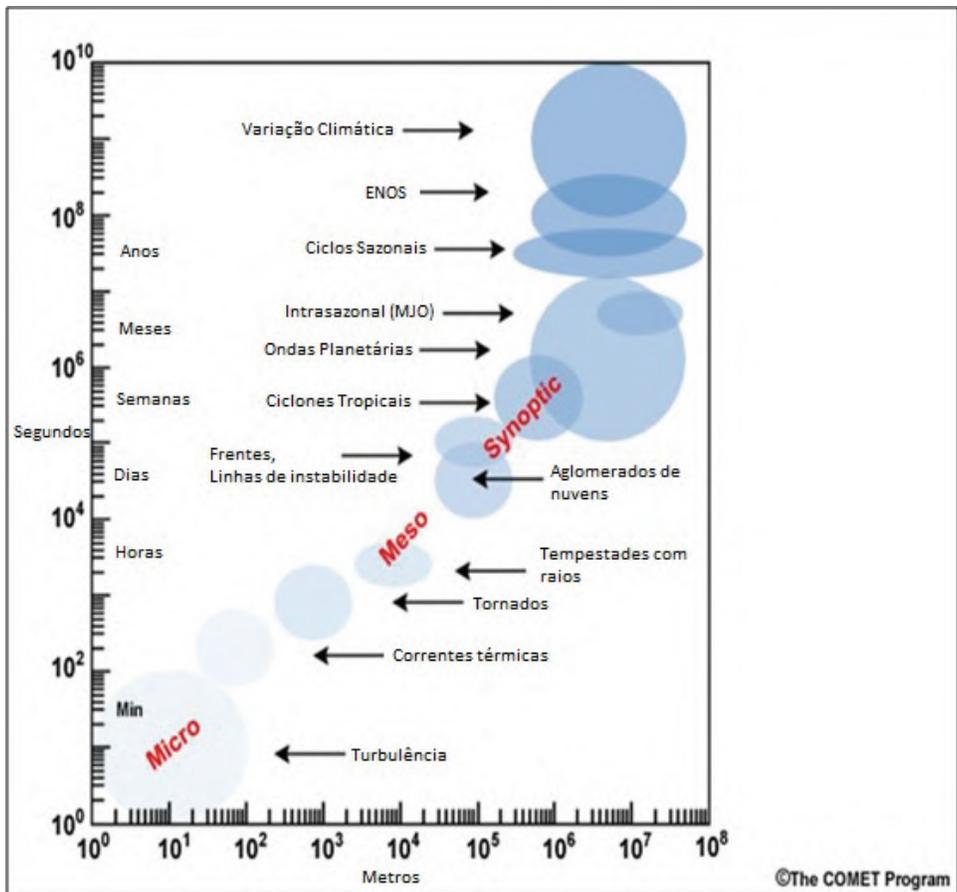


Figura 16 Escala espacial e temporal dos processos da atmosfera. *Fonte:* The University Corporation for Atmospheric Research. The COMET Program.

Além variabilidade espaço-temporal dos sistemas atmosféricos existe a alteração de intensidade de atuação. A dinâmica atmosférica apresenta certo ritmo se manifestando numa sucessão habitual dos tipos de tempo, conceito destacado por Max Sorre, e se manifesta também em eventos excepcionais, os quais, embora esporádicos, são os que verdadeiramente impactam a vida no planeta. Eventos extremos são aqueles que, em termos meteorológicos ou climáticos, apresentam grandes desvios da média e podem ocorrer com frequência de dias ou milênios.^{19,20}

Na interação dos eventos atmosféricos com o espaço geográfico, entende-se que existe uma diferença com relação ao impacto causado em cada região atingida. Durante a passagem do furacão Matthew, por exemplo, a vida dos habitantes da Flórida e do Haiti foi afetada de formas diferentes, apesar de terem sido atingidos pelo mesmo evento atmosférico.

Isso porque as regiões são dotadas de características próprias, tanto no que diz respeito às características físicas como: relevo e vegetação; quanto às características sociais como: uso e ocupação do solo, economia e organização da sociedade. Ou seja, o impacto do sistema atmosférico não depende somente de si mesmo, mas das características intrínsecas à região afetada. A Figura 17 mostra o furacão Matthew passando pelo Haiti e as Figuras 18 e 19 ilustram as formas diferenciadas de lidar com tal evento meteorológico.²¹

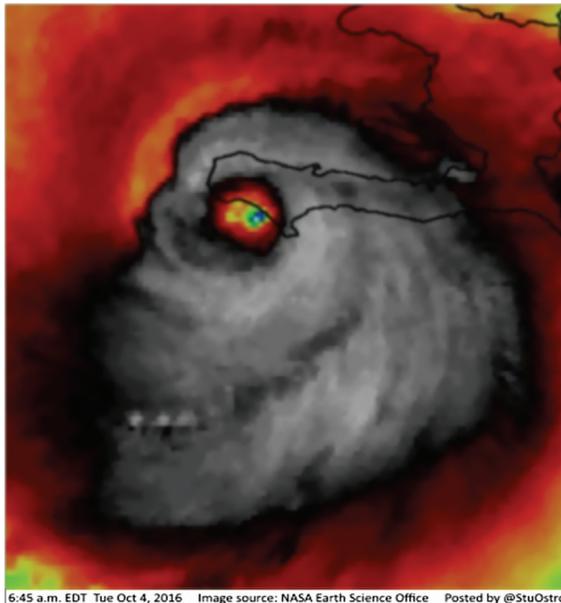


Figura 17 Imagem de satélite do furacão Matthew. *Fonte:* The WeatherChannel.



Figura 18 População carrega seus pertences durante a passagem do furacão Matthew. Porto Príncipe, Haiti, outubro de 2016. *Fonte:* G1.



Figura 19 Equipe de resgate agindo após a passagem do furacão Matthew. Flórida, Estados Unidos, outubro de 2016. *Fonte:* G1.

Essas diferenças podem ser entendidas a partir da análise histórica da produção do espaço de cada localidade, de acordo com as suas intencionalidades.

Não se pode esquecer a conjuntura que vivenciamos, devemos analisar com mais acurácia a intencionalidade dos agentes responsáveis pela produção do espaço. Considerando o contexto globalizado e neoliberal, pode-se afirmar que o capitalismo lidera o planejamento dos municípios, estados e países.

Dessa forma, toda região é dotada da intencionalidade do capital e, inerente a isso, dotada de divergência de interesses. Nem sempre a sociedade estará preparada para superar os efeitos de eventos adversos uma vez que os interesses financeiros se sobrepõem aos sociais.²⁴

A partir da compreensão da intencionalidade no planejamento e estruturação das regiões e, considerando que o clima é fator condicionante para o desenvolvimento da humanidade, é preciso pensar em ações mais incisivas no sentido de adaptação da sociedade ao impacto dos elementos climáticos.

Diante disso, tem-se um cenário no qual, por um lado, o planejamento segue os interesses do capital e, por outro, existe a necessidade de investimentos para adaptação às condições climáticas. Segue abaixo, uma coletânea sobre os esforços já realizados por parte de governos, academia e centros de pesquisa com o objetivo de aumentar a resiliência aos eventos meteorológicos e climáticos.

POLÍTICAS PÚBLICAS

Tendo em vista a necessidade de adaptação tanto ao comportamento habitual como o excepcional do clima é que tem-se desenvolvido políticas públicas que norteiam ações para se tentar reduzir a vulnerabilidade ao clima.

Os conceitos relacionados ao tema desastres naturais estão sendo melhor definidos tanto pela academia quanto pelos órgãos públicos. Algumas dessas políticas e convenções estão descritas a seguir.

Convenção das Partes

No âmbito mundial podemos citar o Marco de Ação de Hyogo 2005-2015, instrumento adotado pelos Estados Membros das Nações Unidas com o objetivo de estabelecer prioridades de ações para a redução de riscos, diminuição da vulnerabilidade e aumento da resiliência nas nações.

Essas ações foram planejadas para ocorrerem de 2005 a 2015, para então serem discutidas e reformuladas. As ações estabelecidas no Marco de Ação de Hyogo foram:

1. Fazer com que a redução dos riscos de desastres seja uma prioridade.
2. Conhecer o risco e tomar medidas.
3. Desenvolver maior compreensão e conscientização.
4. Reduzir o risco.
5. Estar preparado e pronto para atuar.

Sucessivamente ao Marco de Ação de Hyogo ocorreu o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030, instrumento de governança também assinado pelos Estados Membros no qual as prioridades foram reformuladas e apresentadas da seguinte forma:

1. Compreensão do risco de desastres.
2. Fortalecimento da governança do risco de desastres para gerenciar o risco de desastres.
3. Investir na redução do risco de desastres para a resiliência.
4. Aumentar a preparação perante desastres para uma resposta eficaz e para "Reconstruir Melhor" em recuperação, reabilitação e reconstrução.

Esses documentos podem ser usados como guia de governança pelos países membros das Nações Unidas, bem como pelos países não membros.

No âmbito nacional brasileiro, a Lei 12.608, de 10 de abril de 2012, a qual institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) e, também, autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres.

A PNPDEC trata das questões de redução de risco e da vulnerabilidade da sociedade de forma mais direta à população que os Marcos de Ação de Hyogo e Sendai. Diante de temática complexa como a que trata da adaptação a eventos meteorológicos e climáticos, a PNPDEC demanda ações pensadas por profissionais de diversas áreas, incluindo tecnologia, planejamento, saúde, educação, dentre outras. De acordo com o texto:

A PNPDEC deve integrar-se às políticas de ordenamento territorial, desenvolvimento urbano, saúde, meio ambiente, mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos, geologia, infraestrutura, educação, ciência e tecnologia e às demais políticas setoriais, tendo em vista a promoção do desenvolvimento sustentável.²⁶

Além da PNPDEC, no âmbito de ação das prefeituras municipais, existe o Programa "Cidades Resilientes", pelo qual as cidades devem se preparar para enfrentar eventos adversos, e isso deve ser feito por meio de planejamento,

zoneamento e obras de interesse público. A ONU lançou, em 2012, um guia para gestores públicos locais intitulado “Como construir cidades mais resilientes”, no qual aponta e descreve estratégias que podem ser adotadas pelos governantes locais interessados na redução dos riscos aos desastres e aumento da resiliência de seu município.

Esse guia enfatiza dez passos prioritários para a construção de cidades resilientes a desastres. São eles:

1. Organizar e melhorar o quadro institucional e administrativo.
2. Reservar recursos e financiamentos direcionados para a redução de riscos aos desastres.
3. Conhecer os riscos: avaliação de risco e ameaça múltipla.
4. Proteger e melhorar a resiliência de infraestrutura.
5. Proteger os serviços essenciais: educação e saúde.
6. Elaboração de regulamentos e planos de uso e ocupação do solo.
7. Realizar o treinamento, educação e sensibilização pública.
8. Realizar a proteção ambiental e fortalecimento dos ecossistemas.
9. Garantir a preparação, sistemas de alerta e alarme, e resposta efetivos.
10. Recuperação e reconstrução de comunidades.²⁵

Na Academia, essa temática vem sendo discutida também por profissionais de diversas áreas, como, por exemplo, Geografia, Sociologia, Arquitetura, Meteorologia, Medicina, Economia e Engenharia Civil e Ambiental. Isso significa que é necessário estabelecer conceitos claros para todos os profissionais entenderem o que está sendo discutido e então poder colaborar para a resolução desses desafios. Luci Hidalgo Nunes destaca esse aspecto da temática:

No nível científico, a avaliação de desastres naturais foca na interação entre natureza e sociedade, e, portanto, deve recorrer à teoria, métodos e resultados de pesquisas de distintos domínios da ciência. Mas a integração de teorias e métodos de diferentes áreas não é uma tarefa fácil: análises focadas em componentes físicas contrastam fortemente com estudos sociais, cada qual apresenta seu próprio estilo, linguagem e diferentes padrões de performance, replicabilidade, incertezas e significâncias. Ainda assim, é fundamental estabelecer uma estrutura conceitual unificada dentro da qual os cientistas sociais e naturais possam trabalhar juntos. (Tradução nossa).²⁷

A autora ainda definiu os conceitos de risco, vulnerabilidade e desastre de forma integrada, tal como condiz à realidade. Para a autora, “risco” é a probabilidade de consequências danosas na interação entre um evento

deflagrador, natural ou não, e a situação de vulnerabilidade da população. Sendo ele a probabilidade, o risco pode ser assumido, estimado, avaliado, diminuído ou aumentado. Se diminuir a vulnerabilidade, reduz o risco.²⁸

Ainda de acordo com a autora, a vulnerabilidade, por sua vez, revela quanto a sociedade é capaz ou não de superar os efeitos adversos de sua exposição aos sinistros com rupturas na rotina e impactos socioambientais. O desastre ocorre quando a capacidade da sociedade atingida, em amortecer os efeitos negativos de um sinistro, é superada, ocasionando, assim, a “ruptura das funcionalidades do território.

Demonstrando maior gravidade no que concerne ao desastre, a autora diz ser o ápice de um processo que, quando ocorre o desastre, revela o desequilíbrio contínuo entre as forças naturais contrariamente às forças sociais. Suas consequências, inclusive, podem estar mais relacionadas com o processo de uso e ocupação do espaço pela sociedade do que com o evento físico em si.

Risco, Perigo, Desastre e Vulnerabilidade também podem ser definidos como uma causalidade de eventos. Faz parte da dinâmica da natureza ocorrer diversos tipos de fenômenos, sendo estes monitorados ou não pelo homem. Preocupa-se a partir do momento que tais fenômenos ocorrerem ou se deslocarem em direção a um sistema social. A partir daí tem-se uma situação de perigo.²⁹

De acordo com o autor, há duas possibilidades de sucessão. Uma possibilidade é esse evento causar impactos de difícil superação pelas comunidades afetadas, como a falta de fornecimento de água, luz e telefonia, dificuldade de provimento de alimentos e interrupção da coleta de lixo e rede de esgoto. Ou, em segundo caso, causar impactos mínimos ou nulos. Na ocorrência da primeira possibilidade, está estabelecido o desastre. Na ocorrência da segunda, tem-se apenas o evento natural. O esquema da Figura 20 ilustra tais conceitos em que o risco é a probabilidade entre o perigo e o desastre.

Como forma de sistematizar, quantificar e operacionalizar as questões relacionadas aos sinistros que atingem a população, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) segue uma conceituação mais objetiva dos termos relativos. Dessa forma, os municípios podem emitir relatórios mais específicos sobre a situação pós-desastre e, então, conseguir ajuda de outros órgãos, se necessário, para tomar medidas efetivas para o reestabelecimento da rotina da população. O Quadro 3 traz a definição dos termos de acordo com a PNPDEC:²⁶

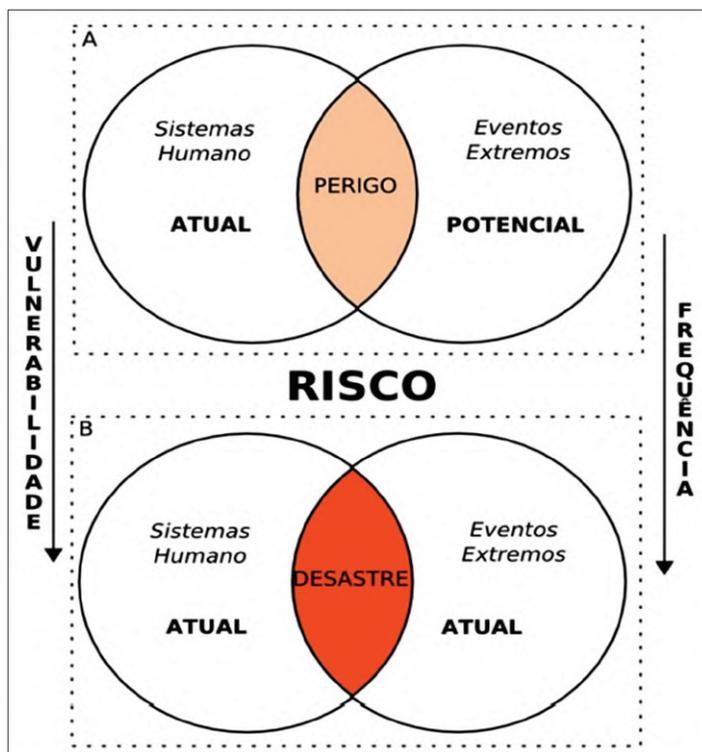


Figura 20 Esquema explicativo de Risco, Perigo, Desastre e Vulnerabilidade. *Fonte:* Tobin e Montz (1997) *apud* Marcelino (2008).

Quadro 3 Definição de conceitos relativos aos sinistros de acordo com a PNPDEC.

Desastre
<p>Resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais.</p> <p>A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e a vulnerabilidade do sistema e é quantificada em função de danos e prejuízos.</p>
Risco
<p>Medida de danos ou prejuízos potenciais, expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das consequências previsíveis.</p> <p>Relação existente entre a probabilidade de que uma ameaça de evento adverso ou acidente determinados se concretize, com o grau de vulnerabilidade do sistema receptor a seus efeitos.</p>

Quadro 3 Definição de conceitos relativos aos sinistros de acordo com a PNPDEC (*continuação*).

Dano
<p>Medida que define a intensidade ou severidade da lesão resultante de um acidente ou evento adverso.</p> <p>Perda humana, material ou ambiental, física ou funcional, que pode resultar da perda de controle sobre o risco.</p> <p>Intensidade das perdas humanas, materiais ou ambientais, induzidas às pessoas, comunidades, instituições, instalações e/ou ecossistemas, como consequência de um desastre.</p>
Vulnerabilidade
<p>Condição intrínseca ao corpo ou sistema receptor que, em interação com a magnitude do evento ou acidente, caracteriza os efeitos adversos, medidos em termos de intensidade dos danos prováveis.</p> <p>Relação existente entre a magnitude da ameaça, caso ela se concretize, e a intensidade do dano consequente.</p>
Ameaça
<p>Estimativa de ocorrência e magnitude de um evento adverso, expressas em termos de probabilidade estatística de concretização do evento e da provável magnitude de sua manifestação.</p>
Segurança
<p>Estado de confiança, individual ou coletivo, baseado no conhecimento e no emprego de normas de proteção e na convicção de que os riscos de desastres foram reduzidos, em virtude de terem sido adotadas medidas minimizadoras.</p>
Defesa Civil
<p>Conjunto de ações preventivas, de socorro, assistenciais e reconstrutivas, destinadas a evitar ou minimizar os desastres, preservar o moral da população e restabelecer a normalidade social.</p>
Situação de Emergência
<p>Reconhecimento legal pelo poder público de situação anormal, provocada por desastre, causando danos suportáveis à comunidade afetada.</p>
Estado de Calamidade Pública
<p>Reconhecimento legal pelo poder público de situação anormal, provocada por desastre, causando sérios danos à comunidade afetada, inclusive à incolumidade ou à vida de seus integrantes.</p>

Quadro 3 Definição de conceitos relativos aos sinistros de acordo com a PNPDEC (*continuação*).

Desenvolvimento Sustentável
<p>É aquele que atende às necessidades do presente, sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades.</p> <p>É o uso e gestão responsáveis dos recursos naturais, de modo a propiciar maior benefício às gerações atuais, mantendo, porém, suas potencialidades para atender às necessidades e aspirações das gerações futuras, pelo maior espaço de tempo possível.</p>

Fonte: Organizado pelos autores (2017).

CRISE HÍDRICA DE 2013-2014

O Sistema Cantareira é o maior reservatório de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. No verão quente e seco de 2013/2014, faltou água para grande parte da população abastecida por esse reservatório.

Em virtude dos impactos gerados pela seca sobre uma região densamente habitada e com grande representatividade econômica para o país, a crise hídrica do Sistema Cantareira ganhou repercussão mundial. Pela necessidade de reconhecer as responsabilidades, processo conhecido também por *accountability*, havia algumas questões tinham de ser respondidas, como, por exemplo, se essa seca foi prevista ou não, se realmente as chuvas foram abaixo do normal ou se houve má gerência dos recursos hídricos e, a partir disso, quais as medidas a serem tomadas para reduzir o prejuízo pela falta de abastecimento.

De acordo com o diagnóstico da estação chuvosa 2013/2014 na Região Sudeste do Brasil, com ênfase no Sistema Cantareira, elaborado pelo INPE-CPTEC, o verão de 2013/2014, presente como anexo no relatório "Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da SABESP-CHESS"³⁹, a área analisada apresentou valores de precipitação abaixo da média climatológica, caracterizando como o verão mais seco da série histórica disponível, desde 1963.

Ainda de acordo com o diagnóstico, tal seca não pôde ser prevista. Inclusive, os padrões climáticos detectados pelo monitoramento hidrometeorológico previram quantidade normal de chuvas ou acima da média. Afirma-se no relatório que:

Embora uma região de baixa previsibilidade na ausência de um forte padrão de anomalias de temperatura no Oceano Pacífico, a presença de

anomalias ligeiramente negativas de TSM sobre o Pacífico Equatorial durante os meses de setembro e outubro de 2013 levou à previsão de probabilidade de chuvas normais ou acima da média sobre o norte de SP e sul de MG. Em outras palavras, a comunidade científica não identificou com meses de antecedência nenhum indício da possibilidade de uma redução acentuada das chuvas durante a estação chuvosa 2013-2014 sobre a Região Sudeste.³⁹

Foram apontados como a causa dessa seca impactante o Centro de Alta Pressão e dois mecanismos associados a ele:

No interior dessa região de alta pressão atmosférica, o ar se torna mais denso e, portanto, mais pesado, inibindo o levantamento do ar úmido desde a superfície até os altos níveis da atmosfera, necessários para a formação das precipitações. Por outro lado, a tendência descendente do ar no âmbito desse sistema transporta ar muito seco dos níveis mais altos da atmosfera para as proximidades da superfície. Em resumo, a região de alta pressão deixa o ar mais seco e estável, inibe a formação das pancadas de chuva típicas da estação e, ainda, “bloqueia” a passagem de sistemas frontais e o desenvolvimento das Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), responsáveis por grandes volumes de chuva. Por essa razão, esse tipo de sistema é tecnicamente conhecido como “sistemas de bloqueio atmosférico”.³⁹

O primeiro impacto associado foi o conseqüente ressecamento da vegetação e do solo, que seriam importante fonte de umidade para a atmosfera, em virtude do bloqueio atmosférico (ASAS) sobre o sudeste do continente sul-americano. O segundo resultou da interação entre a atmosfera e o oceano, em que a permanência de céu limpo sobre o continente provocou o aumento da temperatura da superfície. Uma vez que o sistema de alta pressão apresenta interior quente, ele tende a se posicionar sobre as águas mais quentes. E o terceiro foi a manutenção do sistema de bloqueio, talvez mais importante que o anterior, pois atuou por um longo período, resultando em escassez hídrica.

As imagens das Figuras 21 e 22 mostram o centro de alta pressão e a anomalia da temperatura da superfície do mar.

Os impactos e a repercussão da crise hídrica de 2014 na Região Metropolitana de São Paulo fez emergir a baixa resiliência da região para esse tipo de evento, incluindo desde a fragilidade dos modelos de previsão meteorológica e climática até o gerenciamento dos recursos hídricos e a infraestrutura de abastecimento, a qual apresenta alto percentual de perda de água potável antes mesmo de chegar à casa do cidadão.

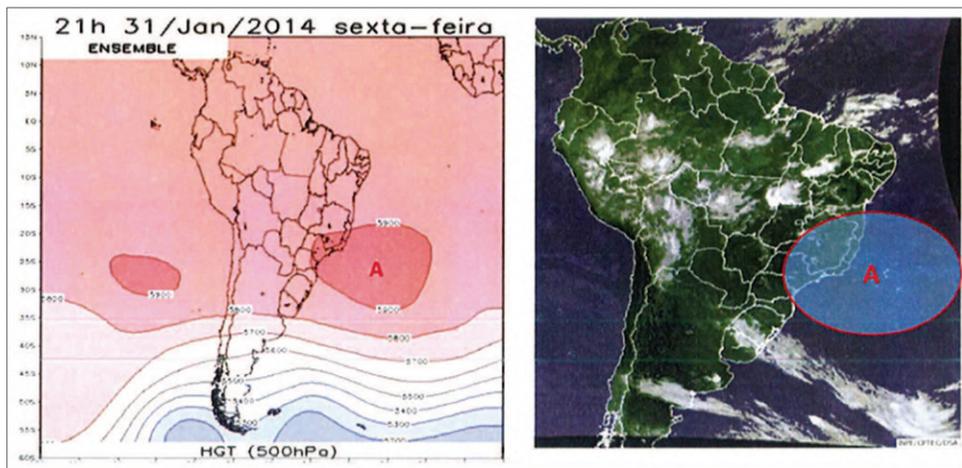


Figura 21 Localização do centro de alta pressão atmosférica. *Fonte:* SABESP, CHES (2015).

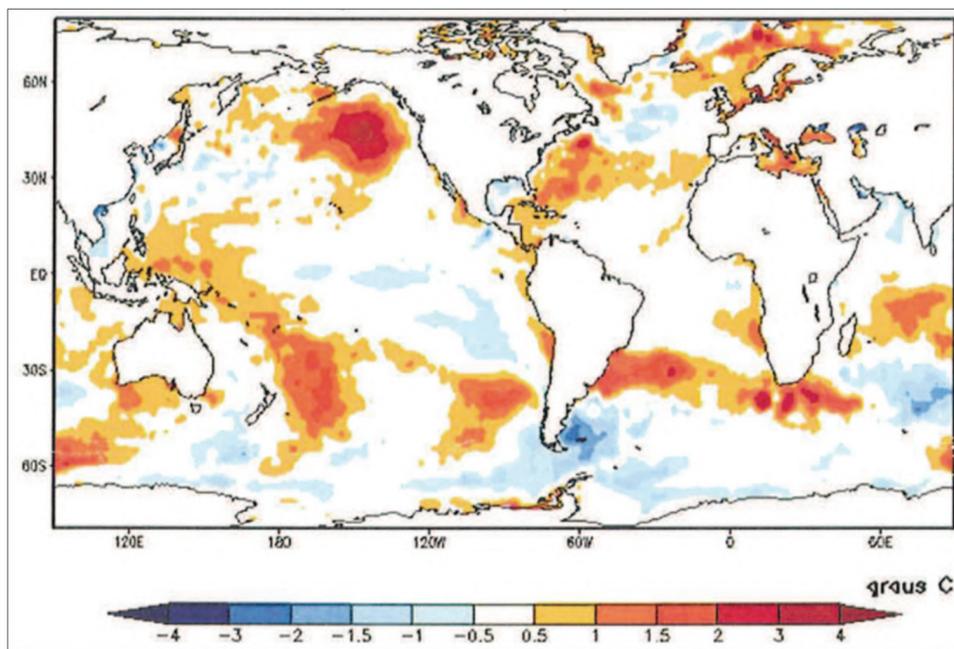


Figura 22 Anomalia da temperatura da superfície do mar. *Fonte:* SABESP, CHES (2015).

ESTUDO DE CASO

ESTATÍSTICA DESCRITIVA DA PRECIPITAÇÃO E DANOS OCORRIDOS NO VERÃO DE 2009/2010 EM SÃO LUIZ DO PARAITINGA – SP

A finalidade do presente trabalho foi analisar o evento extremo de precipitação ocorrido durante o verão de 2009/2010, entre os meses de dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), que causou inundação na cidade de São Luiz do Paraitinga (SP), resultando em grandes perdas do patrimônio histórico.

Entende-se que, em virtude de processos históricos e econômicos de formação territorial, parte da população com menor poder aquisitivo acaba habitando em áreas menos privilegiadas⁶. No que diz respeito a impactos de eventos extremos, essas áreas podem ser consideradas de risco a inundações, desabamentos, dentre outros, tornando parte da população que lá habita mais vulnerável a sofrer com tais impactos.

Historicamente, próximo à bacia do rio Paraíba do Sul, por exemplo, instalaram-se cidades que tiveram um desenvolvimento econômico rápido, o que não significa implantação de infraestruturas, deixando a cidade mais resiliente a eventos excepcionais. Exemplo disso foram os danos registrados pela Defesa Civil durante o verão de 2009 para 2010, que atingiu principalmente a cidade histórica de São Luiz do Paraitinga.

FERRAMENTAS

O município de São Luiz do Paraitinga localiza-se na porção leste do estado de São Paulo, onde a cidade se instalou às margens do rio Paraitinga (Figura 23).

Na análise foram utilizados os dados de precipitação e aplicadas medidas de estatística descritiva, que ajudam a compreender a variação na quantidade de precipitação ao longo da série histórica¹⁹. Tais medidas foram: total acumulado, desvio da média e histograma.

Sabendo que o regime de chuvas de São Luiz do Paraitinga apresentam período de verão, acumulados com maior precipitação entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, optou-se por utilizar esses três meses como escala sazonal-temporal dentro de uma série de 32 anos (1982 a 2014).

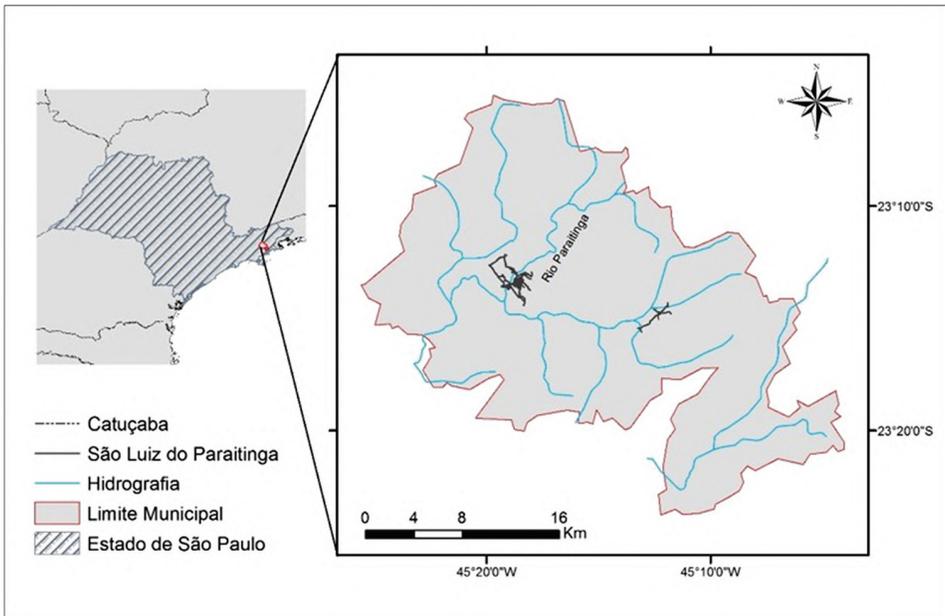


Figura 23 Localização do município de São Luiz do Paraitinga. *Fonte:* Os autores (2016).

O Total Acumulado expressa, em milímetros, a somatória de chuvas durante o verão:

$$\sum \text{dez, jan, fev}$$

Porém, o total acumulado não apresenta o valor comparado à série analisada. Para isso aplicou-se o desvio da média da série, pelo qual se calculou a média dos 32 verões e subtraiu-se o total acumulado de cada verão à média da série:

$$y = \sum \text{dez, jan, fev} - \bar{x}$$

em que:

y = desvio da média;

\bar{x} = média da série

Frente à variabilidade dos elementos climáticos, como a precipitação, sabe-se que há valores que ocorrem frequentemente e outros menos frequentes. Por isso faz-se importante o histograma onde mostra-se quantas vezes uma classe de valores aparece na série analisada. A fórmula de Sturges foi utilizada para o cálculo do histograma:

$$k = 1 + (3,3\log_{10}n)$$

k = número de classes

$$\therefore k = 1 + (3,3\log_{10}n)$$

n = número de anos do período (32 verões)

$$\therefore k = 6$$

Dessa forma, para a série de 32 anos agruparam-se os totais acumulados em seis classes. A partir daqui dividiu-se o valor da amplitude dos dados (maior valor de chuva/menor valor de chuva) pela quantidade de classes. Tem-se, então, o intervalo entre as classes (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1 Valores para cálculo do histograma.

Verão	Quantidade de chuva	
2009/2010	870,50	Maior valor
2013/2014	347,50	Menor valor
	523,00	Amplitude
	87,1666667	Intervalo das classes

Tabela 2 Classes geradas para o histograma.

Classes	Frequência
de 347,5 a 437,67	3
de 437,67 a 521,83	6
de 521,83 a 609,00	7
de 609,00 a 696,17	8
de 696,17 a 783,33	3
de 783,33 a 870,50	5

Para complementar as medidas estatísticas aplicadas na pesquisa, foi realizado o estudo dos sistemas atmosféricos atuantes durante os dias do evento entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com base na análise sinóptica feita pela revista *Climanálise*. Essa análise permite o prognóstico dos tipos de tempo resultantes; observar a combinação dos sistemas atmosféricos durante o evento extremo em questão permitirá melhor entendimento sobre sua gênese, desenvolvimento, atuação e dissipação.

Num terceiro momento foi realizado o estudo dos impactos causados na cidade, utilizando o Banco de Dados de Desastres Naturais do Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet).

Tal metodologia pode servir de apoio a estudos e relatórios de análise de desastres naturais e posteriormente embasar medidas de prevenção de desastres.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Análise Estatística

Na Figura 24 é possível ver os totais acumulados durante os 32 verões analisados. Em vermelho está destacado o verão de 2009/2010, no qual ocorreu o evento extremo de maior precipitação nos acumulados ao longo da série, num total de 870,50 milímetros de chuva. Pode-se observar, que, ao longo da série, não ocorreram valores nos totais acumulados de precipitação superiores a desse verão, o mais próximo foi no verão de 2010/2011, com 839,40 milímetros de chuva.

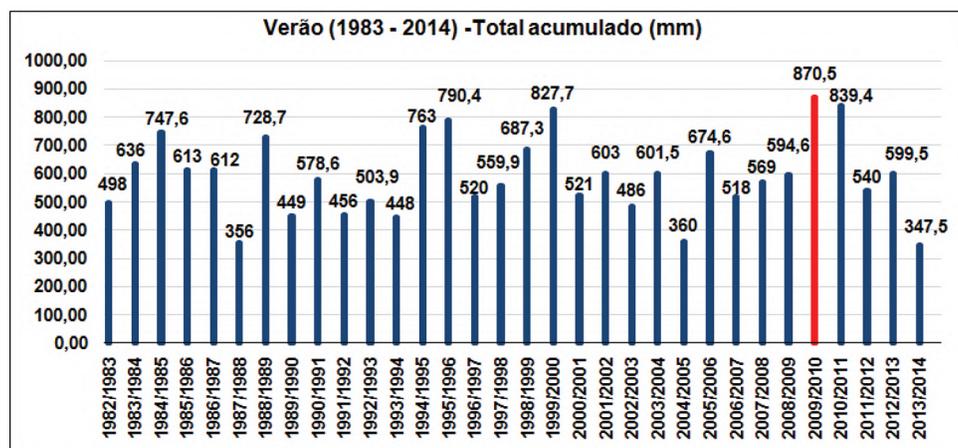


Figura 24 Totais acumulados (mm) referentes aos verões de 1983 a 2014. Fonte: Os autores (2016).

A Figura 25 mostra o cálculo do desvio da média para essa série, a qual apresentou um valor de 590,81 mm de precipitação. No entanto, quando o verão de 2009/2010 foi analisado, observou-se um excedente de 279,69 mm em relação à média. Esse é o valor do desvio da média durante o trimestre considerado chuvoso ao longo da série.

De acordo com o histograma gerado pela fórmula de Sturges (Figura 26), o verão em estudo compreende a classe de 783,33 a 870,50 milímetros de chuva, sendo a classe com o maior valor; por sua vez, tal classe apareceu cinco vezes dentro da série de 1983 a 2014.

É a segunda menor frequência de valores, caracterizando esse evento como excepcionalmente chuvoso. Os valores de precipitação considerados habituais para o local estudado, de acordo com o histograma, ficam entre 521,83 e 609,00 e entre 609,00 e 696,17 mm de chuva, sendo as duas maiores frequências observadas.

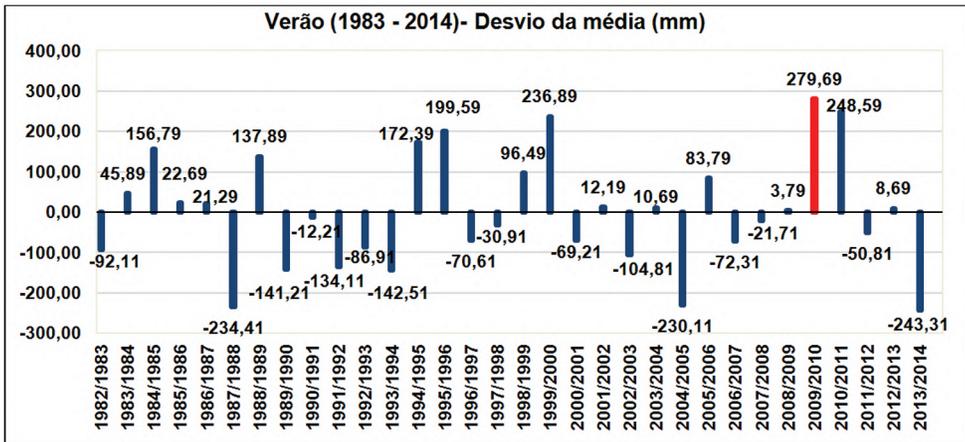


Figura 25 Desvios da média (mm) referentes aos verões de 1983 a 2014. *Fonte:* Os autores (2016).

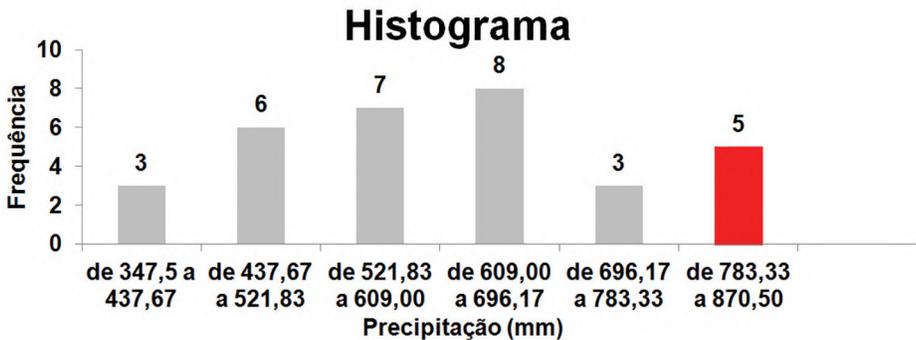


Figura 26 Histograma dos totais acumulados (mm) referente aos verões de 1983 a 2014. *Fonte:* Os autores (2016).

Sistemas Atmosféricos Atuantes

O mês de dezembro marcou o início do período de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) na região central do Brasil. Se por um lado é nesse período que ocorrem os maiores acumulados pluviométricos, sendo de suma importância

no processo de recarga dos corpos hídricos, abastecimento dos reservatórios, para a agricultura e a sociedade, por outro é nessa época também, que ocorrem diversas repercussões no espaço geográfico decorrentes da grande quantidade de chuva.

As chuvas no mês de dezembro ultrapassaram os valores das médias na maior parte do Brasil⁵⁰. Esses totais acumulados estiveram associados à formação de dois episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o primeiro entre os dias 4 e 9, e o segundo entre os dias 12 e 15, acumulando 287,8 mm.

Além da ZCAS, ocorreu configuração do escoamento de umidade de verão, em virtude da formação de um centro de baixa pressão associado à atuação da Alta da Bolívia e aos vórtices ciclônicos na média e alta troposfera que se formaram sobre a América do Sul, contribuindo para maior convergência de umidade que se estabeleceu sobre a região Sudeste do Brasil, sendo estes os principais sistemas responsáveis pelo aumento das chuvas⁵¹.

Com isso, o acumulado de chuvas superou a média esperada para todo o mês de dezembro, causando diversas perdas à sociedade, principalmente na cidade de São Luiz do Paraitinga, que registrou excesso de chuva no período de 28 de dezembro (2009) a 1 de janeiro (2010) (Figura 27), acumulando 192,1 mm (Figura 28).

Entre os meses de janeiro e fevereiro, as chuvas continuaram próximas da média para a série. Entre esses dois meses, as chuvas estiveram associadas à formação de regiões de convergência de umidade sobre a região central do Brasil, como também uma fraca caracterização de episódios bem estabelecidos de ZCAS atuando sobre a região de São Luiz do Paraitinga entre o período de 7 a 9, 14 a 16 e 20 a 23 de janeiro⁵²

No mês de fevereiro não houve atuação da ZCAS, resultando em menor intensidade nos totais pluviométricos distribuídos durante o mês de fevereiro⁵³.

Assim, os valores pluviométricos no verão de 2009/2010 estiveram, no mês de dezembro, muito acima da média histórica: janeiro com um valor próximo à média e fevereiro com um valor ligeiramente abaixo da média (Tabela 3).

Portanto, o mês de dezembro de 2009 foi o único no verão de 2009/2010 que se mostrou excepcional dentro do período e também responsável por toda a repercussão gerada ao município de São Luiz do Paraitinga.

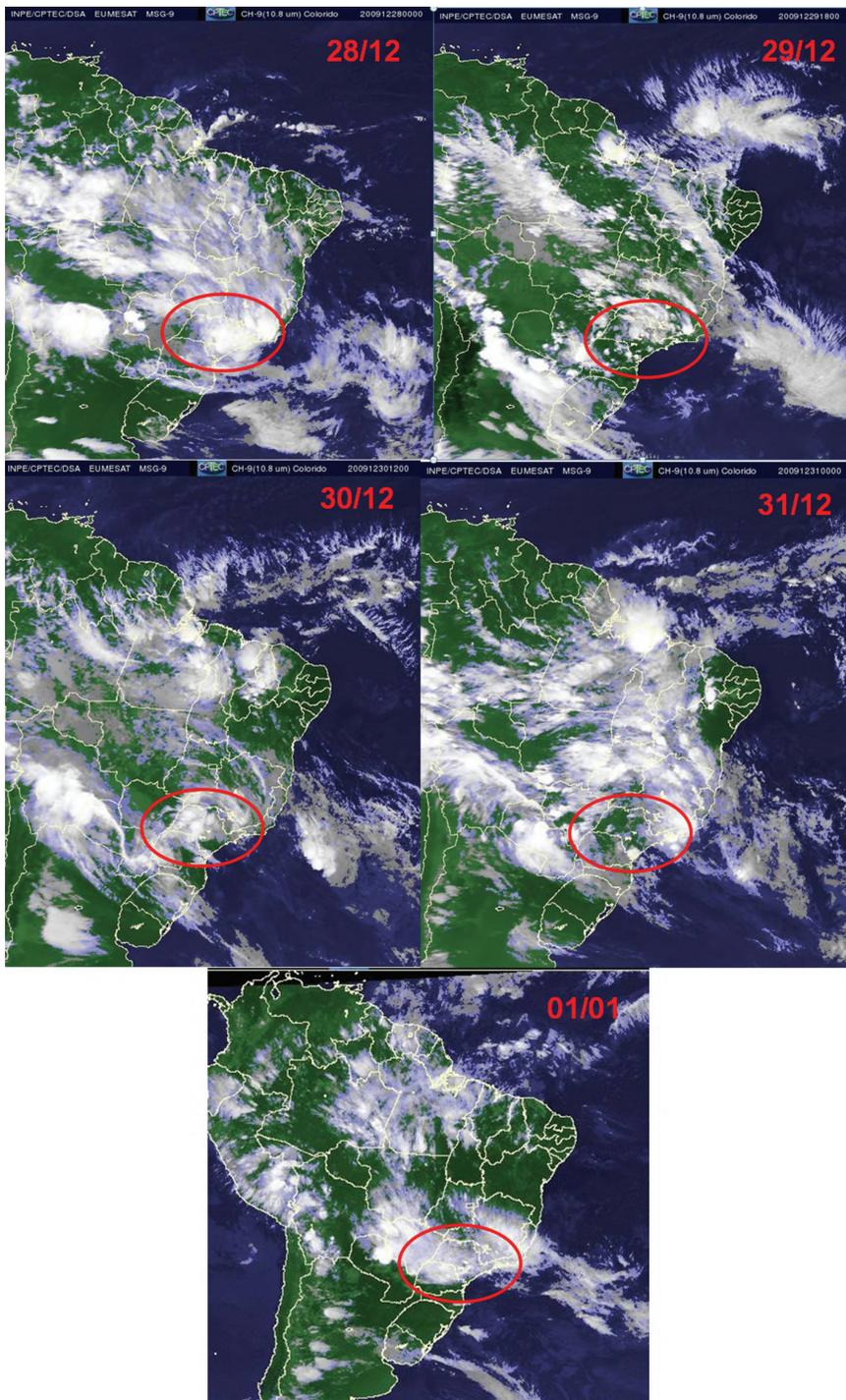


Figura 27 Imagens de satélite do período de 28/12/2009 a 01/01/2010. *Fonte:* Os Autores (2016).

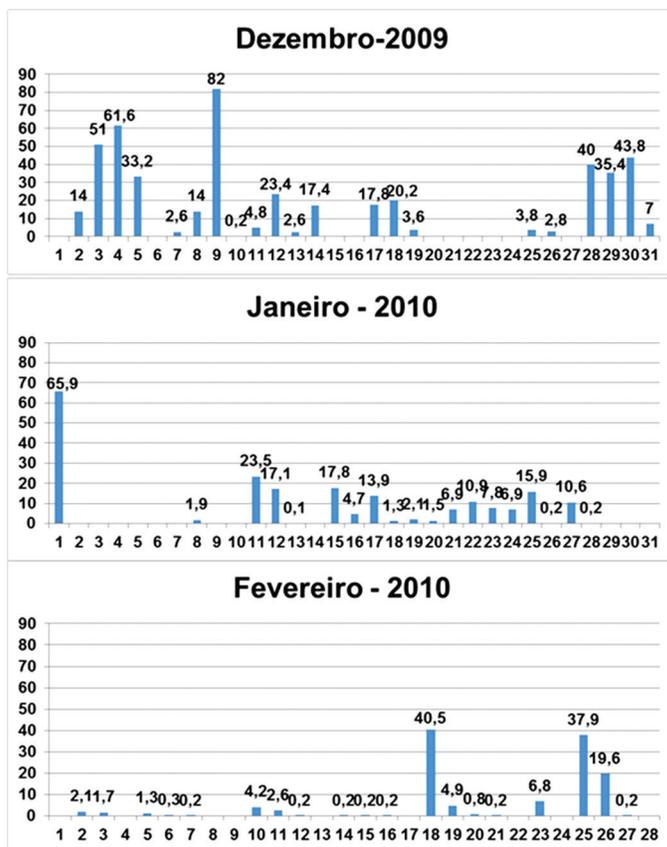


Figura 28 Totais de chuvas diárias dos meses (dez, jan e fev): 2009-2010. *Fonte:* Os autores (2016).

Tabela 3 Total de precipitação dos meses do verão 2009/2010 em relação à média histórica mensal.

DEZEMBRO 2009	TOTAL DE PRECIPITAÇÃO (mm)
ESTAÇÃO DE SÃO LUIZ	481,2
MÉDIA DO MÊS DE DEZEMBRO – (1982-2014)	178,32
JANEIRO 2009	TOTAL DE PRECIPITAÇÃO (mm)
ESTAÇÃO DE SÃO LUIZ	209,2
MÉDIA DO MÊS DE JANEIRO – (1982-2014)	216,16
FEVEREIRO 2009	TOTAL DE PRECIPITAÇÃO (mm)
ESTAÇÃO DE SÃO LUIZ	124,1
MÉDIA DO MÊS DE FEVEREIRO – (1982-2014)	194,54

Fonte: Os autores (2016).

Danos causados pelos impactos

A Tabela 4 sintetiza as ocorrências registradas pela Defesa Civil referentes ao Evento Extremo de Precipitação, especificando o fenômeno, o dano para a sociedade e o número de ocorrências. Tal síntese só foi possível em virtude do Banco de Desastres Naturais do IPMet da UNESP. A partir da tabela é possível compreender a magnitude dos impactos sofridos pela sociedade. A Figura 29, registro do dia 2 de janeiro, mostra o relevo local onde a cidade foi instalada e o avanço do rio Paraitinga inundando toda a cidade.

Tabela 4 Fenômenos e danos do evento extremo.

São Luiz do Paraitinga		
Ocorrência em 31 dezembro 2009 e 1 janeiro 2010		
Fenômeno	Dano	Quantidade
Chuvas fortes, frente fria/chuvas contínuas e chuvas moderadas	Desabrigados	4000
	Desalojados	5000
	Feridos	2
	Vítima fatal	1
	Queda de barreira	
	Transbordamento de rios e córregos	
	Danos em pontes	
	Deslizamento de terra	12
	Desabamentos/rachadura/danos em imóveis	844
	Corte no funcionamento de energia e água	
	Escorregamento de encosta	
	Rompimento da rede de água e esgoto	
Total de danos		9859
Total de vítimas		9003

Fonte: Os autores (2016).



Figura 29 Inundação em São Luiz do Paraitinga. Registro do dia 02/01/2010. *Fonte:* Os autores (2016).

CONCLUSÕES DO ESTUDO DE CASO

As medidas estatísticas aplicadas ao estudo permitiram compreender a habitualidade e a quantidade excepcional de chuva para o local. Com isso, foi possível observar que, durante o verão de 2009/2010, o mês de dezembro foi mais chuvoso, com acumulado de 481,2mm, sendo a média de 178,3mm. Nesse mês, a precipitação foi mais que o dobro da média esperada e, conseqüentemente, responsável pela presença de evento extremo de precipitação.

É importante frisar que os impactos gerados pelo evento atmosférico só se efetivaram porque a quantidade de chuva se acumulou desde o início de dezembro e, naturalmente, aumentou a vazão do rio, bem como a saturação de água no solo, até inundar a cidade de São Luiz do Paraitinga.

A partir das análises sinóticas disponibilizadas pelo boletim *Climanálise* verificou-se que o evento extremo foi associado ao fenômeno da ZCAS e também à formação de um centro de baixa pressão, que, combinados com a atuação da Alta da Bolívia e os vórtices ciclônicos na média e alta troposfera

que se formaram sobre a América do Sul, contribuíram para maior convergência de umidade sobre a região Sudeste do Brasil.

Nessa dinâmica entre atmosfera e relevo, a cidade instalada mostrou-se vulnerável aos impactos. O banco de dados de Desastres Naturais do IPMet contabilizou um total de 9003 vítimas e 9859 danos, entre eles desabamentos e deslizamentos. Pode-se levar em conta a falta de preparo do Poder Público, que provavelmente não se preocupou com ações preventivas, diante de eventos extremos como esse. A situação se agrava pois São Luiz do Paraitinga é considerado patrimônio histórico nacional, dessa forma, a perda desses prédios históricos significa perda de imenso valor histórico.

CONCLUSÕES

O conhecimento sobre o clima, o tempo e sua previsibilidade vem sendo aperfeiçoado cada vez mais. Desde interpretações observacionais até o uso de satélites orbitais têm permitido tal avanço do tema. No entanto, o acesso e aplicação desses produtos estão à mercê das intencionalidades de quem detém o conhecimento e as tecnologias necessárias.

Vimos neste capítulo que o estudo climatológico ultrapassa o cálculo de médias e previsão do tempo. É importante entender a interação entre atmosfera e biosfera, sendo o clima um condicionante natural a que todos estamos submetidos.

O domínio sobre técnicas de previsão pode ser considerado também um fator estratégico para o desenvolvimento de uma nação. A partir disso é possível planejar as atividades agrícolas e energéticas. Inclusive, conhecer os extremos climáticos e sua repercussão na sociedade permite a redução de riscos e desastres.

Com este capítulo espera-se elucidar os processos e sistemas atmosféricos, como esses são estudados sob o espectro da climatologia dinâmica e suas repercussões na esfera socioambiental.

RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR

BORSATO, V. A. **A dinâmica climática do Brasil e massas de ares**. 1. ed. Curitiba: CRV, 2016.

CALVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CONTI, J. B. **Clima e meio ambiente**. São Paulo: Atual, 1998.

MENDONÇA, F. A. **Riscos climáticos: vulnerabilidades e resiliência associados**. Jundiaí: Paco Editorial, 2014.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. A.; ZAVATTINI, J. A.; SANT'ANNA NETO, J. L. **Construção da climatologia geográfica no Brasil**. Campinas: Alínea, 2015.

SANT'ANNA NETO, J. L.; AMORIM, M. C. C. T.; SILVA, C. A. **Clima e gestão do território**. Jundiá: Paco Editorial, 2016.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: INMET, Stilo, 2006.

ZAVATTINI, J. A. **Estudos do clima no Brasil**. Campinas: Alínea, 2004.

QUESTÕES DE REVISÃO

- A América do Sul sofre a influência de cinco massas de ar. No Brasil, quais são as principais massas de ar e, também, os principais sistemas atmosféricos atuantes?
- Sabe-se que os elementos climáticos apresentam variabilidade de quantidade e intensidade no decorrer do tempo e do espaço. O ser humano vem se adaptando às tendências climáticas dentro dessa variabilidade, no entanto é preciso estar preparado para os eventos extremos também. Discorra sobre os tipos de eventos atmosféricos que impactam a vida da sociedade.
- As discussões políticas em Convenções e a criação de legislações relacionadas à temática climática têm se desenvolvido melhor desde o século XX. Faça uma linha do tempo elencando as Convenções já realizadas e as legislações brasileiras relacionadas a clima.
- O uso da tecnologia de monitoramento e de geoprocessamento tem contribuído no processo de prevenção e mitigação dos impactos de desastres naturais. Faça uma reflexão crítica a respeito do uso dessas ferramentas no contexto brasileiro, tanto por parte das autoridades como por parte da sociedade civil.

BIBLIOGRAFIA

[1] MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

[2] BORSATO, V. A.A Climatologia dinâmica e o ensino da geografia no segundo grau: uma aproximação ao problema. **Revista GeoNotas**, Maringá, v. 4, n. 1, 2000.

[3] BARROS, J. R.; ZAVATTINI, J. A. Bases conceituais em climatologia geográfica. **Mercator**–Revista de Geografia da UFC, Fortaleza, v. 8, n. 16, p. 255-261, maio/ago. 2009.

[4] MONTEIRO, C. A. F. **Análise rítmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho**. São Paulo: USP, 1971.

[5] SILVEIRA, L. M. Os Sistemas atmosféricos e a variação do tempo em Maringá, estado do Paraná, Brasil. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v.28, n.1, p. 79-84, jan./jun. 2006.

- [6] SANTOS, J. W. M. C. Ritmo climático e sustentabilidade socioambiental da agricultura comercial da soja no Sudeste de Mato Grosso. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, v. 1, nº especial, p. 1-20, 2005.
- [7] GIRÃO, O.; CORRÊA, A. C. B.; GUERRA, A. J. T. Influência da climatologia rítmica sobre áreas de risco: o caso da região metropolitana do Recife para os anos de 2000 e 2001. **Revista de Geografia**, Recife, v. 23, n.1, p. 3-40, 2006.
- [8] SANT'ANNA NETO, J. L. Da climatologia geográfica à geografia do clima: gênese, paradigmas e aplicações do clima como fenômeno geográfico. **Revista da ANPEGE**, n.4, p. 51-72, 2008.
- [9] REBOITA, M. S. et al. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.
- [10] STEINKE, E.T. **Climatologia fácil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. p.144.
- [11] AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. 332p.
- [12] SERRA, A.; RATISBONA, L. As massas de ar na América do Sul. **Revista Geográfica**, n.51, p. 67-129, 1942.
- [13] NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: SUPREN, 1979.
- [14] CENTROS DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Climatologia da temperatura e precipitação**. Cachoeira Paulista, 2017. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>>. Acesso em: 1 jan. 2017.
- [15] MONTEIRO, C. A. de F. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Universidade de São Paulo/Instituto de Geografia, 1973. 129p.
- [16] NASCIMENTO, D. T. F.; OLIVEIRA, I. J. Potencialidades e restrições da utilização de dados de sensoriamento remoto na climatologia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 10., 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: [s.n.], 2014. p. 2358-2368.
- [17] SANT'ANNA NETO, J. L. Por uma geografia do clima: antecedentes históricos, paradigmas contemporâneos e uma nova razão para um novo conhecimento. **Terra Livre**, São Paulo, n. 17, p. 49-62, 2001.
- [18] THE COMET PROGRAM. **Introdução to tropical meteorology**. 2nd ed. Disponível em: http://www.goes-r.gov/users/comet/tropical/textbook_2nd_edition/navmenu.php_tab_2_page_8.1.0.htm. Acesso em: 9 dez. 2016.
- [19] ZAVATTINI, J. A.; BOIN, M. N. **Climatologia geográfica – teoria e prática de pesquisa**. Campinas: Alínea, 2013.
- [20] MARENGO, J. A. Impactos de extremos relacionados com o tempo e o clima: impactos sociais e econômicos. **Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças Climáticas**, Centro de Ciências do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, n. 8, maio de 2009. (Edição Especial.)
- [21] VESENTINI, J. W. **O conceito de região em três registros. Exemplificando com o Nordeste brasileiro**. Confins [Online], 14 | 2012, posto online no dia 19 março 2012, consultado em 21 novembro 2016. URL: <http://confins.revues.org/7377>; DOI: 10.4000/confins.7377.

[22] THE WEATHER CHANNEL. **Matthew hurricane**. Disponível em:<https://weather.com/storms/hurricane/news/hurricane-matthew-bahamas-florida-georgia-carolinas-forecast>. Acesso em: 20 jan. 2017.

[23] G1. **Furacão Matthew mata centenas no Haiti e atinge os EUA**. Disponível em:<http://g1.globo.com/mundo/ao-vivo/2016/furacao-matthew.html>. Acesso em: 20 jan. 2017.

[24] SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4. ed. 2. reimpr. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006.

[25] UNISDR. **Como construir cidades mais resilientes: um guia para gestores públicos locais**. Uma contribuição à Campanha Global 2010-2015 Construindo Cidades Resilientes – Minha Cidade está se preparando! Genebra, nov. 2012.

[26] BRASIL. **Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Presidência da República. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Casa Civil. Disponível em:http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. Acesso em: 23 nov. 2016.

[27] NUNES, L. H. An overview of recent natural disasters in South America. **Bulletin des Séances**, Académie Royale des Sciences d’Outre-Mer, n. 57, p. 409-425, jan. 2011.

[28] NUNES, L. H. Compreensões e ações frente aos padrões espaciais e temporais de riscos e desastres. **Territorium**, p. 179-189, 2009.

[29] MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos**. São José dos Campos: INPE/Ministério da Ciência e Tecnologia, 2008.

[30] AMARO, H. A.; LACERDA, E. G; MOLIION, L. C. B. Um episódio da Zona de Convergência na América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, 2010, Belém, PA. A Amazônia e o clima global: **Anais**. Belém, PA: SBMET, 2010

[31] QUADROS M. F. L. et al. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, p.152-162, 2012.

[32] KODAMA, Y.M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **J. Meteor. Soc. Japan**, 70:813-835, 1992

[33] CLIMATEMPO. **Como a ZCAS se forma?** Disponível: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2017/11/17/como-a-zcas-se-forma—2964>.

[34] ALJAZEERA. **Has India’s southwest monsoon collapsed**. Disponível em:<http://www.aljazeera.com/news/2015/06/india-southwest-monsoon-collapsed-150630100226092.html>. Acesso em: 1 dez. 2016.

[35] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **IPT conclui vistoria das edificações de São Luiz do Paraitinga**. Disponível em:http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=106. Acesso em: 25 jan. 2017.

[36] FERREIRA, A. G; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, dez. 2005.

[37] MOLIION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma Revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia (RBMET)**, v. 17, n. 01, 2002

[38] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA; CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Curso de capacitação para usuários do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres – S2ID: módulos de registro e de reconhecimento**. 3. ed. Florianópolis: CEPEDUFSC, 2014. 178 p.

[39] SABESP. **CHESS - Crise Hídrica, Estratégia e Soluções da SABESP para a Região Metropolitana de São Carlos**. SABESP, 2015.

[40] FELÍCIO, A. R. Climatologia II. Disponível em: <http://www.fakeclimate.com/arquivos/Apoio/CartasSinopticas.pdf>. Acesso em: 10 out. 2015.

[41] CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA DO BRASIL. **Carta sinótica 2013-2014**. Niterói, 2014. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm>. Acesso em: 18 nov. 2014.

[42] CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Análise sinótica**. Cachoeira Paulista, 2014. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/faces/noticias.jsp?idConsulta=&idQuadros=142>. Acesso em: 18 nov. 2014.

[43] CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Monitoramento Brasil**. Cachoeira Paulista, 2014. Disponível em: <http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>. Acesso em: 18 nov. 2014.

[44] CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Climanálise**. Cachoeira Paulista, 2017

[45] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas de precipitação 1960-1990**. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 18 jan. 2017.

[46] PELLEGRINA, G. J. **Proposta de um procedimento metodológico para o estudo de problemas geoambientais com base em banco de dados de eventos atmosféricos severos**. 2011. 184 f. Dissertação (Mestrado)–UNESP, 2011. 184 p.

[47] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO; IPMET; CENTRO DE METEOROLOGIA DE BAURU. **Banco de desastres naturais**. Bauru, 2017. Disponível em: https://www.ipmet.unesp.br/index2.php?menu_esq1=&abre=ipmet_html/defesa_civil/index.php. Acesso em: 18 jan. 2017

[48] SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica/Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. p.207.

[49] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb – Sistemas de Informação Hidrológicas**. 2017. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2017

[50] HORTA, I. T. L. G.; SANTOS, B. C.; VECCHIA, F. A. S. Análise de evento extremo de precipitação: o caso da inundação em São Luiz do Paraitinga – SP. In: SIMPÓSIO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL. 15.; SIMPÓSIO DA ESPECIALIZAÇÃO EM EDUCAÇÃO AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS, 10., 2016, São Carlos. **Anais...** São Carlos: [s.n.], 2016. p. 1-619. Disponível em: <http://soac.eesc.usp.br/index.php/PPGSEA/PPGSEA/paper/viewFile/245/183>. Acesso em: 17 jan. 2017.

[51] CLIMANÁLISE. Cachoeira Paulista, v. 24, n. 12, dez. 2009.

[52] CLIMANÁLISE. Cachoeira Paulista, v. 25, n.1, jan. 2010.

[53] CLIMANÁLISE. Cachoeira Paulista, v. 26, n.2, fev. 2010.

CAPÍTULO 3

CLIMA URBANO: Contribuições Teóricas e Aplicadas em Cidades de Pequeno e Médio Porte

Elis Dener Lima Alves
Rafael Gotardi Brússlo
Gustavo Zen de Figueiredo Neves



Resumo: Este capítulo apresenta um breve histórico do desenvolvimento das cidades, os desdobramentos da perda da qualidade ambiental e os conceitos básicos sobre climatologia urbana decorrentes da carência de estudos dessa ordem nas cidades do Brasil. Ilustra as proposições metodológicas de duas escolas de climatologia urbana e suas potencialidades de aplicação em diferentes níveis escalares. Por fim, são apresentados três estudos de caso por meio de diferentes metodologias, em cidades do interior dos estados de São Paulo e Goiás.

INTRODUÇÃO

A intensificação da urbanização sem o devido planejamento levou o superpovoamento destas. A retirada da paisagem natural para a estruturação da paisagem antrópica altera as condições primárias do ambiente. “Como este ambiente é vivo e regulado por processos e dinâmicas próprias, responde às alterações impostas pelo homem, resultando em níveis de derivações dos sistemas, naturais e antrópicos, dos mais variados”.²

No caso brasileiro, o êxodo rural contribuiu para o crescimento das pequenas e médias cidades do interior, que, em sua maioria, não possuíam infraestrutura adequada para comportar a demanda populacional. Assim, foi instaurada uma ocupação desordenada do ambiente sem levar em conta os condicionantes geocológicos e geoambientais, o que contribuiu para a insalubridade ambiental das áreas urbanas.

O meio natural é substituído pelas áreas construídas, pela pavimentação asfáltica, pelo adensamento populacional, etc. Essa remoção da cobertura natural e a formulação do sítio urbano, aliadas às intensas atividades socioeconômicas, proporcionam mudanças no balanço de energia entre a superfície e a atmosfera, afetando o regime hídrico das precipitações pluviais, o aumento da temperatura, a queda da qualidade do ar, entre outros¹.

A formação e a funcionalidade das áreas urbanas acabam resultando na produção de fenômenos, tais como: as ilhas de calor, a poluição sonora, visual e do ar, dentre outros.

É importante ressaltar que o clima urbano é particularizado em cada cidade, destarte, as intensidades e configurações dependem dos fatores geográficos pertinentes àquele local.

Dentre os agravantes do clima urbano, a remoção da cobertura vegetal e a canalização das superfícies líquidas propiciam a redução do fluxo de calor latente (armazenado na molécula de água) e aumento do calor sensível (o

que o corpo humano sente). O resultado é o aumento da temperatura local e a diminuição da umidade relativa do ar, causando desconforto térmico².

As novas rugosidades (edifícios) formam verdadeiros *canyons* (desfiladeiros) urbanos, o que contribui para o aumento da temperatura do ar urbano e, também, para a intensificação da ilha de calor. Esta representa a ação mais efetiva do clima urbano, e sua intensidade depende das condições micro e mesoclimáticas locais de cada cidade¹.

O fluxo constante de veículos e a densidade industrial aumentam a concentração de poluentes na cidade, o que provoca doenças respiratórias, circulatórias, etc., e contribuem para a intensificação das chuvas localizadas, porque esses poluentes em suspensão na atmosfera servem de núcleos de condensação para o vapor d'água.

Os estudos científicos sobre o clima urbano remontam ao início do século XIX, principalmente na Alemanha, França e Inglaterra, com a preocupação do inglês Luke Howard e do francês Emilien Renou, ao observarem que as temperaturas do ar são frequentemente mais altas na cidade que na área rural à sua volta. Após a Segunda Guerra Mundial, ocorreu um interesse renovado pelo assunto, e muitos trabalhos foram desenvolvidos na América do Norte e Europa Ocidental^{3,4}.

A partir da década de 1960, houve aumento expressivo no número de estudos e no interesse sobre os processos atmosféricos, na construção de modelos e o apontamento das principais causas para a formação da ilha de calor e balanço de energia como sendo a maior capacidade de estocagem de calor em função das propriedades dos materiais e equipamentos urbanos; a redução do fluxo de calor latente (trocas térmicas úmidas) e aumento do calor sensível (trocas térmicas secas) em função da redução da superfície líquida e áreas verdes, que resultam em menores perdas de radiação de ondas longas^{5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15}. Nas próximas páginas veremos algumas características da ilha de calor.

Estas são algumas das interferências que alteram o balanço de energia e acabam por gerar ambientes climáticos específicos³.

O SISTEMA CLIMA URBANO – O INÍCIO

O professor de Geografia Timothy R. Oke, da University of British Columbia, ganhou notoriedade na comunidade científica mundial por ter sido o precursor de vários estudos em climatologia urbana. Seu laboratório de estudo foi a cidade de Vancouver, no Canadá.

Suas primeiras investigações trataram do efeito da cidade e sua malha urbana nos processos de balanço de radiação e energia; determinação do fluxo de armazenamento de calor em áreas urbanas; idealização da ilha de calor urbana como uma estrutura tridimensional; compreensão do quanto a cidade influencia a extensão vertical da atmosfera (camada-limite).

Oke também desenvolveu experimentos voltados ao entendimento da geometria do *canyon* urbano na retenção da radiação solar; o papel das atividades humanas como fonte de calor antrópico na cidade; o saldo de energia em áreas rurais comparadas com áreas urbanizadas; e as características das ilhas de calor por meio da observação orbital.

É importante ressaltar que os estudos de Climatologia Urbana utilizando imagens de satélite não revelam uma visão completa da temperatura de superfície da cidade, principalmente em áreas que apresentam múltiplas configurações em sua geometria urbana, como as fachadas verticais e horizontais dos edifícios que contrastam com as áreas iluminadas pelo sol ou sombreadas por outros elementos edificadas e arbóreas.

Problemas na detecção da temperatura de superfície do sensor orbital podem aumentar ou reduzir os valores e a intensidade da ilha de calor urbano. Diante disso, é inútil esperar qualquer relação simples entre a temperatura de superfície e da atmosfera, remotamente detectadas. Isso pode ser um problema para os cálculos de modelagem numérica.

Destacam-se os trabalhos do Professor Helmut Landsberg, sobre o clima das cidades realizados desde a década de 1950. Outras informações estão descritas na referência bibliográfica do autor ⁶.

ESCALAS VERTICAIS E HORIZONTAIS DO CLIMA URBANO

As escalas de interesse espacial e temporal são de grande importância para representar o ambiente meteorológico para coleta de dados. Oke define um quadro esquemático de representação das escalas verticais em climatologia urbana (Figura 1): Camada Limite Planetária (*PBL*); Camada Limite Urbana (*UBL*); e Camada do Dossel Urbano (*UCL*)¹⁵.

a) Mesoescala (Cidade): Escala de interesse da Camada Limite Urbana, que integra os efeitos da superfície urbana sobrejacente. A Camada Limite Urbana é advectada de acordo com a direção do vento, como uma pluma que é levemente dispersada. A cidade interfere no clima numa área superior às suas próprias dimensões espaciais. Na vertical, essa organização escalar se entende à atmosfera urbana superior (Camada Limite Urbana – *Urban*

Boundary Layer), muito embora esteja intimamente relacionada com os fenômenos atmosféricos de macroescala (Figura 2).

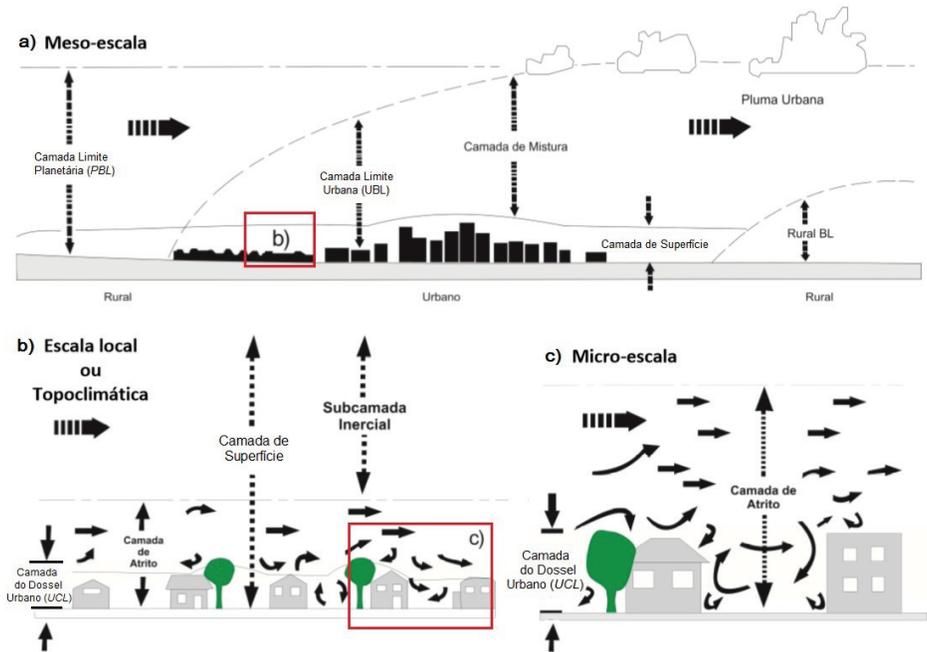


Figura 1 Escalas climáticas em ambientes urbanos. *Fonte:* Oke (1987), adaptado.



Figura 2 Representação da escala mesoclimática. *Fonte:* Projeto QUAPÁ-SEL (2014).

b) Escala Local ou Topoclimática (Bairro): Nas áreas urbanas, correspondem a um tipo específico de uso e ocupação do solo, a exemplo dos bairros homogêneos, em termos de morfologia (tamanho e espaçamento de edifícios, materiais de construção frequentes e de atividades) ou situação topográfica específica. Varia de 100 m a alguns quilômetros. Na vertical, a influência dessa organização escalar estende-se ao limite superior da camada de atrito (*roughness layer*) (Figura 3).



Figura 3 Representação da escala local ou topoclimática. *Fonte:* Projeto QUAPÁ-SEL (2014).

c) Microescala (pedestre) $1\text{ m} > 100\text{ m}$: escala típica utilizada nos estudos de microclimas urbanos, definida pelas dimensões de elementos individuais como edifícios, árvores, estradas, ruas, pátios, jardins, entre outros. Estende-se de 1 m a 100 m. As temperaturas da superfície e do ar podem variar de acordo com vários graus de distâncias muito curtas (milímetros), e o fluxo de ar pode ser perturbado por pequenos objetos¹⁶. A influência destes elementos restringe-se à atmosfera urbana inferior (Camada do Dossel Urbano – *Urban Canopy Layer*) (Figura 4).



Figura 4 Representação da escala microclimática. *Fonte:* Projeto QUAPÁ-SEL (2014).

CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

A Camada Limite Planetária (CLP) pode ser definida como a região da atmosfera que é diretamente afetada pelas propriedades da superfície terrestre, como fricção, aquecimento e resfriamento, que geram turbulência e podem assim manter essa região misturada até certa altura, onde há uma inversão térmica que limita a troca de ar^{17,18}.

Quando o Sol aquece a superfície terrestre surge um gradiente de temperatura que transfere calor por correntes convectivas das camadas mais baixas para as camadas mais altas da troposfera. A movimentação permite que os gases das camadas subjacentes se misturem com os das camadas sobrejacentes, aumentando a profundidade da camada-limite¹⁴.

Os climas que se estabelecem nessa camada possuem relação escalar fundamental com a Troposfera e a Estratosfera. As trocas de energia e constituintes que se estabelecem são funções de sua estrutura vertical e de sua massa. Possui ainda duas subcamadas: a camada de rugosidade, com altura equivalente à altura desses elementos, e a camada superficial turbulenta, com altura igual àquela dos elementos rugosos e definidos até a cota

em que ainda se verifica o efeito não uniforme da mistura turbulenta gerada a partir da superfície, conforme ilustra a Figura 5¹⁹.

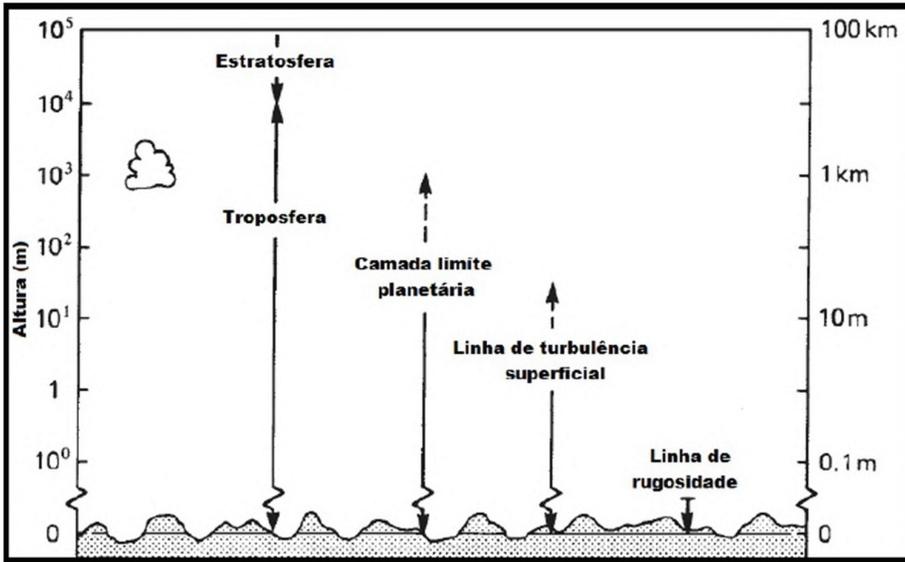


Figura 5 Estrutura vertical da Camada Limite Planetária. *Fonte:* Oke (1987), adaptado.

CAMADA LIMITE URBANA

O sistema clima urbano, segundo a escola Okeana, possui diferença térmica e turbulenta entre a Camada Limite Urbana e a Camada do Dossel Urbano. Os processos microclimáticos no ambiente urbano são derivados dessas interações.

A camada-limite evolui em resposta ao ciclo diário de aquecimento e resfriamento da atmosfera. As alterações mais significativas nesses perfis ocorrem na parte superior da Camada de Mistura, onde uma inversão de nivelamento interrompe o transporte ascendente dos efeitos da superfície. Os principais agentes de transporte e mistura são térmicos.

Em cidades de médio e grande portes, a emissão de poluentes advindos dos automóveis e zonas industriais pode ser um problema. Eles permanecem suspensos na Camada de Mistura, fracamente turbulenta, até serem transportados horizontalmente, podendo ser removidos por sedimentação, precipitação ou transformados quimicamente.

A Camada Limite Urbana possui três subdivisões: Camada de Mistura; Camada de Superfície – desta camada fazem parte a Camada de Rugosidade e a Camada

de Fluxo Constante ou Camada Inercial. A interação entre elas dependerá do quanto a cidade influencia a extensão ou profundidade vertical da Camada Limite Planetária. A medida que o ar flui de uma superfície para outra de diferentes rugosidades, se alteram também a velocidade e a direção¹⁴ (Figura 6).

As zonas urbanas têm uma estrutura complexa tridimensional que inclui a superfície vertical, como paredes, bem como superfícies horizontais (telhados, estradas, asfaltos, copas das árvores, solo exposto). A atmosfera urbana, que se situa dentro do dossel da camada urbana, é, portanto, condicionada por temperaturas tanto de superfícies horizontais quanto verticais. A contribuição de cada uma se torna importante com o incremento da superfície, principalmente em zonas centrais das cidades.

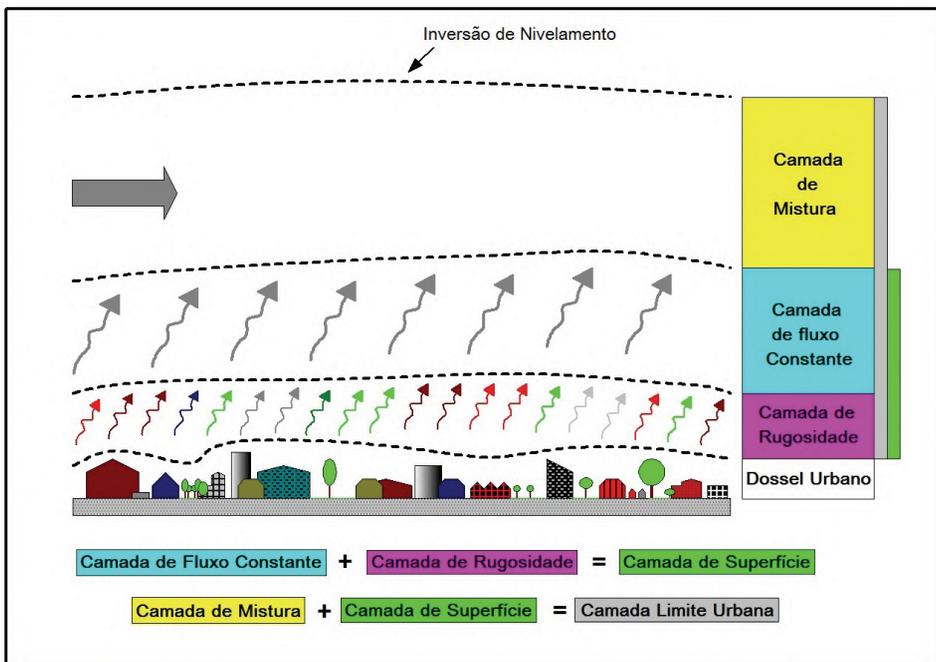


Figura 6 Divisões da Camada Limite Urbana. *Fonte:* Arnfield, (2006), adaptado.

ILHA DE CALOR: SUPERFICIAL E ATMOSFÉRICA

É um fenômeno que ocorre em áreas urbanas e suburbanas, onde as temperaturas de superfície e do ar são maiores do que em áreas rurais no entorno. As ilhas de calor se manifestam especialmente em dias calmos e claros, principalmente durante o poente e após ele. Ou seja, as áreas densamente construídas como as regiões centrais das cidades brasileiras,

em geral, são compostas de materiais escuros, que absorvem e armazenam o calor com facilidade.

A ilha de calor é um fenômeno que ocorre em qualquer período do dia, dependendo da situação geográfica do local e das condições sinóticas regionais. No período noturno e em condições atmosféricas estáveis (baixa nebulosidade e calmaria dos ventos), ela pode ser melhor analisada em virtude da capacidade que os materiais antropogênicos (asfalto, concreto, telhas de fibrocimento, etc) têm de absorver e reter calor por mais tempo, devolvendo para a atmosfera logo após o pôr do sol.

Dessa forma, a ilha de calor não se caracteriza de igual maneira para todas as cidades. Dadas as diferentes complexidades do clima, como a incidência solar, a ação dos ventos, as sinuosidades do relevo e o uso e ocupação do solo urbano e rural, podem apresentar diferenças de temperatura de superfície e atmosféricas entre si.

Note que as ilhas de calor são de quatro tipos:

1. Camada Limite Urbana
2. Camada de Dossel Urbano
3. Superfície Urbana
4. Subsuperfície Urbana

Na superfície urbana, o *canyon* é rodeado por estruturas verticais relativamente quentes que irradiam, não só para o céu, mas também para baixo, reduzindo a perda de radiação líquida na base do *canyon*. Há também fontes de calor internas das edificações que retroalimentam, por condução, as paredes do *canyon*. Assim, a superfície horizontal do *canyon* perde radiação em ondas longas mais lentamente do que uma superfície rural equivalente, produzindo uma temperatura distinta, característica da ilha de calor no período noturno²¹. Cada uma é o resultado de diferentes processos e tem um padrão temporal e magnitude diferentes (Figura 7).

O CLIMA URBANO NO BRASIL

No Brasil, os estudos científicos sobre o clima urbano partem da obra de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro²², professor emérito do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo (USP).

Por meio de dez enunciados, propôs a terminologia Sistema Clima Urbano (SCU) para denominar um sistema singular, aberto, evolutivo, dinâmico, adaptativo e passível de autorregulação.

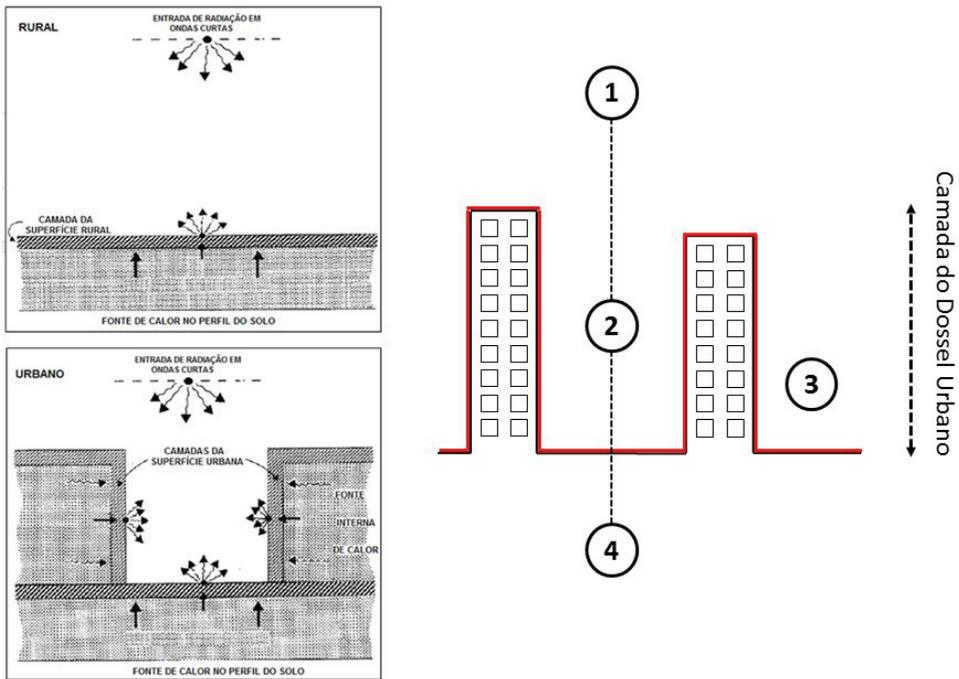


Figura 7 Estruturas verticais e horizontais em ambiente urbano e rural; tipologias de ilhas de calor. *Fonte:* Johnson (1991), adaptado.

- ◆ Canal Conforto Térmico (Termodinâmico): engloba as componentes derivadas do calor e da ventilação e umidade, e afeta a todos constantemente. As pesquisas no campo termodinâmico têm grande crescimento em estudos de Arquitetura e Urbanismo, posto que se ligam de maneira direta ao estabelecimento do conforto ambiental humano.
- ◆ Canal Qualidade do Ar (Físico-Químico): Expressa-se pela poluição atmosférica, considerada pelo mesmo autor um dos males do século, mas que tem associação muito direta com os distintos tipos de tempo geradores da concentração ou da dispersão da poluição pelo ar.
- ◆ Canal Meteoros de Impacto (Hidrometeorológico): agrupa as formas meteóricas, hídricas (como chuvas, neves e nevoeiros), mecânicas (como os tornados) e elétricas (tempestades), que têm a possibilidade de, eventualmente, se manifestar com grande intensidade e resultam em grandes impactos urbanos, causando perturbações e desorganizando a circulação e os serviços urbanos²².

O Quadro 1 apresenta a caracterização geral dos três canais em uma comparação paralela entre eles.

Quadro 1 Articulação dos sistemas segundo os canais de percepção.

Subsistemas	I Termodinâmico	II Físico	III Hidrometeorológico
Canais Caracterização	Conforto Térmico	Qualidade do Ar	Impacto Meteorológico
Fonte	Atmosfera Radiação circulação horizontal	Atividade urbana Veículos automotores Indústrias – obras limpas	Atmosfera estados especiais (desvios rítmicos)
Trânsito no sistema	Intercâmbio de operador e operando	De operando ao operador	De operador ao operando
Mecanismo de ação	Transformação no sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção	Interação Núcleo Ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódio (eventual)
Observação	Meteorológica especial T. de campo	Sanitária e meteorológica especial	Meteorológica hidrológica (T. de campo)
Correlações disciplinares e tecnológicas	Bioclimatologia Arquitetura Urbanismo	Engenharia Sanitária	Engenharia sanitária e infraestrutura urbana
Produtos	“Ilha de calor” Ventilação Aumento de precipitação	Poluição do ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos diretos	Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas sanitários, doenças respiratórias, oftalmológicas etc.	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa	Controle do uso do solo Tecnologia de conforto habitacional	Vigilância e controle dos agentes de poluição	Aperfeiçoamento da infraestrutura urbana e regularização fluvial. Uso do solo
Responsabilidade	Natureza e homem	Homem	Natureza

Fonte: Monteiro (1976).

Segundo o autor, o SCU produz variados elementos classificados em três subsistemas: o termodinâmico, o físico-químico e o hidrometeorológico, que correspondem aos canais de percepção humana de conforto térmico, qualidade do ar e impacto meteorológico, respectivamente.

A natureza tridimensional da cidade pode alterar os valores de temperatura da superfície e do ar, em resposta às propriedades térmicas dos diversos materiais que compõem a superfície e pela orientação das faces dessas superfícies durante os dias e as noites²⁶.

“Esse canal (termodinâmico) atravessa toda a sua estrutura, pois é o insumo básico transformado na cidade em que suas funções estão intimamente ligadas ao processo de transformação do sistema”²³. A análise termodinâmica da cidade fornece subsídios aos arquitetos, urbanistas, e é nesse nível de criação dos espaços livres e habitacionais que se estabelecem os mecanismos de “feedback” e adaptação do sistema urbano ao clima e sua qualidade no ambiente.

A abordagem sistêmica do clima das cidades ilustrada pelo professores Oke e Monteiro, seja na perspectiva teórica ou aplicada, revela seu rigor metodológico, sua capacidade de adaptação para aplicações variadas do ambiente urbano e rural e a coexistência entre as duas linhas de pensamento que são complementares no campo climatológico e meteorológico. A possibilidade do seu multifuncionalismo com outras áreas do conhecimento abre possibilidade para os mais variados estudos de dinâmica e densidade populacional, qualificação do sistema viário, legislação urbanística, saúde pública e outros.

APLICAÇÕES EM CLIMA URBANO

ESTUDO DE CLIMA URBANO EM CIDADE DE PORTE PEQUENO: O CASO DE IPORÁ (GO)

O município de Iporá localiza-se no Oeste do estado de Goiás (Figura 1), sua área territorial é de 1026,384 km² e possui, aproximadamente, 31 mil habitantes (IBGE, 2014). A área de estudo encontra-se na borda da Bacia Sedimentar do Paraná, sendo que parte do município foi instalada em região identificada como Arco Magmático de Goiás (NAVARRO; ZANARDO, 2007). O relevo, em partes do município, é suavemente ondulado, apresentando afloramentos desgastados do arco magmático, com vertentes mais abruptas e elevações de até 850 m, contrastando com a média de altitude do município que é de 600 m (SPECIAN; VECCHIA, 2014). Iporá está distante da capital do estado de Goiás, aproximadamente, 210 km.

No estado de Goiás, a cidade que possui o maior número de estudos a respeito do seu clima é a cidade Iporá (Figura 8). A maioria destes é oriundo

dos trabalhos de conclusão de curso de graduação em Geografia da Universidade Estadual de Goiás - Unidade de Iporá. Tais estudos contribuíram, até certo ponto, para o entendimento de padrões, notadamente, no campo termodinâmico e hidrometeorológico.

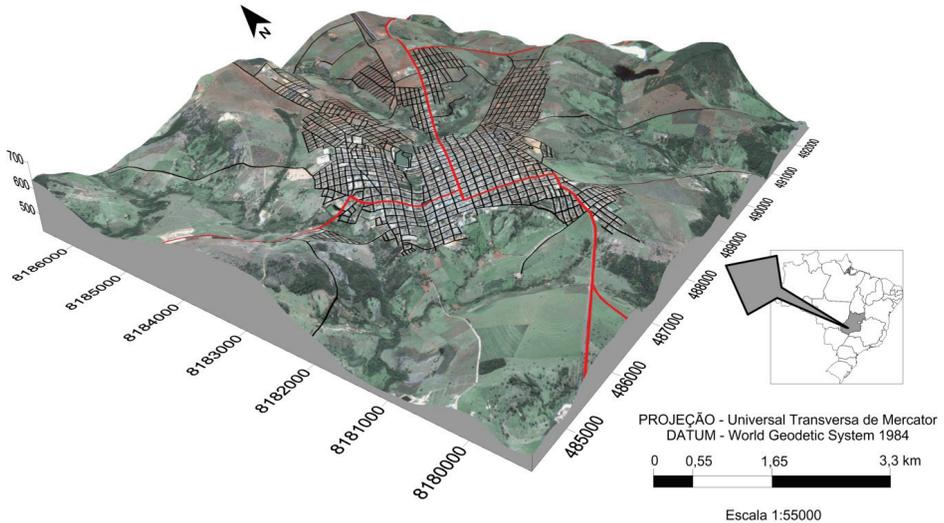


Figura 8 Localização da cidade de Iporá. Fonte: O Autor³¹

A primeira publicação sobre o aspecto do clima urbano foi em 2009. Nesse artigo²⁵, os autores buscaram verificar a existência de variações térmicas e higrométricas em quatro pontos de coleta na área urbana de Iporá (GO), esses pontos se diferenciavam basicamente no uso e ocupação do solo. Nesse estudo foi possível observar que, independentemente do período de coleta, os pontos localizados nas áreas mais urbanizadas apresentaram temperaturas mais elevadas, configurando nesses locais, ilhas de calor, esse estudo foi um dos pioneiros sobre o campo termodinâmico em Iporá.

O trabalho teve como objetivo investigar os padrões da temperatura do ar e da umidade relativa, a fim de se identificar possíveis anomalias termo-higrométricas no espaço intra-urbano de Iporá²⁶. Os resultados evidenciaram que existe uma lógica espacial da temperatura e da umidade, que acompanha os tipos de uso e ocupação do solo. Verificou-se, também, a presença de ilhas de calor na magnitude de 2,8°C de intensidade e ilhas secas na magnitude de 8%.

Na pesquisa²⁷ sobre a frequência e a probabilidade de chuvas no Município de Iporá constatou que, em todos os meses, a intensidade de precipitação ocorreu com grande frequência (63,5%) no intervalo de classe de 0,1 - 13 mm e frequência moderada no intervalo de 13 - 26 mm (19,3% dos dias). Os meses de dezembro e janeiro apresentaram as maiores probabilidades de chuvas diárias, com probabilidades médias de 63% e 64%, respectivamente. Nos dias 17 de dezembro, 3 e 12 de janeiro a probabilidade foi superior a 80%.

Quanto à análise histórica dos eventos de precipitação²⁷, observou-se que nos anos de 1980, 1983, 1992, 1997 e 1998 a precipitação excedeu o desvio padrão, caracterizando esses anos como anomalias positivas da precipitação. Em 1977, 1981, 1985 e 2002 as chuvas foram inferiores ao desvio padrão, caracterizando-os como anomalias negativas. De acordo com o CPC/NOAA, todos esses anos foram anos de El Niño, não apenas o de 1997.

Em 2013, estudou-se²⁸ a variação dos valores de temperatura do ar e umidade relativa para dois pontos distintos no interior do sítio urbano de Iporá. O primeiro ponto foi em uma praça e, o segundo, em área remanescente de cerrado. Os resultados mostraram variação de até 4°C de temperatura entre os dois pontos, sendo que no segundo ponto manteve-se sempre com a temperatura menor. A umidade relativa do ar apresentou variação máxima de 19% entre os pontos de coleta, com maiores valores para o remanescente de cerrado.

No mesmo ano de 2013, outra pesquisa²⁹ verificou os padrões da temperatura e da umidade entre duas praças públicas de Iporá, que se diferenciavam pela densidade de vegetação. Os resultados mostraram que a praça com vegetação arbórea obteve os menores valores de temperatura e os maiores de umidade, registrando diferenças térmicas de 6,3°C e higrométricas de 21%, às 15 horas. O estudo concluiu que a vegetação arbórea nas praças públicas desempenha função importante, pois ameniza os efeitos do clima urbano.

A temperatura de superfície e as anomalias térmicas em Iporá

Para o estudo espaço-temporal das anomalias térmicas em Iporá foram utilizadas imagens multiespectrais (banda termal do satélite *Landsat 5*), disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) dos anos de 1984 a 2011. Todas as imagens foram obtidas para o mês de agosto e setembro, cujo período de seca proporciona menor cobertura de nuvens, bem como pouca umidade na atmosfera, que se trata de uma das maiores absorvedoras da radiação emitida pela superfície na faixa do infravermelho termal.

Dentro do período, não foi possível a aquisição das imagens para os anos de 1989, 1990, 1992, 1997, 2000 e 2002. Além da banda termal, utilizaram-se as bandas 3 e 4 para correção dos valores da temperatura de superfície.

Para o processamento das imagens, foram desenvolvidos modelos matemáticos por meio da ferramenta *Model Maker* do software *Erdas Imagine* 11. Na Figura 9, está o fluxograma com as etapas do processamento das imagens para obtenção das anomalias térmicas.

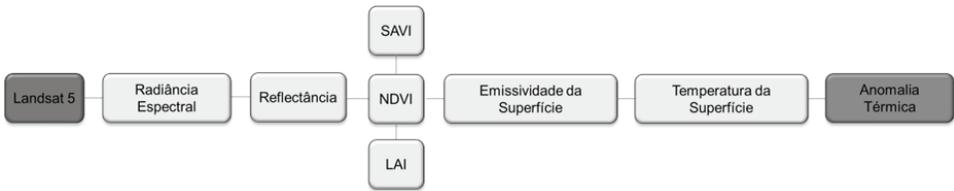


Figura 9 Fluxograma para obtenção da temperatura de superfície. *Fonte:* O Autor³¹.

Com a utilização das anomalias térmicas, ao invés da temperatura de superfície, os mapas ficaram homogêneos, pois os valores das anomalias de cada pixel foram calculados a partir da média e do desvio padrão da TS para cada imagem. Em toda a série histórica (1984 a 2011), notou-se que determinados padrões se repetiram, as áreas com os menores e maiores valores das anomalias persistiram ao longo dos anos, conforme a Figura 10.

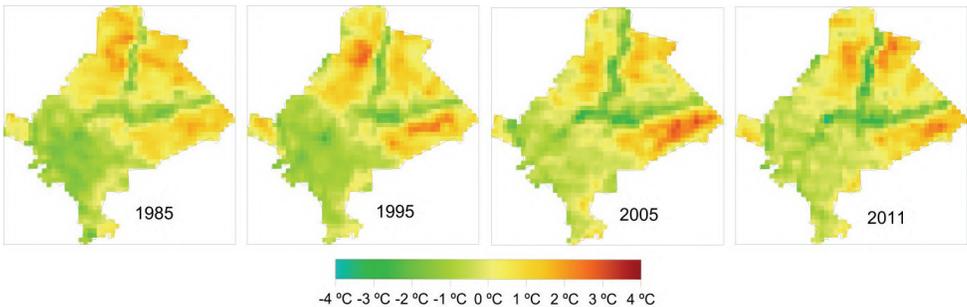


Figura 10 Anomalias térmicas multitemporais. *Fonte:* O Autor³¹.

A partir das 22 imagens termais obtidas, calculou-se a média da anomalia termal de cada pixel. Na Figura 11, está mostrado esse padrão médio das anomalias térmicas sobreposto ao relevo e a ocupação do solo.

Nota-se que as áreas de solo exposto, nesse caso solo de coloração vermelho-escuro, têm em média os maiores valores das anomalias térmicas. Esse tipo de solo se aquece mais rapidamente que outras áreas. Observa-se que as

anomalias médias tiveram variação de -2°C a $1,8^{\circ}\text{C}$ e as anomalias negativas se concentraram preponderantemente nos fundos de vale. Como o registro dessas anomalias térmicas é próximo às 10 horas da manhã (horário de passagem do satélite *Landsat 5*) esse padrão fica mais evidente.

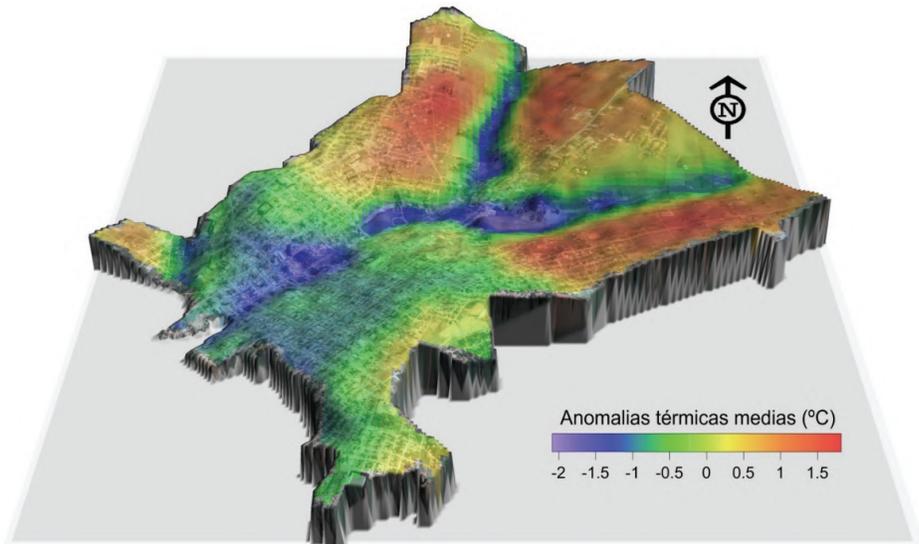


Figura 11 Anomalias térmicas médias (1984 – 2011) sobrepostas ao relevo e ocupação do solo. *Fonte:* O Autor³¹.

Na Figura 12, observa-se a exposição das vertentes em relação a radiação solar global durante o equinócio (data próxima da data das imagens adquiridas). O modelo utilizado para a definição da exposição das vertentes a radiação solar global foi baseado na declividade e orientação das vertentes, assim como na posição aparente do sol: o azimute e o zênite. Verifica-se que algumas áreas de Iporá estão mais expostas a radiação solar nas horas iniciais do dia (7h, 8h, 9h e 10h), correspondendo, em parte, às áreas com as maiores anomalias térmicas médias. Entretanto, a região noroeste, não está exposta diretamente a radiação solar global no período da passagem do satélite, contudo, apresenta anomalias térmicas médias elevadas, fato que se deve ao solo vermelho escuro daquela região.

Conforme a Figura 13, as anomalias térmicas máximas de superfície ocorreram em áreas de pouca urbanização, com solo exposto, fato observado em Pereira et al. (2012). Os valores mínimos das anomalias térmicas máximas negativas foram observadas nas áreas com maior vegetação e próximas as áreas úmidas.

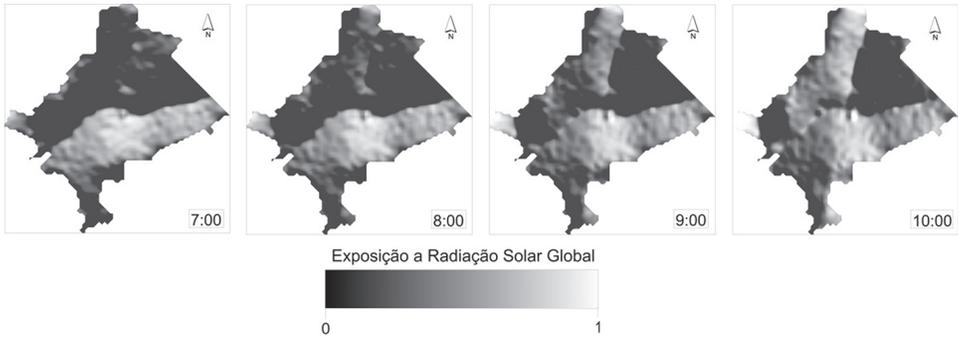


Figura 12 Exposição das vertentes a radiação solar global no equinócio em Iporá (GO). *Fonte:* O Autor³¹.

Em muitos estudos^{32,33,34,35}, foi constatado esse efeito da vegetação de amenizar a temperatura de superfície. Outros experimentos sobre a temperatura de superfície de lagos tem mostrado que essas superfícies se aquecem mais lentamente que a superfície do solo, devido ao seu calor específico³⁶. Notou-se que foram observadas anomalias negativas de -4°C (Figura 13A) e anomalias positivas de 3°C (Figura 13B).

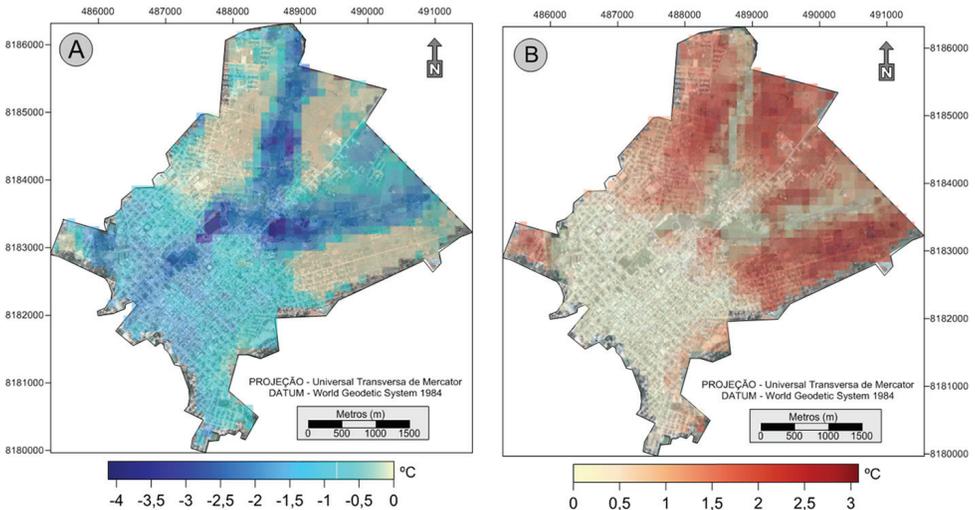


Figura 13 Anomalias térmicas máximas negativas (A), anomalias térmicas máximas positivas (B) ocorridas no período de 1984 a 2011 às 10 horas da manhã. *Fonte:* O Autor³¹.

O papel dos cursos d'água/área verde na temperatura de superfície

A intensidade da 'ilha de frescor' do Parque ('*Park Cool Island*', ou PCI) é mensurada a partir das observações da temperatura do ar ao longo de transectos ou em estações dentro de áreas verdes e a área urbana circundante³⁷.

Seguindo a definição da intensidade da ilha de calor urbana, como sendo a diferença da temperatura entre a área mais aquecida da cidade e o seu subúrbio, nessa pesquisa, assim como nos trabalhos^{37, 38, 39} a intensidade da PCI foi definida conforme equação 1.

$$T_{PCI} = T_C - T_V \quad \text{Equação 1}$$

em que T_C é a média da temperatura da superfície circundante a área verde com *buffer* de 200 m e 500 m e T_V é a média da temperatura da superfície dentro da área verde.

A temperatura da superfície foi calculada a partir da banda termal (banda 10) do *Landsat 8*, com resolução espacial de 100 m, porém processadas para 30 m, com comprimento de onda de 10.6 μm a 11.19 μm .

Utilizaram-se imagens referentes ao ano de 2015. Entretanto, devido a problemas de imageamento ou coberturas de nuvens, comum no período chuvoso, conforme já observado por outros autores⁴⁰ na região do cerrado, não foi possível a utilização de todas as imagens. Empregaram-se as imagens das seguintes datas: 30/05/2015; 15/06/2015; 01/07/2015; 17/07/2015; 02/08/2015; 18/08/2015; 03/09/2015; 19/09/2015; 05/10/2015. Na Figura 14, tem-se os *buffers* de 30 m (referente a área verde) e os *buffers* de 200 m e 500 m.

A temperatura de superfície na área verde e nos *buffers* de 200 m e 500 m está na Figura 15, nota-se elevada sazonalidade nos valores da temperatura de superfície, com aumento significativo ao longo do ano de 2015. As imagens referentes ao outono apresentaram os menores valores, no dia 30/05/2015 as temperaturas da superfície estiveram entre 22°C e 28°C e no dia 15/06/2015 variaram de 23°C a 29°C, ou seja, baixas temperaturas superficiais com pequena amplitude térmica.

A partir do início do inverno, as temperaturas aumentaram significativamente, tendo seu ápice na imagem do dia 19/09/2015 com valor mínimo de 31,4°C

e máximo de 47,5°C. Em todas as imagens (Figura 15), verifica-se o efeito da área verde que circunda o corpo d'água (Córrego Tamanduá). Nessas imagens, já é possível verificar a existência da PCI.

A intensidade da PCI (Figura 16) variou conforme a variação da temperatura superficial com menores valores no outono, aumentando gradativamente até o seu valor máximo de 2,8°C e 4,5°C em 19/09/2015, respectivamente nos *buffers* de 200 m e 500 m. No *buffer* de 500 m, todas as observações registraram as maiores intensidades da PCI comparadas com o *buffer* de 200 m.

A sazonalidade da PCI já foi observada em outros estudos: Em 2013, os autores³⁹ observaram a variação da PCI no verão e no outono nos parques da cidade de Changchun na China e constataram que, no verão, a intensidade da PCI foi muito superior ao outono.

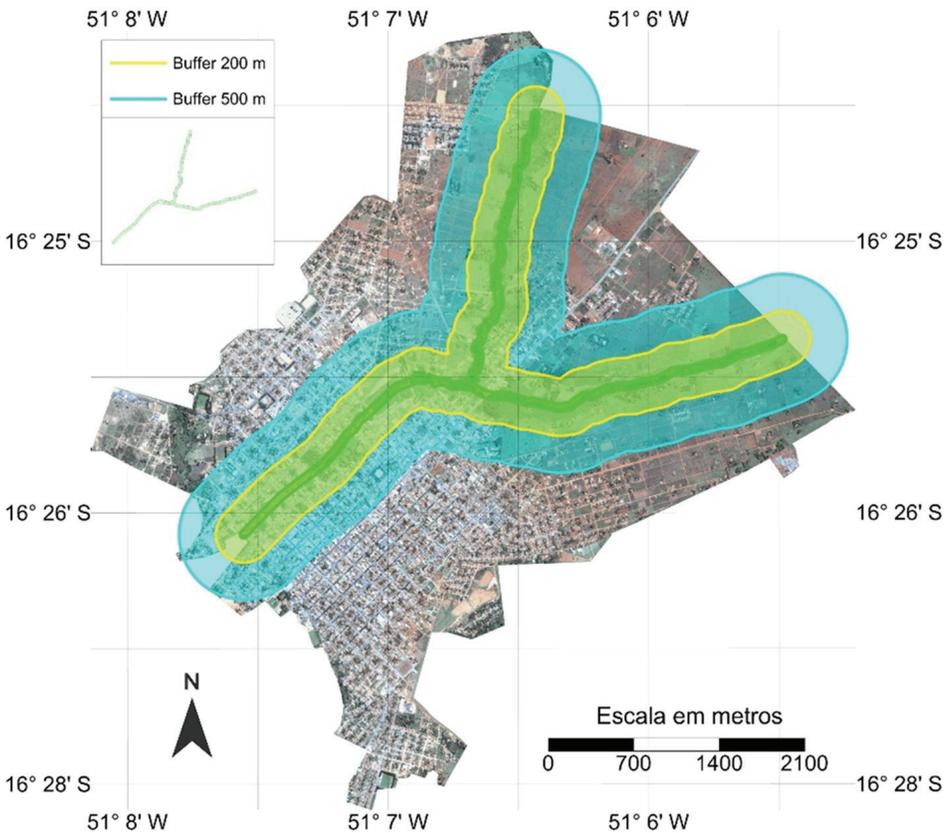


Figura 14 Buffers utilizados para os cálculos do PCI. Fonte: O Autor³¹.

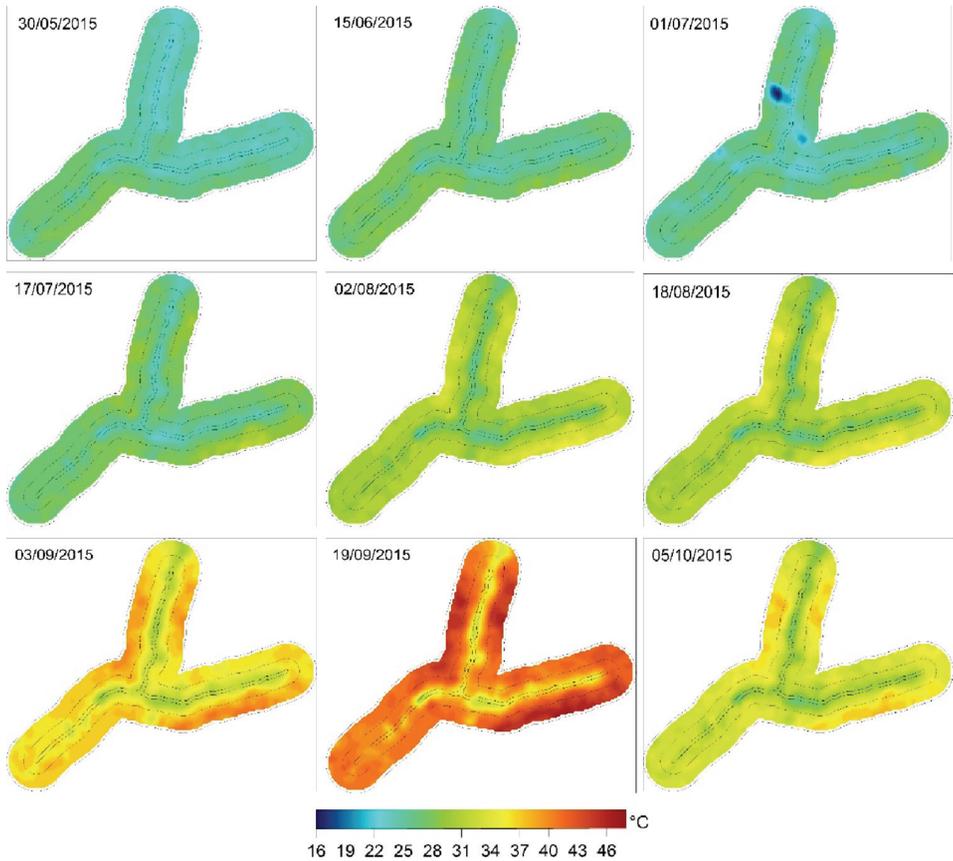


Figura 15 Temperatura de superfície em Iporá, as linhas pretas correspondem aos limites dos *buffers*. Fonte: O Autor³¹.

Ao analisar parques em Nagoia, Japão, os autores³⁷ observaram que a intensidade da PCI foi maior no verão seguido pela primavera. Esses resultados, evidentemente, referem-se a locais com climas completamente diferentes ao clima da cidade de Iporá. Nesse estudo, não foi possível a obtenção de imagens termais para o verão, pois é o período mais chuvoso da região. Contudo, foi possível verificar que, na primavera ou próximo dela, a intensidade da PCI foi muito superior às PCI de outras datas.

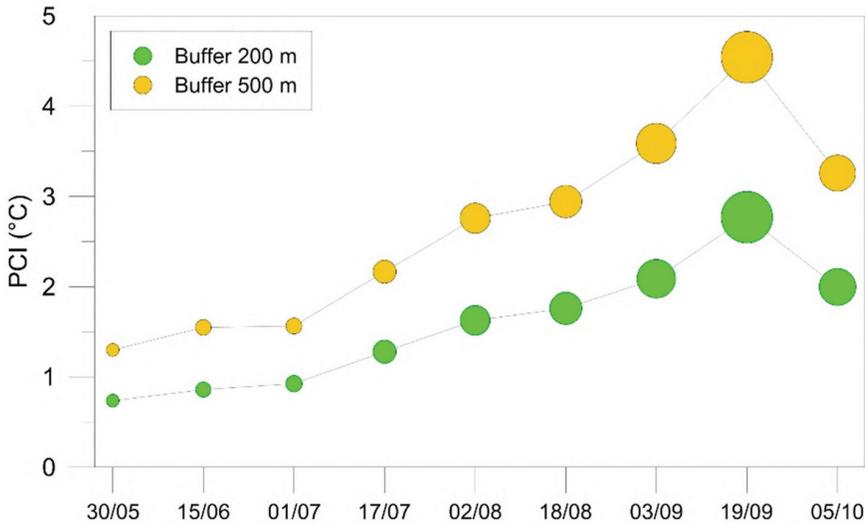


Figura 16 Valores sazonais da PCI. Fonte: O Autor³¹.

Considerações

A partir do estudo de caso em Iporá, utilizando imagens de satélite *Landsat* 5 e 8, destacam-se alguns pontos relevantes aos estudos do clima das cidades pequenas:

1. A utilização das anomalias térmicas, ao invés da temperatura de superfície, tornou os mapas homogêneos, o que possibilitou comparação temporal.
2. Anomalias térmicas máximas de superfície ocorreram em áreas de pouca urbanização, com solo exposto.
3. O maior número de anomalias positivas ocorreu nas áreas de baixa urbanização, com solos expostos. Enquanto nas áreas mais urbanizadas com presença de vegetação e próximas a superfície de água, ocorreu a maior quantidade de anomalias negativas.
4. As anomalias mínimas foram observadas nas áreas com maior vegetação e próximas ao córrego Tamanduá e ao lago pôr do sol.
5. Quanto maior a distância em relação a área verde, maior a temperatura de superfície.
6. A variação temporal (sazonalidade) da intensidade da PCI foi constatada: na primavera ou próximo dela. A intensidade da PCI foi muito superior às PCI de outras datas.

ESTUDO DE CLIMA URBANO EM CIDADE DE PORTE MÉDIO: O CASO DE ASSIS (SP)

Assis (SP) possui em torno de 98 mil habitantes⁴¹, sendo que quatro mil vivem na área rural. O Município ocupa uma área de 462 km² e se distancia 440 km da capital paulista. Tem suas divisas territoriais com os municípios de Paraguaçu Paulista, Echaporã, Platina e Palmital (Figura 17).

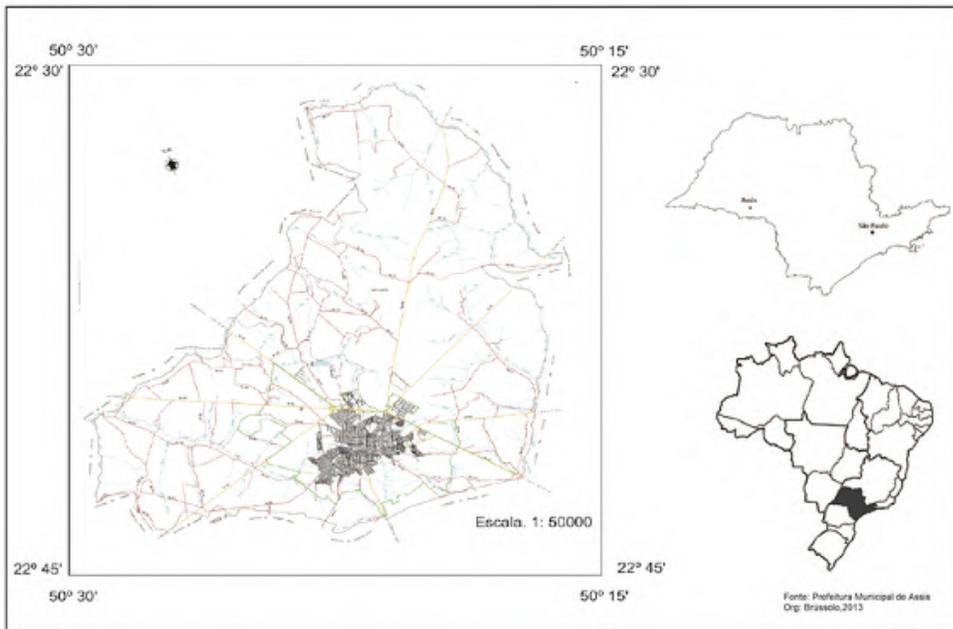


Figura 17 Localização do município de Assis (SP). *Fonte:* Prefeitura Municipal de Assis.

As atividades econômicas primárias do Município baseiam-se na pecuária de corte e no cultivo de soja, trigo, milho e cana-de-açúcar. A indústria aparece como segunda colocada no PIB (Produto Interno Bruto), e o setor de comércio e serviços é o detentor da maior produção de bens e riquezas do Município.

Assis apresenta altitude média de 546 metros acima do nível do mar. É sede da região de governo do Estado e do Consórcio Intermunicipal Vale do Paranapanema, o CIVAP, que agrupa 21 municípios, somando aproximadamente 400 mil habitantes.

O Município está inserido na região intertropical e, em virtude de sua localização geográfica, as chuvas estão concentradas no verão, de dezembro a março, e o inverno é seco. A vegetação diversifica-se em campo, cerrados

e uma pequena parcela de mata tropical atlântica. Cabe salientar que, em virtude da expansão do agronegócio na região, principalmente da cana-de-açúcar, grande parte da vegetação original foi derrubada.

A análise do crescimento urbano e, conseqüentemente, de cada setor/bairro da cidade é importante para averiguar de que maneira a cidade se desenvolveu ao longo dos anos e qual o papel dos agentes políticos e econômicos nesse contexto. Um dos instrumentos que rege o planejamento urbano é o Plano Diretor, que foi instituído pela Constituição Federal de 1988⁴³ e regulamentado pelo Estatuto da Cidade⁴⁴, além do Código Florestal⁴⁵ e da Lei de Parcelamento do Solo Urbano⁴⁶.

Esses instrumentos são apresentados sob o conceito de zoneamento do solo, pelo qual o poder público fornece as diretrizes para controlar o uso da terra, a densidade populacional, a localização e a dimensão das construções, com o argumento de propiciar o bem-estar da população. Esse parcelamento representa a fragmentação do território municipal, atribuindo determinados valores a essas áreas, como o uso do solo e a destinação da terra⁴⁷.

O município é dividido em área urbana, áreas urbanizáveis, áreas de expansão urbana e área rural. No que se refere ao uso do solo, esse pode ser residencial, industrial, comercial e uso especial/institucional.

Do ponto de vista das características urbanas, verificou-se em Assis que o centro urbano encontra-se na porção mais antiga da cidade, onde as primeiras casas foram construídas nas redondezas da igreja Matriz e da Estação Ferroviária.

Os bairros que abrigam a população mais carente estão predominantemente localizados nas porções oeste e sul, apresentando construções mais modestas, em sua maioria de alvenaria e cobertura de fibrocimento, e ruas com asfalto em péssimo estado de conservação ou ausente.

Já, a população de maior poder aquisitivo ocupa a porção leste e nordeste da cidade. Esses bairros possuem o metro quadrado de terreno mais caro e são destinados à moradia e ao comércio, predominantemente. A avenida principal da cidade (Av. Rui Barbosa) encontra-se nessa área. O comércio é abundante e diversificado (shopping, clínicas médicas, restaurantes, farmácias, etc.).

Procedimentos metodológicos

Para o desenvolvimento desta pesquisa, primeiramente foram realizadas leituras, fichamentos e discussões acerca da dinâmica atmosférica regional e local, da temática clima urbano e sobre o histórico do município de Assis, desde sua origem até o desenvolvimento e adensamento urbano atual.

O alicerce teórico-metodológico pautou-se nas proposições apresentadas pelo professor Monteiro^{22,48}, disponíveis na subseção “Sistema Clima Urbano – Escola Monteiriana”.

O enfoque foi dado ao subsistema termodinâmico, analisado por meio do fenômeno ilha de calor, a partir da comparação das características da temperatura e umidade relativa do ar nos diferentes tipos de uso e ocupação do solo e em suas variações cotidianas no período de inverno (julho de 2013).

No estudo do clima urbano é fundamental a relação entre as diferentes escalas geográficas, desde a zonal até a local, onde se encontram o urbano e as diversas possibilidades de articulações entre os mesoclimas, topoclimas e microclimas. A estrutura interna do clima urbano é definida por meio da conexão de suas partes⁴⁹.

Os levantamentos de campo e as coletas de dados

Os primeiros trabalhos de campo serviram para o conhecimento da malha urbana e coleta de informações para o mapeamento do uso e ocupação do solo da cidade de Assis.

Para confeccionar a carta de ocupação do solo da área urbana de Assis foram analisadas imagens de satélite do programa *Google Earth*, datadas de 09/12/2011, e realizados trabalhos de campo a fim de constatar usos e ocupações do solo diferenciados, densidade de construções e vegetação arbórea. As referências teóricas que subsidiaram essa caracterização estão documentadas^{50,51,49,52}.

Dessa maneira, foi possível definir nove setores com diferentes características urbanas relacionadas ao tipo de uso e ocupação do solo.

A partir do Manual Técnico de Arborização Urbana da Prefeitura de São Paulo⁵³, das análises das imagens de satélites e dos trabalhos de campo realizados, a vegetação foi classificada em: de pequeno (de 4 a 5 m de altura e raio na copa em torno de 3 m), médio (6 a 8 m de altura e raio na copa em torno de 4 a 5 m) e grande porte (mais de 8 m de altura e raio na copa superior a 5 m). Essa tipificação ajuda a compreender como a cobertura arbórea contribui para a amenização do fenômeno de ilha de calor, por meio do sombreamento de superfície.

Por intermédio da planta de arruamento, disponibilizada pela Prefeitura Municipal de Assis, foram digitalizadas as informações sobre a ocupação do solo urbano.

Posteriormente, foi produzida a carta hipsométrica da área urbana com o objetivo de analisar o relevo intraurbano e a exposição das vertentes, com

base na Carta Topográfica de Assis. Essa metodologia é importante para conhecer como o relevo interfere no balanço de energia da superfície, proporcionando a uma área um período de sombreamento ou insolação, e vice-versa, e, também, sua influência na direção dos ventos. As curvas de nível possuem a equidistância de 20 metros e foram vetorizadas no *software Spring 5.0*; utilizou-se o *software Corel Draw X5* para finalizar a carta.

A coleta dos dados de latitude, longitude e altitude dos pontos foi realizada por meio do aparelho *Garmin GPS 60*.

Os sensores de coleta de temperatura e umidade relativa do ar foram instalados em cotas altimétricas próximas para que não ocorressem as interferências destacadas acima⁵⁴.

A partir dos itens descritos, foram escolhidos os pontos fixos para a coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar na cidade de Assis. Para a realização dessa coleta foram utilizadas 9 (nove) miniestações meteorológicas automáticas, a partir das quais foram coletados dados de temperatura e umidade relativa do ar em 31 dias do mês de julho de 2013 (mês representativo de inverno), a cada 2 horas, com o intuito de caracterizar a atuação dos elementos climáticos (temperatura e umidade relativa do ar) diurnos e noturnos. Esses sensores foram instalados em distância de aproximadamente de 1,5 m.

Após essa compilação de informações, foram escolhidos os horários das 8 h, 10 h, 16 h e 22 h para uma análise detalhada. Os dias 9/7 às 8 h, 16/7 às 10 h, 14/7 às 16 h e 16/7 às 22 h foram selecionados para a espacialização dos resultados, em virtude de o fenômeno ilha de calor atingir as maiores magnitudes nesses respectivos horários.

A escolha não se configura de maneira aleatória, mas, sim, por representar a dinâmica atmosférica diária, em condições estáveis. Sendo assim, às 8 h seria o início do aquecimento diurno; entre as 10 h e 16 h configura-se como o período de maior aquecimento diurno; e às 22 h o Sol já se pôs e inicia-se o período de resfriamento. Contempla-se, assim, os três horários representativos de um dia: manhã, tarde e noite.

Para calcular e tabular os dados foi utilizada a planilha eletrônica *Excel*, para espacializar os dados dos elementos climáticos (temperatura e umidade relativa do ar) foi utilizado o *software Surfer for Windows*, sendo utilizada a base cartográfica por setor censitário do IBGE, datada do ano 2000. Esse procedimento foi adotado em virtude da compatibilidade do georreferenciamento da base cartográfica e do *software*.

O conhecimento das diferenças do uso e ocupação do solo e dos condicionantes geocológicos e geoambientais fornece condições para a compreensão do clima urbano. A morfologia, a estrutura e a funcionalidade urbana também são fatores fundamentais para a elaboração de um clima urbano específico.

Com a análise dos fatores citados acima foram identificados nove tipos de ocupação do solo em Assis. O Quadro 2 apresenta a identificação e a nomenclatura para cada ponto selecionado para a coleta de dados climáticos na respectiva cidade.

O maior gradiente entre os dados de altitude foi identificado entre os pontos "Residencial Colinas" e "Casa das Bombas", com uma diferença de 20 metros de altitude.

Destaca-se que foi determinado um ponto de coleta em área de uso do solo com características rurais que serve para comparar os dados coletados na área urbana.

Quadro 2 Descrição e identificação dos locais de coleta de dados climáticos.

Área densamente construída, com dois ou mais pavimentos, com pouca vegetação arbórea.	Av. Rui Barbosa (Ponto 1)
Área densamente construída com pouca vegetação arbórea, com presença de barracões e galpões.	Casa das Bombas (Ponto 2)
Área densamente construída, com vegetação arbórea de pequeno porte.	Residencial Colinas (Ponto 3)
Área densamente construída, vegetação arbórea de médio porte esparsa.	Vila Xavier (Ponto 4)
Área densamente construída, vegetação arbórea de grande porte em abundância.	Colégio Ipê (Ponto 5)
Construções esparsas, gramados, vegetação arbórea de grande porte em abundância.	Fema (Ponto 6)
Construções esparsas, vegetação arbórea esparsa ou nula.	São Francisco (Ponto 7)
Áreas verdes e reservas.	Unesp (Ponto 8)
Área rural	Rural (Ponto 9)

Fonte: Brússolo (2015).

No Quadro 3 são apresentados os dados geográficos dos respectivos pontos de coleta de dados.

Quadro 3 Dados geográficos dos pontos de coleta de dados climáticos.

Pontos	Latitude	Longitude	Altitude
Av. Rui Barbosa	22° 39' 44" S	50° 25' 04" W	567 m
Casa das Bombas	22° 38' 64" S	50° 24' 69" W	580 m
Residencial Colinas	22° 40' 14" S	50° 25' 51" W	560 m
Vila Xavier	22° 40' 08" S	50° 25' 16" W	565 m
Colégio Ipê	22° 39' 10" S	50° 25' 53" W	574 m
Fema	22° 38' 40" S	50° 25' 21" W	570 m
São Francisco	22° 38' 41" S	50° 26' 14" W	571 m
Unesp	22° 39' 03" S	50° 26' 13" W	579 m
Rural	22° 39' 58" S	50° 39' 58" W	564 m

Fonte: Brússolo (2015).

A partir da caracterização dos elementos geoambientais e geocológicos do município e do histórico de crescimento e adensamento urbano associado aos fatores de uso e ocupação do solo e hipsometria, foram escolhidos os pontos de coleta de dados (Figura 18). Constatou-se que a área caracterizada como “área densamente construída, vegetação de médio porte esparsa” foi predominante na cidade.

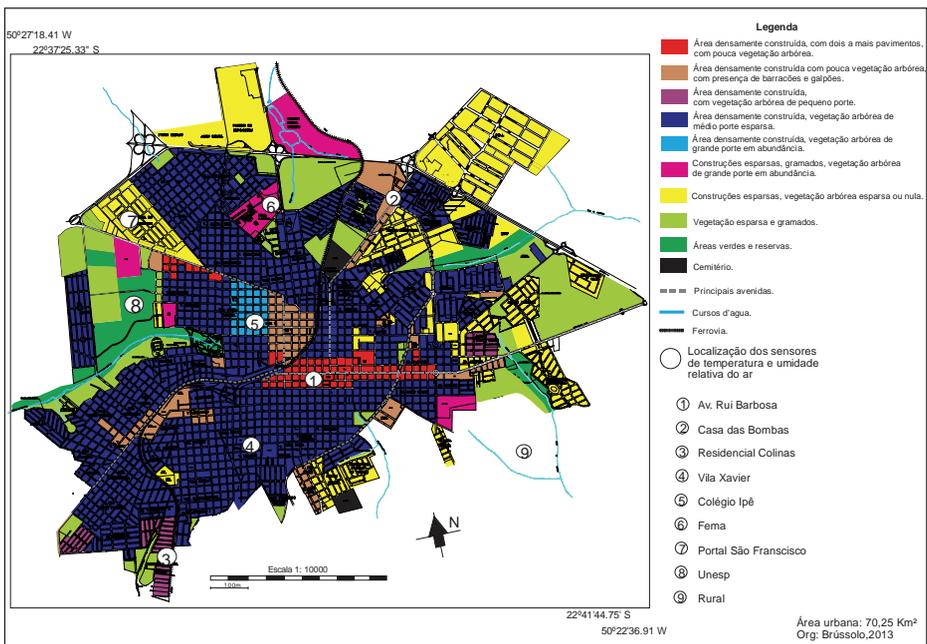


Figura 18 Carta de ocupação do solo urbano de Assis (SP). Fonte: Prefeitura Municipal de Assis. Resultados e discussões: as ilhas de calor em Assis (SP).

O relevo é caracterizado como planalto suave ondulado, e a Figura 19 apresenta a hipsometria da cidade de Assis juntamente com a localização dos sensores que coletaram dados de temperatura e umidade relativa do ar. É importante ressaltar que os locais de coleta de dados estão em cotas altimétricas próximas, com o objetivo de atenuar a influência do fator altitude na temperatura.

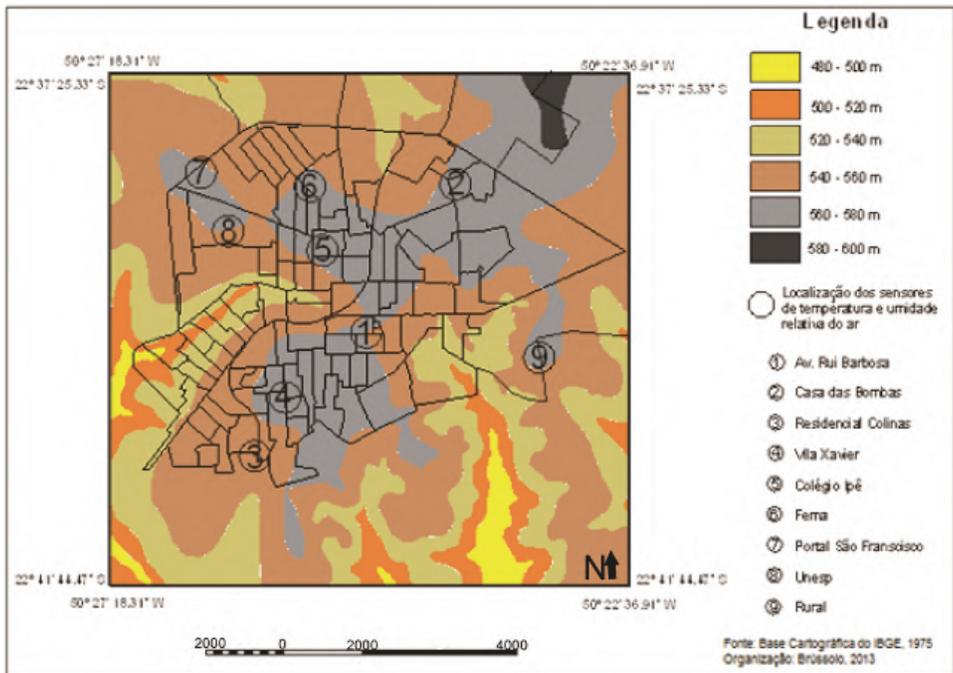


Figura 19 Carta hipsométrica da cidade de Assis (SP). *Fonte:* Brússolo (2015).

As análises e mensurações atmosféricas nos pontos fixos, com levantamentos diurnos e noturnos (8 h, 10 h, 16 h e 22 h) dos elementos climáticos permitiram detectar anomalias térmicas e higrométricas em dias representativos de inverno em uma cidade de porte médio.

Os diferentes tipos de uso e ocupação do solo, a presença ou não de vegetação arbórea de grande porte e a proximidade com corpos d'água, associados aos tipos de tempo, foram decisivos na identificação das ilhas de calor de média a muito forte intensidade, assim como as ilhas frescas, úmidas e secas em Assis.

Com base nas interpretações sobre a variação da temperatura e umidade relativa do ar e na caracterização dos sistemas atmosféricos que atuaram

nos dias das observações-mensurações, foi possível descrever um ritmo para os elementos climáticos (temperatura e umidade relativa do ar). Verificou-se que os maiores gradientes térmicos e higrométricos foram encontrados nos períodos matutino e vespertino. No período matutino a maior intensidade das ilhas de calor foi diagnosticada nas áreas densamente construídas, principalmente no ponto Av. Rui Barbosa, que obteve as maiores temperaturas. No período vespertino, as áreas de construções esparsas, com destaque para o ponto São Francisco, foram as mais quentes, resultado da insolação direta na superfície dessas áreas desde as primeiras horas da manhã.

Às 8h, as áreas densamente construídas estavam mais quentes e secas que as demais, com destaque para o ponto Av. Rui Barbosa, que era o mais quente durante grande parte dos dias de julho. A capacidade dos materiais antrópicos de armazenar e reter mais radiação solar é a resposta mais concreta para essa caracterização. Em uma comparação entre os dados das áreas densamente construídas, observou-se que o ponto Av. Rui Barbosa foi o mais quente e seco durante grande parte do período analisado, efeito da densidade de material construtivo, verticalização urbana e vegetação arbórea esparsa; o ponto Residencial Colinas foi o mais frio, possivelmente pela proximidade da área rural que, de acordo com a direção e velocidade do vento, pode ter propiciado temperaturas mais reduzidas para essa área; e o ponto Colégio Ipê foi o mais úmido, em virtude da presença abundante da vegetação de grande porte.

Nas áreas com características de construções esparsas, Unesp e Rural, o ponto Unesp foi o mais quente e o mais úmido. No primeiro caso, isso possivelmente se deve ao efeito que a vegetação de grande porte e em abundância exerce como barreira das correntes de ar. Essa retenção ocorre em virtude do agrupamento de caráter homogêneo e com densidade das copas, que, em seu conjunto, trabalha como uma barreira das correntes de ar. Em se tratando das altas taxas de umidade relativa do ar, a melhor resposta pode ser a falta de ventilação e menor perda de calor.

O ponto Rural foi o mais seco em virtude da baixa densidade de vegetação de grande porte, que poderia fornecer maiores taxas de umidade por meio da evapotranspiração. As taxas de umidade relativa do ar elevadas em alguns dias no ponto São Francisco podem ser explicadas pela proximidade com o ponto Unesp, pelo fato de possuir vegetação de grande porte e em abundância, fornecendo altas taxas de umidade relativa do ar para o entorno.

Dessa forma, foi analisado detalhadamente o dia 09/07/2013, quando foi possível diagnosticar a maior magnitude da ilha de calor no horário das 8 h

(7,2°C) (Figura 20). Nesse dia não houve chuva e estava atuando a massa polar Atlântica. Às 10 h, as áreas densamente construídas ainda foram mais quentes e secas e as áreas de construções esparsas, Unesp e Rural, foram as mais frias e úmidas, com destaque para o dia 16/7, quando a ilha de calor atingiu a maior magnitude, 7°C. Em uma comparação somente com os dados das áreas densamente construídas, constatou-se que o ponto Av. Rui Barbosa foi o mais quente e seco e o ponto Residencial Colinas, o mais frio e úmido. No primeiro, a densidade de ocupação do solo, a verticalização urbana e a escassez de vegetação arbórea de grande porte, contribuindo para o acúmulo de energia em forma de calor sensível e diminuindo os percentuais de umidade, são as melhores explicações para esse comportamento. No segundo, a proximidade com a área rural que está mais fria e úmida nesse horário forneceu para esse ponto temperaturas mais reduzidas em comparação com o ponto Av. Rui Barbosa.

Na comparação entre os pontos de construções esparsas, Unesp e Rural, o ponto Unesp foi o mais frio e úmido e o ponto São Francisco, o mais quente. Os pontos Rural e São Francisco se destacaram pela similaridade nos valores de umidade relativa do ar, sendo os pontos mais secos durante grande parte do período. A presença abundante de vegetação arbórea de grande porte no ponto Unesp, impedindo que os raios solares atinjam a superfície com mais facilidade e a evapotranspiração, são as melhores explicações para essa caracterização. O ponto São Francisco foi o mais quente em virtude da escassez de vegetação de grande porte, aquecendo a superfície desde as primeiras horas da manhã, e por estar inserido na malha urbana, o que permitiu que as características termais das regiões circunvizinhas influenciassem sua caracterização.

A Figura 21 apresenta as variações de temperatura e de umidade relativa do ar e as condições atmosféricas no dia 16/7, às 10 h, quando se observou a maior magnitude do fenômeno da ilha de calor (7°C). Nesse dia, não houve chuva e o Sistema Polar Atlântico estava atuando sobre a região.

No horário das 16 h, as áreas com características de construções esparsas foram mais quentes e secas em comparação com as áreas densamente construídas, com destaque para o dia 14/7, quando a ilha de calor atingiu 8°C. Quando foram comparados somente os dados das áreas de construções esparsas, Unesp e Rural, verificou-se que o ponto São Francisco foi o mais quente e seco, possivelmente pela escassez de vegetação arbórea de grande porte, pela baixa densidade de construções, o que permite a incidência dos raios solares na superfície com mais facilidade, e por estar inserido na malha urbana, sofrendo influências termo-higrométricas das áreas vizinhas.

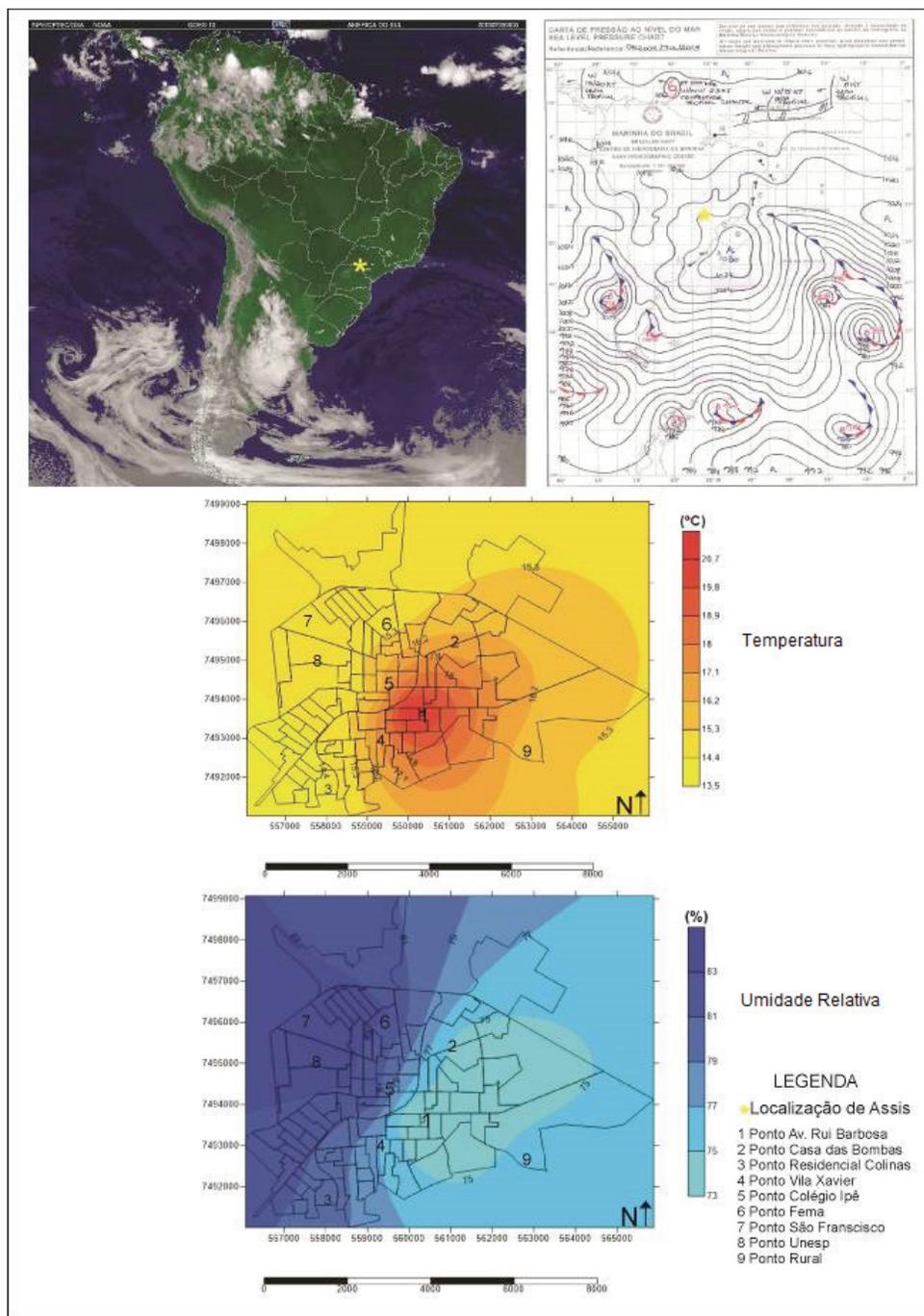


Figura 20 Imagem do satélite GOES, carta sinótica da Marinha do Brasil e ilhas de calor, frescor, úmida e seca, às 8 h, no dia 9/7. *Fonte:* Brússolo (2015).

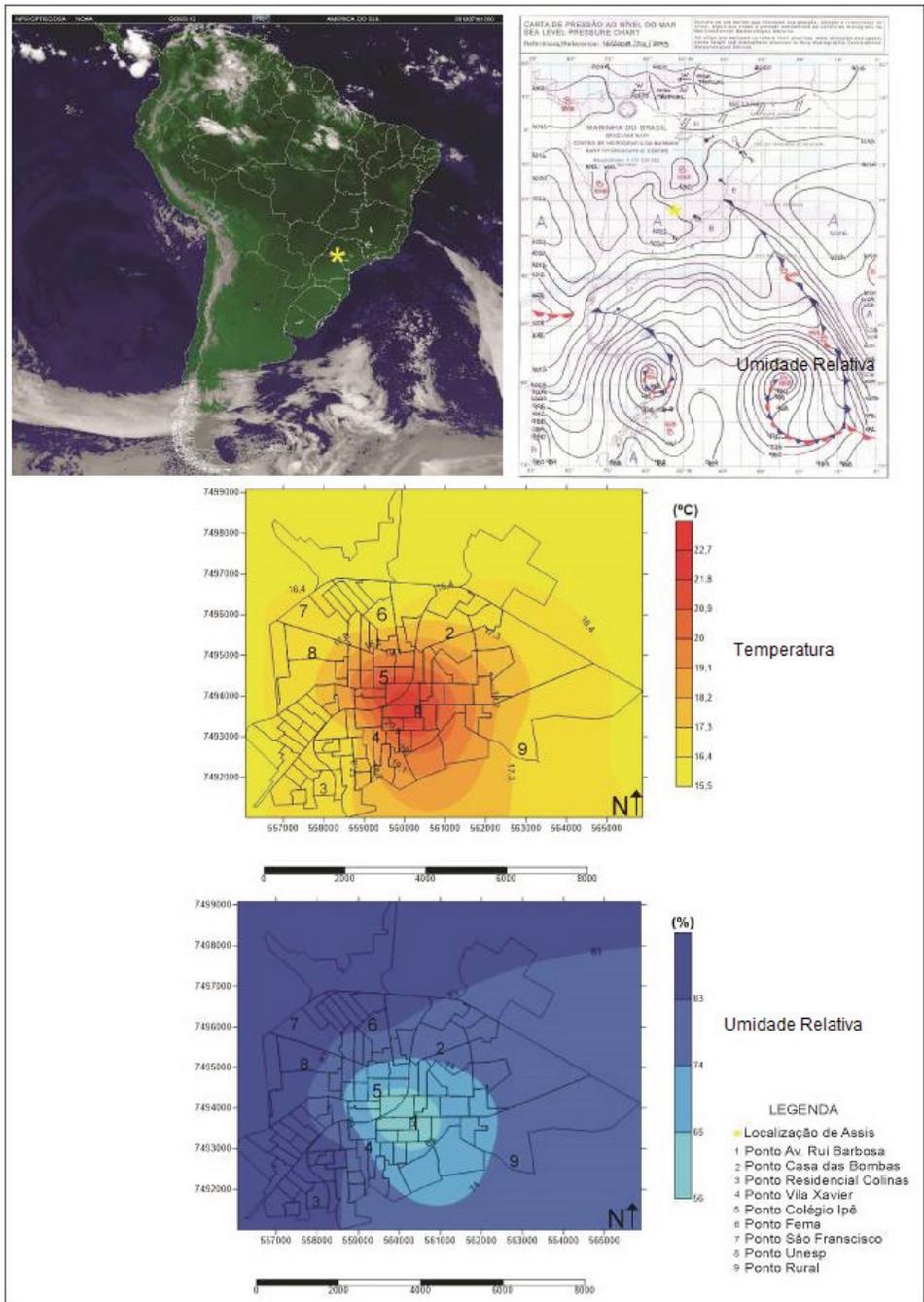


Figura 21 Imagem do satélite GOES, carta sinótica da Marinha do Brasil e ilhas de calor, frescor, úmida e seca, às 10 h, no dia 16/7. *Fonte:* Brússolo (2015).

O ponto Unesp foi o mais frio e úmido, em virtude da vegetação de grande porte e em abundância que impede que os raios solares atinjam a superfície com mais facilidade e fornece maiores taxas de umidade pela evapotranspiração.

Na comparação entre os pontos inseridos nas áreas densamente construídas verificou-se que o ponto Colégio Ipê foi o mais frio e úmido em virtude da vegetação abundante e de grande porte que dificulta a incidência direta dos raios solares na superfície e libera maiores valores de umidade por meio da evapotranspiração. O ponto Vila Xavier foi o mais quente e seco por estar inserido completamente na malha urbana e pela escassez de vegetação arbórea de grande porte e em abundância.

A Figura 22 demonstra as variações de temperatura, umidade relativa do ar e as condições atmosféricas no dia 14/7, às 16h, quando foi possível constatar a maior intensidade das ilhas de calor (8°C). Nesse dia não houve chuva e estava atuando sobre a região o Sistema Tropical Atlântico.

No horário das 22 h, as áreas densamente construídas foram as mais quentes e secas e as áreas de construções esparsas, Unesp e Rural, as mais frias e úmidas. Na comparação somente dos dados das áreas densamente construídas, observou-se que o ponto Av. Rui Barbosa foi o mais quente e seco, o que demonstra a capacidade que os materiais antrópicos têm de armazenar calor por mais tempo. O ponto Residencial Colinas foi o mais frio e, em alguns dias, o mais úmido, pela proximidade com a área rural, que, de acordo com a direção e velocidade do vento, trouxe para essa área menores temperaturas e maiores valores de umidade. Em alguns dias, o ponto Colégio Ipê foi o mais úmido em virtude da abundância de vegetação de grande porte.

Na comparação dos pontos São Francisco, Unesp, Rural, o primeiro foi o mais quente e seco, consequência da escassez de vegetação arbórea de grande porte que poderia reduzir a temperatura e aumentar as taxas de umidade relativa do ar, e também, possivelmente, pelo fato de o ponto de coleta estar inserido na malha urbana, o que pode acarretar influências termohigrométricas do entorno.

O ponto Fema e o ponto Rural foram os mais frios. No primeiro, a baixa densidade de ocupação do solo, permitindo menor absorção e armazenamento de energia, e a vegetação de grande porte e em abundância, dificultando a incidência dos raios solares na superfície durante o dia, o que proporciona as menores temperaturas para esse horário, são as melhores explicações para essa caracterização. Vale ressaltar a proximidade de um córrego que pode influenciar a diminuição da temperatura por meio da evaporação, transformando calor sensível em calor latente.

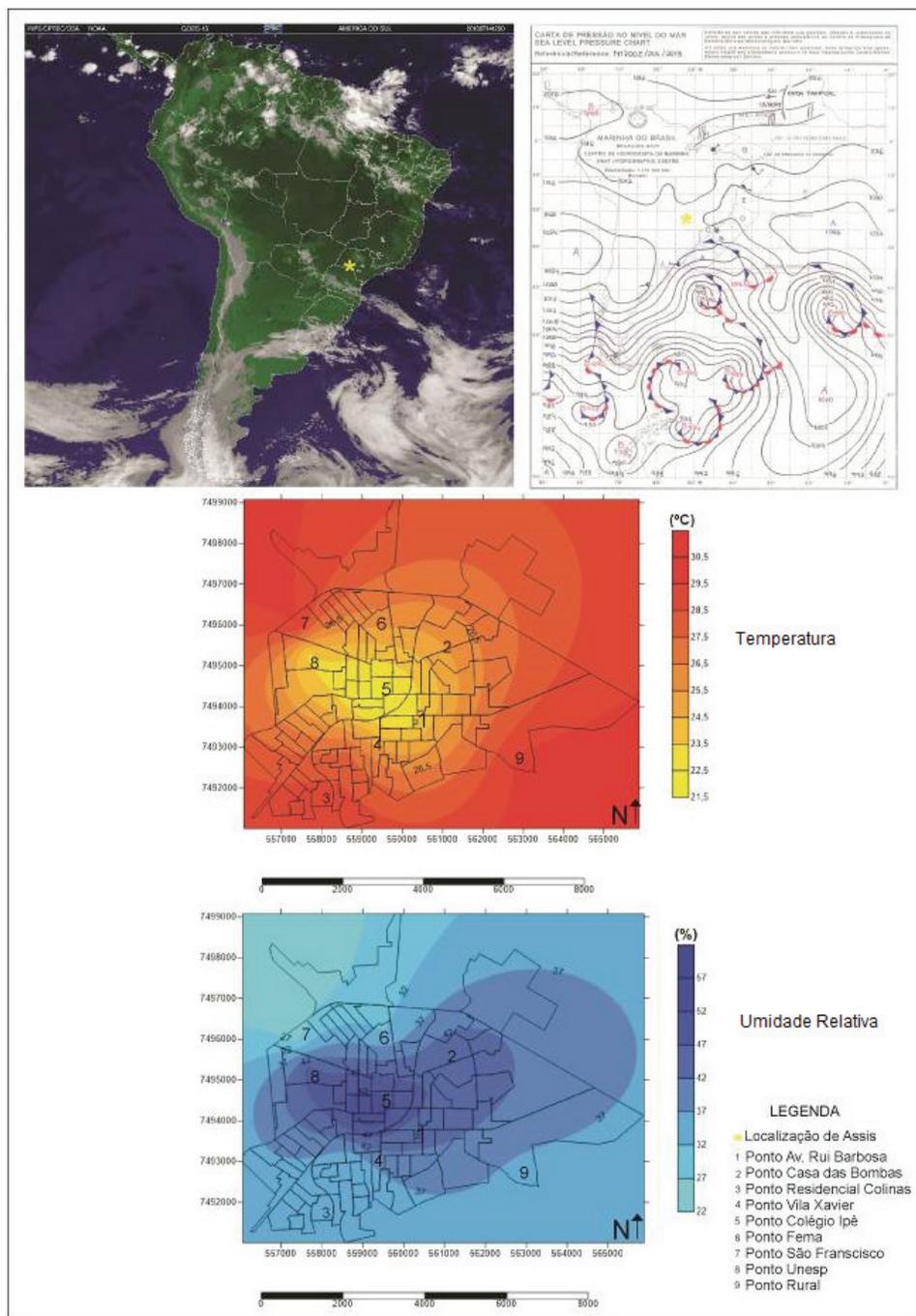


Figura 22 Imagem do satélite GOES, carta sinótica da Marinha do Brasil e ilhas de calor, frescor, úmida e seca, às 16 h, no dia 14/7. *Fonte:* Brússolo (2015).

No que se refere ao ponto Rural, a facilidade e a rapidez com que as superfícies naturais se resfriam podem ser uma resposta adequada, já que às 22 h essa área já devolveu para a atmosfera grande parte da energia absorvida durante o dia.

A Figura 23 ilustra a caracterização da temperatura, da umidade relativa do ar e das condições atmosféricas no dia 16/7, às 22 h, quando foi possível constatar a maior intensidade das ilhas de calor do período (5°C). Nesse dia não houve chuva e estava atuando sobre a região uma massa de ar de origem polar.

Considerações

As ilhas de calor e frescor, bem como as ilhas úmidas e secas, apresentaram magnitudes e intensidades diferenciadas, de acordo com o horário, o uso e a ocupação do solo e o sistema atmosférico atuante. As maiores intensidades das ilhas de calor foram observadas durante o período matutino e vespertino, porém, em áreas com características de uso e ocupação do solo diferenciadas.

Em alguns casos a vegetação arbórea de grande porte e em abundância exerceu papel fundamental para maiores taxas de umidade relativa do ar, ou seja, tanto em áreas densamente construídas quanto em áreas de construções esparsas, a vegetação arbórea de grande porte propiciou a configuração de ilhas úmidas, com destaque para o ponto Unesp, que foi o mais úmido durante grande parte do período de julho de 2013.

A proximidade de um córrego no ponto Fema também pode ter contribuído para menores temperaturas e maiores valores de umidade relativa do ar.

Assim sendo, os fatores que influenciaram a distribuição térmica no município de Assis no período de inverno foram: a densidade de construções, a presença ou não de vegetação arbórea de grande porte, a proximidade com corpos d'água e a baixa velocidade dos ventos associada à pouca nebulosidade, fruto dos sistemas atmosféricos que trouxeram estabilidade do tempo para a região.

As ilhas de calor obtiveram as maiores intensidades sob atuação do Sistema Polar Atlântico (SPA) e Sistema Tropical Atlântico (STA), proporcionando a estabilidade do tempo. Constatou-se que as condições climáticas intraurbanas geradas em Assis estão ligadas diretamente à heterogeneidade da ocupação do solo e das funcionalidades urbanas, bem como sua relação com os sistemas atmosféricos atuantes, o que contribuiu para a magnitude e intensidade das ilhas de calor e de frescor, bem como as ilhas úmidas e secas.

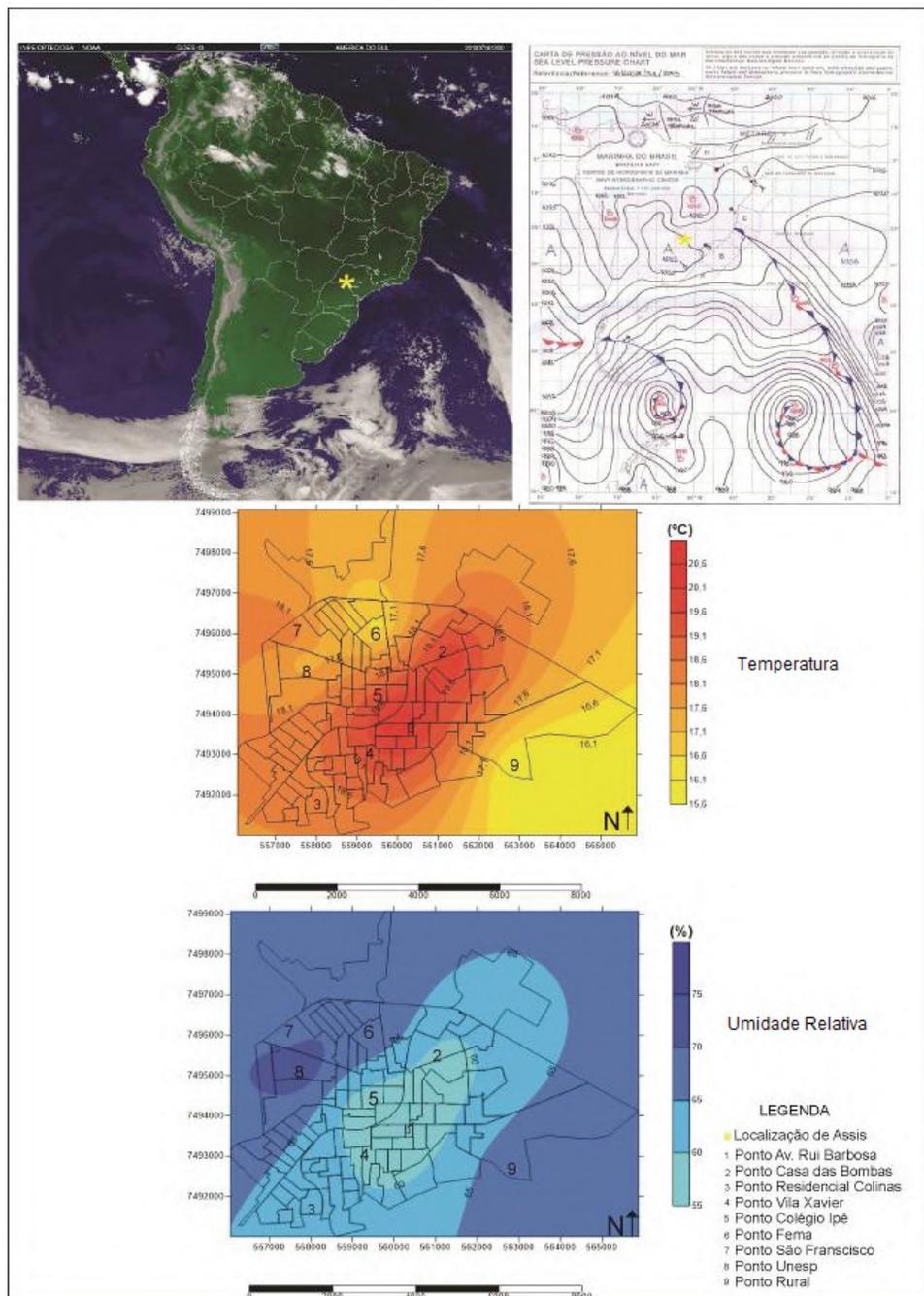


Figura 23 Imagem do satélite GOES, carta sinótica da Marinha do Brasil e ilhas de calor, frescor, úmida e seca, às 22 h, no dia 16/7. Fonte: Brússolo (2015).

Com o intuito de propor medidas mitigatórias e fornecer sugestões ao ordenamento territorial urbano, destaca-se que a cidade merece atenção especial no seu planejamento ambiental/urbano para que os efeitos das ilhas de calor sejam amenizados, uma vez que os elementos que as compõem comprometem a qualidade ambiental.

No que se refere à atuação do poder público, é importante a elaboração de projetos para a arborização urbana, tanto de parques e praças quanto das ruas e avenidas, além da não canalização de rios e córregos que atravessam a cidade, etc., sendo essas algumas estratégias para melhorar o conforto psicotérmico da população.

A fiscalização e o controle do uso e ocupação do solo urbano são essenciais para a gestão ambiental urbana, ressaltando que a principal causa dos problemas ambientais pode ser encontrada nas relações sociais e na assimetria entre o poder político e econômico⁵⁶. A ideia de que o ambiente natural é compreendido como recurso natural, ganhando forças com a aglutinação recorrente entre “ambiente” e “natureza”, faz emergir a falsa dicotomia entre o ambiental e o urbano, resultando em problemáticas entre o planejamento ambiental e o planejamento urbano, o que interfere significativamente na elaboração de diretrizes políticas, escamoteando a maior potencialidade oferecida pelo processo de urbanização: construir ambientes que primem pela qualidade de vida e bem-estar dos habitantes das áreas urbanas.

Destarte, um planejamento urbano e ambiental bem elaborado, associado à mudança de mentalidade da população local por meio da educação/conscientização ambiental, pode contribuir para a produção de cidades com condições térmicas e higrométricas mais adequadas e, conseqüentemente, melhorar a qualidade de vida e o bem-estar das pessoas.

ESTUDO DE CLIMA URBANO EM CIDADE DE PORTE MÉDIO: O CASO DE SÃO CARLOS (SP)

O objetivo geral deste trabalho foi: 1) verificar as variações dos fluxos de energia em ondas longas, por meio de termômetros infravermelhos e do ar, em diversas tipologias urbanas da Cidade de São Carlos (SP); 2) Escolher episódios climáticos pós-frontais em condições de ausência de nuvens no céu, por meio da observação da sucessão dos estados atmosféricos, ligados à circulação regional da atmosfera no Estado de São Paulo; 3) Analisar qualitativamente os resultados obtidos nos experimentos fixos com a leitura dos mapas do Projeto QUAPÁ-SEL (Quadro do Paisagismo do Brasil – Sistemas

de Espaços Livres), com vistas ao planejamento e tomada de decisão de espaços livres qualificados e termicamente confortáveis aos cidadãos.

Características da área de estudo

Localizada na latitude de 22°10' e longitude de 47°53', São Carlos têm na posição geográfica um dos fatores de maior significância em sua definição climática (Figura 24). Nessa latitude, o movimento aparente do Sol resulta em intensa insolação durante o ano todo, e sua posição representa importante mudança no recebimento de energia solar na Terra. A cidade é qualificada como a região de climas controlados por massas equatoriais e tropicais, caracterizando-se por climas tropicais alternadamente secos e úmidos. No período seco, a frequência de chuva diminui consideravelmente e se constitui no período de inverno mais nitidamente seco do Estado de São Paulo.



Figura 24 Localização das áreas de estudo. **Fonte:** Neves (2014).

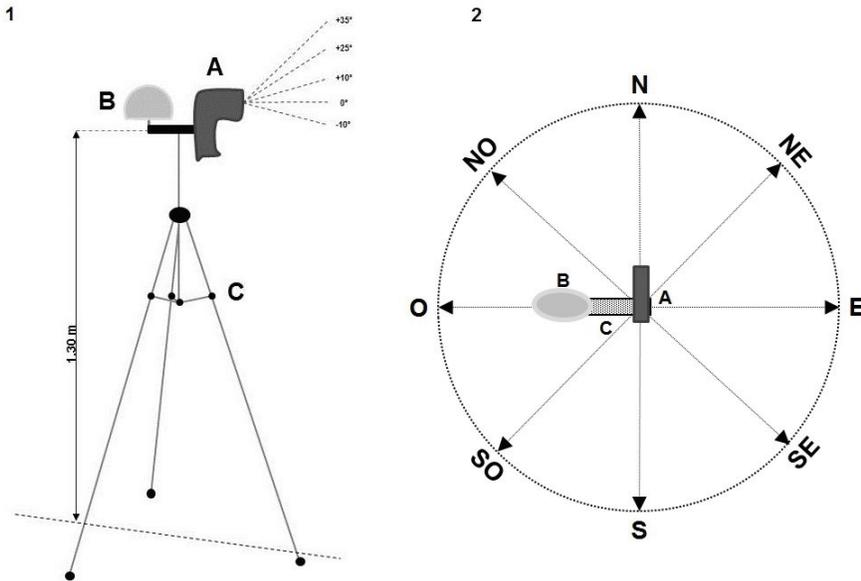
Materiais e métodos

O procedimento fundamenta-se na utilização de um termômetro digital infravermelho fixado em um tripé de alumínio de 1,30 m de altura, com a tomada manual dos setores cardeais e colaterais (N, NE, E, SE, S, SO, O e NO), em sete medidas horárias (9 h, 10 h, 11 h, 12 h, 13 h, 14 h e 15 h), a fim de evitar a interferência de sombreamento e possibilitar a maior incidência da energia solar em linha contínua de observações para a inclinação de -10° (sensor direcionado para o chão).

Em escala microclimática, ao nível do pedestre, as medidas foram realizadas em diversas tipologias urbanas na cidade de São Carlos, em condições de estabilidade atmosférica, ou seja, no domínio e transição da Massa Polar Atlântica e Massa Tropical Atlântica, com ausência de nuvens no céu.

Ao lado do termômetro digital infravermelho, fixado no tripé de alumínio, utilizou-se um *datalogger* para registrar a temperatura e umidade do ar para

fins comparativos entre a temperatura do ar e a temperatura infravermelha irradiada dos alvos, em uma cota que corresponde a uma altura média dos indivíduos que transitam nos sistemas de espaços livres⁵⁷.



(A) termômetro digital infravermelho. (B) *datalogger* de temperatura e umidade/abrigo meteorológico. (C) tripé de alumínio.

Figura 25 (1) Representação esquemática dos ângulos de visada. (2) Posições cardeais e colaterais no sentido horário. *Fonte:* Neves (2014).

Os dados observados pelo termômetro infravermelho ocorreram da seguinte maneira:

- ◆ Um disparo curto no gatilho do termômetro para que o sensor seja previamente sensibilizado com a energia do novo alvo/objeto.
- ◆ Três disparos “padrão” (aproximadamente 0,5 s com o gatilho pressionado), realizando a média entre os valores. Os três disparos garantiriam a ausência de erro e leitura tanto pelo sensor quanto pelo operador.
- ◆ Os valores foram anotados em uma planilha de campo, digitados e organizados no programa *Excel* em ordem cronológica horária.

Em todos os pontos amostrais, foram realizados os registros fotográficos dos oito setores de visada por meio de uma câmera digital acoplada ao celular pelo operador.

Termômetro Digital Infravermelho

O sensor infravermelho é sensível à faixa espectral do infravermelho termal cuja banda principal vai desde 08 μm até 14 μm . Essa banda é utilizada em procedimentos de determinação de uma temperatura, realmente significativa, para idealizações de uma superfície urbana completa²⁴.

O aparelho (*Precision Radiation Thermometer - PRT*) determina a temperatura medindo o fluxo de radiação infravermelha irradiada do alvo, sem contato com a superfície a ser estudada. Possui uma escala de leitura de temperatura IR entre -50°C e 1650°C e uma precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ de leitura. O tempo de resposta é de 500 m.s^{-1} . Sua emissividade é ajustada digitalmente e pode variar entre 0,10 e 1,0. O instrumento possui certificação de calibração realizada pelo fabricante.

À medida que a distância (D) ao alvo que está sendo medido aumenta, o diâmetro do ponto (S) se torna maior, como um cone de visada (Figura 26). O tamanho da área indica 90% de energia inscrita no círculo. Esse termômetro possui relação entre distância e tamanho do ponto de 50:1. O manual de instruções não indica o máximo de relação entre $D:S$.

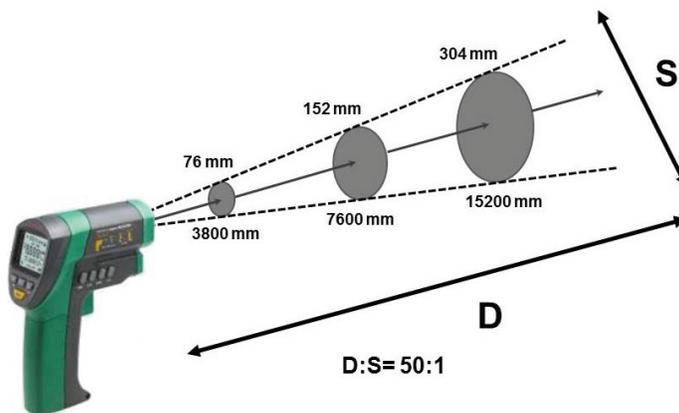


Figura 26 Relação da distância do alvo para o diâmetro de medição. *Fonte:* Neves (2014).

Os experimentos ocorreram entre os dias 4 e 5 de fevereiro de 2014, no período de verão.

A região onde se situa o Campus I da Universidade de São Paulo (USP) é ocupada por edificações com dois e três pavimentos, com massa arbórea de médio e grande portes, reduzido fator de visão do céu, calçadas de concreto, asfalto, gramado, com fluxo de pedestres. O Campus Universitário possui espaços permeabilizados e arborizados em maior quantidade que as áreas adjacentes.

Para a experimentação realizada no Campus I da USP foram utilizados o termômetro digital infravermelho e o *datalogger* de temperatura do ar adaptados no tripé de alumínio. Nesse exercício apresenta-se os valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e do fluxo radiativo ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) em oito gráficos, de acordo com o setor (cardeal e colateral), o tipo de superfície observada pelo termômetro infravermelho e em diferentes angulações.

A Figura 27 mostra os registros fotográficos de acordo com as angulações observadas em campo. Os valores de temperatura do ar são idênticos em todas as figuras (linha verde) e, no eixo esquerdo dos gráficos, estão as temperaturas de superfície (linha azul).



Figura 27 Registros fotográficos das visadas cardeais e colaterais e o perfil transversal da localidade, às 12h. *Fonte:* Neves (2014).

No eixo direito, estão dispostos os valores do fluxo radiativo (linha vermelha). Os registros horários apresentados seguem o horário brasileiro de verão, acrescidos em 1 h do horário oficial (Brasília-DF). A evolução horária diurna e noturna da localidade foi descrita da forma a seguir.

Ângulo – 10°

Com início às 13 h do dia 4 de fevereiro, no setor N, a temperatura apresentou sua intensidade máxima nos horários de 15 h, 16 h e 17 h, com 42,1°C, 45,0°C e 37,0°C, respectivamente. A mínima foi registrada entre os horários de 4 h e 5 h do dia seguinte, com 20,2°C e 20,0°C, respectivamente. O último registro, às 12 h, do dia 5 de fevereiro, marcou 31,2°C.

No setor NE, os valores de temperatura de 34,3°C, 34,0°C, 35,9°C e 35,0°C foram mais acentuados nos respectivos horários de 14 h, 15 h, 17 h e 18 h. Os registros mais modestos, às 4 h, 5 h e 6 h, foram de 22,3°C, 23,1°C e 22,5°C, respectivamente. Os valores seguintes aumentaram gradualmente até alcançar 29,7°C às 11 h e 12 h. O setor E iniciou com a temperatura de 30,1°C e alcançou a intensidade máxima entre os horários de 17 h e 18 h, com os respectivos valores de 34,5° e 35,6°C. Às 4 h, registrou a intensidade mínima de 22,6°C.

Entre 11 h e 12 h, a temperatura apresentou 31,3°C e 30,5°C, respectivamente. Para o setor SE, os valores de temperatura mais acentuados foram registrados nos horários de 13 h, 16 h e 17 h, com 38,1°C, 38,4°C e 40,6°C, respectivamente. A temperatura mais baixa registrou 22,6°C às 4 h. No último registro (12 h), a temperatura foi de 34,5°C.

No setor S, os registros termais com intensidade máxima se deram nos horários de 16 h, 17 h e 18 h, com os respectivos valores de 32,0°C, 33,0°C e 34,6°C. Nos horários subsequentes, a temperatura baixou, registrando sua intensidade mínima entre 7 h e 8 h, com os valores de 23,3°C e 23,7°C, respectivamente.

Às 12 h, o registro foi de 29,6°C. As temperaturas mais elevadas para o setor SO foram registradas nos horários de 18 h e 19 h, com 35,0°C e 34,2°C, respectivamente. Os registros mínimos de temperatura foram obtidos nos horários de 6 h, 7 h e 8 h, com 23,0°C. Às 12 h, o registro termal foi de 29,0°C. Distinto dos padrões apresentados anteriormente, no ângulo -10°, as maiores temperaturas foram obtidas às 13 h, 14 h e 18 h, com os respectivos valores de 37,7°C, 39,5°C e 35,0°C. A intensidade mínima de temperatura foi registrada nos horários de 5 h e 7 h, com 20,8°C.

No setor NO, a intensidade máxima de temperatura registrada foi de 38,7°C, 40,0°C e 40,5°C nos respectivos horários de 15 h, 16 h e 17 h. Os menores valores de temperatura registrados para o setor foi de 20,9°C às 4 h. Nos

horários seguintes, a temperatura aumenta gradualmente até 30,2°C e 30,3°C às 11 h e 12 h, respectivamente (Figura 28).

A evolução do fluxo radiativo para a angulação -10° apresentou um padrão semelhante ao da temperatura de superfície. No setor N, a superfície de gramado ficou parcialmente sombreada pela copa das árvores ao redor do local, o fluxo variou de 551 W.m⁻², às 17 h, até seu mínimo de 397 W.m⁻², que foi registrado às 5 h. No setor NE, com gramado parcialmente sombreado, o fluxo variou de 490 W.m⁻², às 17 h, até 410 W.m⁻², às 4 h. No setor E (gramado), o fluxo radiativo alcançou a máxima de 489 W.m⁻² às 18 h. O mínimo foi às 8 h, com 408 W.m⁻². Às 11 h, a intensidade do fluxo registra 462 W.m⁻².

No setor SE, cuja superfície é uma calçada de concreto, a amplitude do fluxo radiativo variou de 521 W.m⁻², às 17 h, até 411 W.m⁻², às 8 h. No setor S, a superfície de concreto apresentou a intensidade máxima do fluxo radiativo às 18 h, com 482 W.m⁻², e a mínima às 7 h, com 415 W.m⁻². Para o setor SO (concreto), a máxima foi de 485 W.m⁻². A mínima de 413 W.m⁻² foi registrada entre 7 h e 8 h. No setor O, a superfície de gramado registrou dois picos máximos no período diurno. O primeiro às 14 h, de 514 W.m⁻², e o segundo às 18 h, de 485 W.m⁻².

A intensidade mínima foi registrada entre 5 h, 6 h e 7 h, com 401 W.m⁻². Finalmente, o setor NO, com a superfície de gramado, registrou a intensidade máxima do fluxo radiativo às 17 h, com 520 W.m⁻², e a mínima às 4 h, com 400 W.m⁻².

Observou-se que os setores N, SE, O e NO registraram picos de temperatura acima dos 40°C entre os horários de 14h e 17h, em virtude de a incidência da radiação solar ter atingido angulações diferentes durante o dia, mesmo em superfícies como o gramado e o concreto. Fica evidente que a perda de energia radiativa das superfícies é maior que a temperatura do ar após as 3 h nos setores N, O e NO, pois os elementos ao redor dos referidos alvos foram mais obstruídos pela copa das árvores e estavam mais distantes de paredes, calçadas de concreto e asfalto. Nos setores opostos, como a NE, L, SE, S e SO, as superfícies menos obstruídas e mais próximas do concreto e asfalto armazenaram calor por algumas horas a mais que os anteriores.

Aproximadamente às 6 h e 7 h, essas superfícies passaram a emitir valores de energia térmica inferiores à temperatura do ar. E somente às 12 h do dia 5/2 os setores L (gramado) e SE (concreto) apresentaram temperaturas de superfície iguais ou superiores à temperatura do ar, mostrando que os setores menos obstruídos pela copa das árvores e elementos edificados demoram mais tempo para estabelecer homogeneidade ou superioridade térmica com a temperatura do ar sobrejacente e tendem a liberar energia mais lentamente durante a noite.

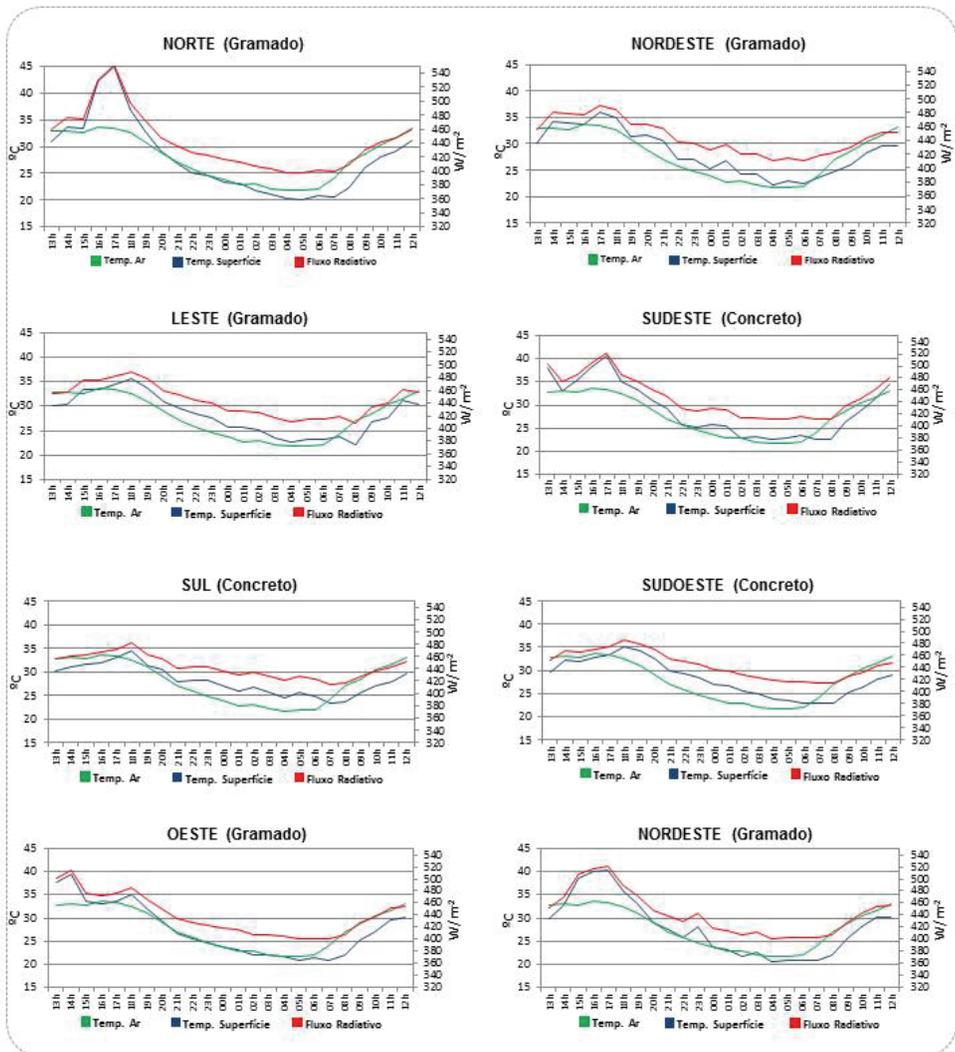


Figura 28 Gráficos de temperatura do ar, de superfície e fluxo radiativo para o ângulo de -10° nos setores cardeais e colaterais. *Fonte: Neves (2014).*

Observou-se que os valores do fluxo radiativo são superiores para as superfícies de madeira (árvore), pois o valor de sua emissividade é maior que outras superfícies comparadas na Figura 27. Em todos os setores, principalmente nas superfícies de concreto nos setores L, SE e NO, a evolução termal diurna da temperatura do ar foi semelhante à temperatura de superfície. O sombreamento causado pela copa das árvores e outros elementos edificados ao redor dos alvos observados foi o fator atenuador das temperaturas superficiais discrepantes, como os registros apresentados para os setores N, O e NO na angulação -10° .

Considerações

O experimento de campo mostrou-se um exercício válido que procurou-se fazer uma análise completa das superfícies em termos de fluxo de energia diurno e noturno, discutindo os dados de superfície com a temperatura do ar.

As diferentes superfícies analisadas ao nível do pedestre (angulação de -10°) apresentaram amplitudes térmicas que chegaram até $15,0^\circ\text{C}$ de diferença quando comparadas com as temperaturas do ar. Todavia, no período noturno, as superfícies vegetadas apresentaram aumento de calor sensível, exibindo valores térmicos menos elevados que o ar subjacente.

As observações⁵⁸ que nortearam esta pesquisa desdobraram alguns questionamentos a partir do adensamento das edificações entre o sítio estudado e outras cidades de maior porte. De fato, os elementos urbanos no centro da cidade de São Carlos não se constituem essencialmente *canyons* urbanos¹⁵ como as geometrias urbanas analisadas em Vancouver, no Canadá²⁴, e em São Paulo (SP)^{57,59,60}, associadas aos centros urbanos de grande volume edificado (Figura 29).

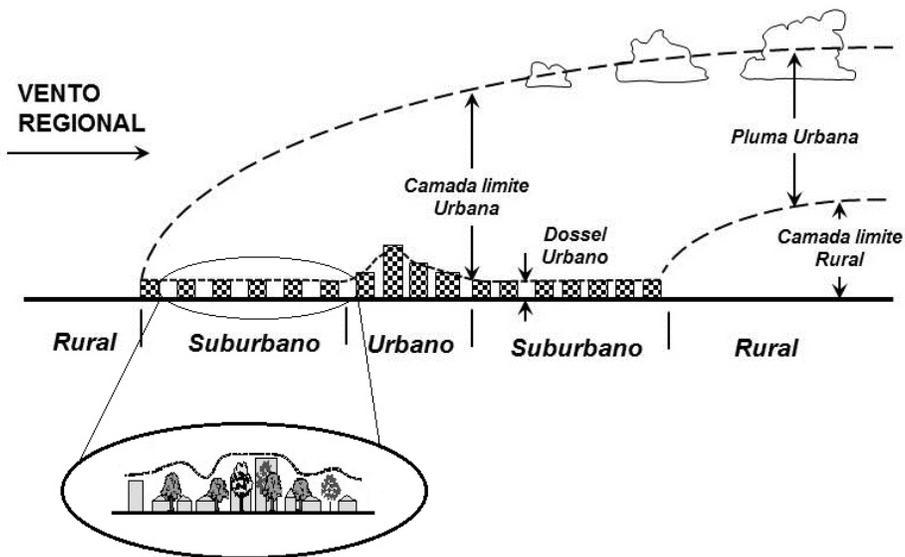


Figura 29 Representação esquemática da atmosfera urbana com destaque para as diferentes dimensões na área suburbana. *Fonte:* Oke (1988), modificado.

O centro da cidade de São Carlos, no atual período (2017) de desenvolvimento e ocupação, está associado formalmente a uma região de subúrbio com edificações de portes médio e pequeno, mais semelhante a uma “trincheira

urbana” do que propriamente um *canyon* urbano. Diante disso, emanam duas questões centrais: 1) Quais dimensões devem ser adotadas para que o *canyon* urbano seja qualificado nas cidades brasileiras de menor porte? 2) A adoção da nomenclatura “trincheira urbana” para a situação das cidades brasileiras de médio e pequeno portes é mais adequada que *canyon* urbano?

Entende-se que a relação de suas características geométricas, como a altura e orientação das edificações paralelas entre si, deve ser mais detalhada e categorizada (área rural, suburbana, centro-urbano) para fins de estudos em climatologia urbana e suas especificidades, como o regime de ventos, balanços de energia e outros elementos climáticos/meteorológicos.

A escala de análise espacial dos mapas QUAPÁ-SEL foi fundamental para o emprego de métodos da climatologia urbana, mais especificamente a radiação em ondas longas que este trabalho propôs, por ordenar em grupos e categorias os espaços livres públicos e privados.

O reconhecimento da importância da Climatologia Urbana para a resolução de fragilidades inerentes ao planejamento urbano, conforto ambiental, espaços livres, etc., deve ilustrar o problema e ofertar elementos e subsídios para a tomada de decisão dos planejadores e gestões urbanos e a outras áreas do conhecimento científico.

Recomendações e sugestões para a continuidade da pesquisa é de se considerar os elementos urbanos mais afastados ou próximos do termômetro infravermelho para idealizações e estimativas mais acuradas do balanço de energia e avaliar as temperaturas dos dias anteriores dos materiais de construção e dos elementos geourbanos.

CONSIDERAÇÕES E POTENCIALIDADES DE APLICAÇÃO

Viu-se que o modelo de urbanização adotado em muitas cidades, não levando em consideração as condições geológicas e geoambientais locais, provoca alterações nos elementos climáticos, gerando condições favoráveis para a formação de um clima urbano específico e que implica mudanças significativas no bem-estar da população no que se refere ao conforto térmico, à qualidade do ar, ao impacto das chuvas, dentre outros.

No Brasil e no mundo, a ilha de calor é o fenômeno mais estudado em Climatologia Urbana. É um fenômeno multifacetado, com uma série de possíveis causas, atingindo intensidade máxima poucas horas após o pôr do sol.

As proposições teóricas, metodológicas e aplicadas ilustradas neste capítulo se apresentam como ferramentas de apoio aos graduandos, pesquisadores das ciências ambientais e áreas do conhecimento correlatas aos estudos das

idades de pequeno, médio e grande portes. Obviamente, mostra-se uma potencial literatura aos tomadores de decisões que se utilizarem da interlocução entre as instituições e esferas públicas que objetivam melhorar a qualidade ambiental das cidades do Brasil.

RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 248 p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (Orgs.). **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. **Boletim de Geografia Teorética**, n. 23, v. 46-46, p. 288-294, 1993.

QUESTÕES DE REVISÃO

- Quais são as características da Camada Limite Planetária e da Camada Limite Urbana e como elas interagem entre si?
- Explique as escalas da climatologia urbana e a importância do seu detalhamento.
- O que são ilhas de calor e como se intensificam?
- Explique as características do sistema Clima Urbano e seus canais de percepção, segundo a Escola do professor Monteiro.
- Comente os três estudos de caso apresentados no presente capítulo, ressaltando o rigor metodológico de suas aplicações e a importância para as cidades brasileiras.

BIBLIOGRAFIA

[1] BRANDÃO, A. M. de P. M. **O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro**. 1996. 85 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

[2] SANT'ANNA NETTO, J. L. **As chuvas no Estado de São Paulo**. 1995. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

[3] BRANDÃO, A. M. P. M. O clima urbano na cidade do Rio de Janeiro. In: MONTEIRO, C. A. de F.; MENDONÇA, F. (Orgs.). **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003. p. 121-153.

[4] ASSIS, E. S. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió (AL), 2005. p. 92-10.

[5] CHANDLER, T. J. The changing form of London's heat island. **Geography**, v. 46, n. 213, 1961.

[6] LANDSBERG, H. E. The climate of towns. In: THOMAS, W. E. (Org.). **Man's role in changing the face of Earth**. 1956. p. 584-606.

[7] BORNSTEIN, R. D. Observations of the urban heat island effect in New York City. **Journal of Applied Meteorology**, v. 7, p. 572-582, 1968.

- [8] PETERSON, J. T. The climate of cities: survey of recent literature. In: MCBOYLE, G. (Org). **Climate of review**. University of Waterloo, 1973.
- [9] TERJUNG, W. H. Climatic modification. In: MANNERS, I. R.; MARVIN, W. (Orgs.). **Perspectives on environment**. Washington: Mikelsell Editors/Association of American Geographers, 1974.
- [10] EAGLEMAN, J. R. A comparison of urban climatic modifications in three cities. **Atmospheric Environment**, v. 8, p. 1131-1142, 1974.
- [11] JAUREGUI, E. **Los climas urbanos tropicales – revision y evolución**. Conferência técnica de la WMM sobre climatología urbana e sus aplicaciones particularmente em lo que se refiere a las regiones tropicales. Doc 6. Cidade do México, 1984.
- [12] OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, p. 237-254, 1981.
- [13] _____. The energetic basis of the urban heat island. **Quat. J. R. Met. Soc.**, v. 108, n. 455, p. 1-24, 1982.
- [14] _____. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London, Routledge, 1987.
- [15] _____. The urban energy balance. **Progress in Physical Geography**, v. 12, p. 471-508, 1988.
- [16] DOS ANJOS, M. W. B. et al. Climatologia urbana e espaços verdes: contributo ao planejamento das cidades. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v. 2, n. 5, p. 233-245, 2012.
- [17] GARRATT, J. R. **The atmospheric boundary layer**. [S.l.]: Cambridge, 1992.
- [18] FREIRE, L. S. **Teorias de Camada Limite Atmosférica: modelo de crescimento, fluxo de entranhamento e análise espectral**. Curitiba, 2012. 70 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, 2012.
- [19] MACHADO, A. J. **Distribuição espacial do fluxo radiativo em ondas longas na Região Metropolitana de São Paulo**. 2009. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [20] ARNFIELD, A. J. How to do urban climatology: a personal view of the legacy of professor Tim Oke. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 6., 2006, Goteborg. **Anais...** Goteborg, Sweden, 2006. Disponível em: <http://blogs.ubc.ca/toke/files/2015/12/Arnfield-2006.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2014.
- [21] JOHNSON, G. T. et al. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 1: Theory and tests against field data. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 56, p. 275-294, 1991.
- [22] MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, 1976. (Série Teses e Monografias, n. 25).
- [23] _____. Teoria e clima urbano. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (Orgs.). **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003. p. 9-67.
- [24] VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Complete urban surface temperatures. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, p. 1117-1132, 1997.
- [25] ALVES, E. D. L.; SPECIAN, V. Contribuição aos estudos do clima urbano: variação térmica e higrométrica em espaços intra-urbanos. **Mercator**, v. 8, n. 17, p. 181-191, 31 dez. 2009.
- [26] ALVES, E. D. L.; SPECIAN, V. O clima intraurbano de Iporá-GO: um estudo em episódios. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 3, p. 141-154, 2010.
- [27] ALVES, E. D. L. Frequência e probabilidade de chuvas no município de Iporá-GO. **Caminhos de Geografia**, v. 12, n. 37, p. 65-72, 2011.
- [28] SPECIAN, V.; SILVA JUNIOR, U. P. DA; VECCHIA, F. A. S. Padrão térmico e higrométrico para dois ambientes de estudo: área urbanizada e remanescente de cerrado na cidade de Iporá-GO. **Espaço & Geografia**, v. 16, n. 1, p. 255-277, 2013.

- [29] OLIVEIRA, M.; ALVES, W. S. A influência da vegetação no clima urbano de cidades pequenas/ : um estudo sobre as praças públicas de Iporá-GO. **Revista Territorial**, v. 2, n. 2, p. 61-77, 2013.
- [30] SPECIAN, V.; VECCHIA, F. A. S. Distribuição da frequência mensal da precipitação para região oeste de Goiás/ : comparação entre dois postos pluviométricos. **Ateliê Geográfico**, v. 8, n. 1, p. 200-214, 2014.
- [31] ALVES, E. D. L. **Análise das influências geourbanas no clima urbano da cidade de Iporá - Goiás**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.
- [32] DORIGON, L. P.; AMORIM, M. C. DE C. T. Estrutura térmica da superfície de Paranavaí/PR através do Landsat 7. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, n. 35, p. 110-129, 2013.
- [33] HAMADA, S.; OHTA, T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 9, n. 1, p. 15-24, jan. 2010.
- [34] HART, M. A.; SAILOR, D. J. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 95, n. 3-4, p. 397-406, 7 maio 2008.
- [35] SOUSA, S. B. DE; FERREIRA, L. G. Análise da temperatura de superfície em ambientes urbanos: um estudo por meio de sensoriamento remoto no município de Goiânia, Goiás (2002-2011). **Confinis**, n. 15, 18 jun. 2012.
- [36] OESCH, D. C. et al. Lake surface water temperature retrieval using advanced very high resolution radiometer and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data: Validation and feasibility study. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. C12, p. C12014, 2005.
- [37] CAO, X. et al. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. **Landscape and Urban Planning**, v. 96, n. 4, p. 224-231, jun. 2010.
- [38] CHOW, W. T. L. et al. Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 103, n. 1-2, p. 197-211, 21 jan. 2011.
- [39] REN, Z. et al. Estimation of the relationship between urban park characteristics and park cool island intensity by remote sensing data and field measurement. **Forests**, v. 4, n. 4, p. 868-886, 24 out. 2013.
- [40] SANTOS, N. B. F. dos; FERREIRA JÚNIOR, L. G.; FERREIRA, N. C. Distribuição espacial da temperatura de superfície no bioma cerrado: uma análise a partir de dados orbitais de resolução moderada, para o período de 2003 a 2008. **Ciência e Cultura**, v. 63, n. 3, p. 30-33, 2011.
- [41] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2015**. Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_dou_2015_20150915.pdf. Acesso em: 2 nov. 2015.
- [42] PREFEITURA MUNICIPAL DE ASSIS. Secretaria Municipal de Planejamento, Obras e Serviços. **Base Cartográfica Municipal**, 2013.
- [43] BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal/ Centro Gráfico, 1988. 292 p.
- [44] _____. **Estatuto da cidade**: Lei 10.257/2001, que estabelece diretrizes gerais da política urbana. 1. ed. Brasília: Câmara dos Deputados, 2001.
- [45] _____. Lei Federal nº 12.651, de 25 de maio de 2012, alterada pela Lei 12.727, de 17 de outubro de 2012. Brasília, DF: Congresso Nacional, 2012.
- [46] _____. Presidência da República. **Parcelamento do solo urbano. Lei 6.766/79**. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.htm. Acesso em: 13 abr. 2014.
- [47] SILVA, R. S. **Urdiduras e tessituras urbanas. Na história das cidades, a estruturação territorial de Assis**. 1996. 257 f. Tese (Doutorado em História) – Faculdade de Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista, Assis.

- [48] MONTEIRO, C. A. F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **GeoSul**, Florianópolis, v. 5, n. 9, 1990.
- [49] AMORIM, M. C. C. T. **O clima urbano de Presidente Prudente/SP**. 2000. 374 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [50] LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985. 244 p.
- [51] MENDONÇA, F. de A. **O clima e o planejamento urbano de cidade de porte médio e pequeno: proposição metodológica para estudo e aplicação à cidade de Londrina, PR**. 1994. 322 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [52] SECCHI CAMARGO, E. **Qualidade ambiental urbana em Presidente Prudente**. 2007. 152 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- [53] PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente. **Manual Técnico de Arborização Urbana**. 1. ed. 2005.
- [54] FORSDYKE, A. G. **Previsão do tempo e clima**. São Paulo: Melhoramentos, 1978.
- [55] BRÚSSOLO, R. G. **O clima e a cidade: ilhas de calor em Assis (SP)**. 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Londrina.
- [56] HARVEY, D. **Justice, nature and the geography of difference**. Londres: Blackwell, 1996.
- [57] MACHADO, A. J. Fluxos radiativos da Avenida Paulista, São Paulo, SP – discutidos a partir da análise das formas. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n. 33, v. 2, p. 21-41, ago./dez. 2011.
- [58] NEVES, G. Z. F. **Variabilidade da radiação em ondas longas em uma cidade de porte médio: experimentos nos espaços livres em São Carlos-SP**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- [59] OKE, T. R. The micrometeorology of the urban forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Series B, 324, p. 335-351, 1989.
- [60] MACHADO, A. J.; AZEVEDO, T. R. de. Spatial distribution in long-wave radiation flux in São Paulo City, Brazil. **World Journal of Engineering and Physical Sciences**, v. 1, p. 33-52, 2013.

Documentos eletrônicos

- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Divisão de Satélites Ambientais. Banco de Dados de Imagens – GOES. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>. Acesso em: 15 jan. 2013.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Divisão de Satélites Ambientais. Banco de Dados de Imagens – GOES. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>. Acesso em: 10 set. 2013.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Divisão de Satélites Ambientais. Banco de Dados de Imagens – GOES. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>. Acesso em: 25 set. 2013.
- MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Cartas de Superfície**. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm>. Acesso em: 10 set. 2013.

CAPÍTULO 4

CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO:

Conceitos e Aplicações em
Bioclimatologia e
Desempenho Térmico

Nuria Pérez Gallardo

Rafael Perussi

Maurício Sanches Duarte Silva



Resumo: Neste capítulo é apresentada uma visão geral dos processos biológicos que envolvem as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente a partir dos estudos da Climatologia. São abordados os conceitos e algumas metodologias de avaliação de conforto térmico, tanto no ambiente construído quanto no ambiente externo, apresentando trabalhos experimentais que utilizam vegetação nas envolventes das edificações e a aplicação de índices de conforto.

INTRODUÇÃO

A interpretação e compreensão do clima e do tempo e sua repercussão no espaço geográfico tem sido tema constante de discussões em nossa sociedade nos últimos anos, principalmente pela complexidade dos fatores que realmente influenciam a dinâmica atmosférica do nosso planeta, como por exemplo ciclos solares, lunares, galácticos ou até aqueles com duração temporal muito superior à existência da vida. Previsões, prognósticos, cenários, modelos meteorológicos tentam ajudar na compreensão da complexa expressão que o tempo e o clima imprimem ao ambiente e à nossa sociedade. Praticamente nenhuma atividade humana é realizada atualmente sem levar em conta essa problemática no seu desenvolvimento.

A Bioclimatologia é uma ciência multidisciplinar que se dedica ao estudo das influências do clima na biota, ou seja, a influência dos estados da atmosfera nos organismos vivos, influências que podem ser termais, barométricas, hídricas, luminosas ou elétricas e que também podem ser causadas pela composição química do ar. A Bioclimatologia Humana procura estabelecer as relações entre a saúde dos seres humanos e as condições do tempo e do clima¹. Essas relações entre o clima e os organismos são estudadas a partir de dados meteorológicos de radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar e velocidade e direção dos ventos, registrados nas cercanias dos ambientes, em função do período de exposição do ritmo climático². Desse modo, é possível avaliar, por exemplo, o conforto térmico enquanto exercemos diversas atividades, como no caso das ondas de calor ou de frio e de eventos como as inundações e furacões, ou ainda avaliar o comportamento térmico das envolventes de uma edificação por meio do estudo dos processos de transmissão de calor.

A dificuldade na obtenção de dados meteorológicos com uma escala temporal diária é apontada como o maior obstáculo para a viabilização de estudos que levem em conta a dinâmica atmosférica, sendo que para estudos

de conforto térmico são necessários dados, no mínimo, horários. Porém, essa realidade tende a mudar uma vez que, atualmente, é possível contar com muitos pontos de observações meteorológicas além de plataformas de aquisição de dados automáticas³.

VARIÁVEIS DO CLIMA E AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados climatológicos necessários para pesquisas na área da Bioclimatologia e estudos de conforto podem ser adquiridos de estações meteorológicas da região e medições "in situ", além de consultas a bancos de dados de agências oficiais, como a Agência Nacional de Águas (ANA), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Mais detalhes sobre instrumentação meteorológica são abordados no Capítulo V.

Radiação solar: É uma onda eletromagnética, responsável pela energia fornecida ao planeta. A radiação proveniente do Sol (radiação de ondas curtas) atinge a superfície terrestre que, por sua vez, emite radiação na forma de ondas longas. O movimento de rotação da Terra determina as variações da intensidade da radiação durante o dia. Em função do movimento de translação e da inclinação do eixo terrestre em relação à perpendicular ao plano da eclíptica, em determinados momentos do ano um hemisfério recebe mais radiação solar do que o outro. O Hemisfério Sul inclina-se para longe do Sol durante o nosso inverno e em direção ao Sol durante o nosso verão⁴. Nos equinócios os dois Hemisférios recebem, naquele dia, o mesmo fluxo de radiação. As regiões que mais radiação solar recebem são as localizadas dentro dos trópicos: Câncer no Hemisfério Norte e Capricórnio no Hemisfério Sul. A Figura 1 ilustra a marcha das estações do ano no hemisfério Sul, diferenciando o inverno e o verão do outono e a primavera.

A radiação incidente sobre um corpo opaco pode ter parte absorvida e parte refletida. A energia absorvida transforma-se em energia térmica ou calor e a refletida não sofre alterações. A Figura 2 ilustra o comportamento da radiação solar ao incidir em uma superfície opaca.

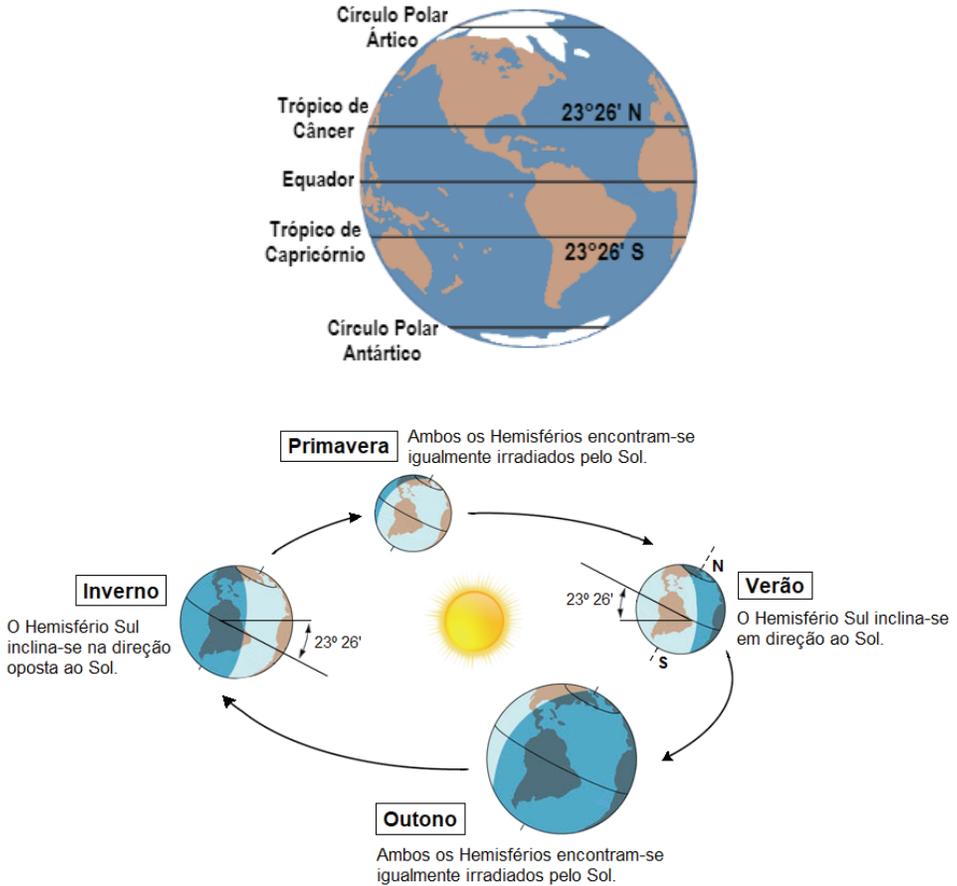


Figura 1 Indicação dos Trópicos e representação do movimento da Terra. *Fonte:* Elaborado por Rafael Perussi (2017).

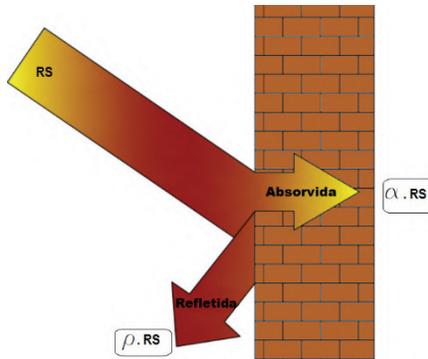


Figura 2 Comportamento da radiação solar ao incidir em uma superfície opaca. *Fonte:* Elaborado por Gallardo (2017)⁴³.

O balanço dessa energia térmica pode ser calculado através da aplicação da Equação 1.

$$\alpha \cdot RS + \rho \cdot RS = RS \rightarrow \alpha + \rho = 1 \quad (1)$$

em que:

RS é a radiação total incidente na superfície (W/m²).

α é absorvidade da radiação (que varia em função da cor da superfície).

ρ é a refletividade.

Temperatura do ar: A temperatura do ar não é uma consequência direta da radiação solar. Os gases existentes na atmosfera absorvem somente alguns comprimentos de onda, conforme explicado no Capítulo 1, pois o ar é transparente frente a quase todos os comprimentos de onda eletromagnética. Assim, a temperatura do ar será consequência dos seguintes aspectos: de parte da radiação solar incidente no planeta, parte da radiação emitida pelas superfícies e pela distribuição do calor por convecção e advecção. Quando a radiação solar atinge as superfícies, parte dela é absorvida elevando o grau de agitação das moléculas e emitindo radiação de ondas longas, gerando calor. Porém, essa energia radiante contribui pouco com o aquecimento direto do ar, que é aquecido na sua maior parte a partir da superfície terrestre por condução, no contato entre o ar e as superfícies. O calor é então transportado por convecção e por advecção, que são os transportes de calor de massas (correntes de ar e correntes marinhas). O ar atinge o seu aquecimento máximo após três horas da passagem do Sol pelo meridiano. A partir daí o balanço de energia começa a ser negativo, pois a energia perdida é maior que a recebida, o que produz um decréscimo da temperatura da superfície da Terra até alcançar seu mínimo antes do nascer do Sol novamente⁵.

Umidade do Ar: A umidade presente no ar é formada pela água evaporada que passa a compor a mistura de gases presentes na atmosfera, processo de mudança de estado líquido para gasoso sem modificar a temperatura.

A umidade absoluta em uma base volumétrica é a quantidade absoluta de água numa porção da atmosfera, ou seja, a massa de vapor de água por unidade de ar seco, também conhecido como razão de mistura de massa, dada em g/kg ou kg/kg, por exemplo.

A umidade relativa é a relação entre a quantidade de água existente do total possível que a atmosfera pode suportar a uma determinada temperatura (pressão de vapor), dado em porcentagem. É uma importante variável usada

na previsão do tempo e indica a possibilidade de precipitação, orvalho ou nevoeiro.

A uma determinada temperatura o ar pode conter uma quantidade limitada de vapor de água, até atingir o ponto de saturação. Passado esse limite, ocorre a condensação, processo pelo qual o vapor em excesso passa para o estado líquido, o que provoca um aumento da temperatura da superfície onde acontece a condensação⁵.

Pluviosidade: É a quantidade de água precipitada (chuva) em uma região por um período de tempo. Essa precipitação é variável, sendo produzida pelos sistemas atmosféricos atuantes na região. O índice de pluviosidade é medido em milímetros (mm), sendo que 1 mm de chuva equivale a 1 litro de água derramada em uma superfície de 1 metro quadrado.

Velocidade e direção do vento: O vento é o ar em movimento resultante da variação barométrica (pressão do ar) causada pela diferença de absorção e incidência de radiação solar nos diferentes pontos da superfície terrestre. Ele é medido pelo anemômetro e sua direção é indicada por uma biruta ou um cata vento. A superfície da Terra absorve a energia solar, aquece o ar próximo a sua superfície, e esse pode ser transportado para as regiões mais altas da atmosfera pelo movimento vertical do ar (convecção) ou para regiões adjacentes através do deslocamento horizontal. Por isso, quando se estuda o vento em meteorologia costuma-se dividi-lo em suas componentes horizontais (nas direções leste/oeste e norte/sul), e vertical (movimento ascendente e descendente). Embora a componente horizontal do vento tenha maior intensidade de movimentação, a componente vertical é importante no transporte de calor e umidade para os níveis mais altos formando nuvens e precipitações.

CONFORTO TÉRMICO: O CLIMA E OS PROCESSOS FISIOLÓGICOS

A temperatura e umidade relativa do ar e a movimentação do ar influenciam na sensação térmica pelo homem. O conforto térmico é um dos aspectos mais importantes para manutenção do bem-estar do ser humano. Nesse sentido, fica evidente a importância do conhecimento das condições climáticas para os estudos de conforto, tanto nas atividades realizadas no ambiente externo quanto no ambiente construído, pois pode inferir em padrões de planejamento de atividades ao ar livre, de ocupação territorial, na concepção de projetos arquitetônicos, e até mesmo auxiliar em processos de tomada de decisão em diversos aspectos ambientais³.

Condições climáticas consideradas satisfatórias segundo os parâmetros bioclimáticos de conforto ambiental podem ser difíceis de serem atingidas. No entanto é possível conceber espaços mais coerentes às necessidades físicas e psicológicas pressupostas pelas zonas de conforto⁶. O conforto térmico é definido como: "um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente que rodeia a pessoa", no qual condições fisiológicas e psicológicas estão implicadas neste conceito, que dependem individualmente de cada pessoa⁷. O ponto de partida para o conhecimento de conforto térmico é a definição dos modelos de conforto térmico, os quais formam o esqueleto teórico das variáveis desse conceito. Para quantificar o comportamento humano frente ao ambiente são definidos índices que expressam essa relação causa/efeito com a utilização de valores numéricos representativos do fenômeno por meio de índices⁸.

Esses índices são agrupados em três classes: aqueles que medem o desgaste físico, ou seja, o esforço que o indivíduo utiliza em determinadas condições de trabalho, denominados Índices Termométricos ou Fisiológicos; aqueles que tentam prever sobre quais condições de elementos de clima pode uma pessoa sentir-se confortável, sendo denominados Índices Subjetivos; e, por último, aqueles baseados em dados fisiológicos medidos, denominados Índices Psicossomáticos. Com base nesses índices são estabelecidas as denominadas zonas de conforto térmico, representadas graficamente através de cartas e diagramas que delimitam os parâmetros e definem o domínio no qual se estabelecem essas zonas de conforto térmico. As condições que devem ser cumpridas para manter o conforto térmico nos seres humanos são principalmente duas. A primeira é que a combinação instantânea da temperatura da pele e a temperatura no centro do corpo forneça uma sensação de neutralidade térmica. A segunda é o balanço de energia do corpo, ou seja, o calor gerado pelo metabolismo deve ser igual a quantidade de calor perdida pelo corpo. Assim, a relação entre esses parâmetros, temperatura da pele, temperatura do centro do corpo e atividade, tem como resultado uma sensação termicamente neutra⁹.

A manutenção da temperatura interna do organismo humano relativamente constante, característica denominada homeotermia, depende de um balanço entre a taxa de produção de calor (termogênese) e a taxa de perda de calor (termólise) para o ambiente. Em condição fisiológica típica, ocorre o equilíbrio entre termogênese e termólise, de modo que a temperatura corporal permanece dentro da faixa de normalidade¹⁰.

TERMORREGULAÇÃO

É um processo fisiológico responsável pela manutenção da temperatura interna do corpo em um valor constante próximo dos 36,5°C, sendo o meio natural de controle das trocas de calor do organismo com o ambiente. Em situações nas quais as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente acontecem sem esforço, o indivíduo sente conforto térmico. Porém, a sensação de frio ou de calor se deve ao fato do corpo estar perdendo ou ganhando calor de acordo com a situação climática imposta pelo ambiente, o que perturba a homeotermia¹¹.

A termorregulação, apesar de ser um processo natural para o controle da temperatura, requisita esforços metabólicos diferentes pelo organismo de acordo com as necessidades de perda ou de ganho de calor. Em uma situação de perda de calor será requisitado um esforço metabólico adicional pelo organismo maior do que em uma situação de ganho de calor¹².

O organismo perde calor para o ambiente sob duas formas distintas: o calor sensível e o calor latente. O calor sensível é perdido para o ambiente por meio das trocas secas como condução, convecção e radiação, e ocorre em função das diferenças de temperatura entre o corpo e o ambiente. Já o calor latente é perdido para o ambiente através das trocas úmidas (transpiração), envolvendo mudança do estado físico da água.

A umidade e a velocidade do ar intervêm na perda de calor por evaporação. Como aproximadamente 25% da energia térmica gerada pelo organismo humano é eliminada em forma de calor latente (10% da respiração e 15% por transpiração) é importante que as condições ambientais favoreçam as perdas. À medida em que a temperatura do ambiente aumenta e dificulta a perda de calor por convecção e radiação, o organismo aumenta sua eliminação por evaporação. Quanto maior é a umidade relativa do ar, menor é a eficiência de evaporação para eliminação de calor, sendo necessária uma melhor ventilação⁵. Quando o ar se encontra saturado de umidade a evaporação cessa, pelo que a pessoa começa a ganhar mais calor sempre que a temperatura do ar seja superior à temperatura da pele. Se o ar está seco, as perdas continuam inclusive com temperaturas mais elevadas. A Figura 3 ilustra os processos de ganho e perda de calor pelo corpo.



Figura 3 Processos de troca de calor entre o corpo e o ambiente. *Fonte:* Elaborado por Rafael Perussi (2017).

TERMOGÊNESE

A produção de calor no corpo humano denomina-se termogênese. Normalmente a termogênese é regular e contínua, sendo um fenômeno essencialmente químico, em que as transformações metabólicas resultam em produção de calor. A energia térmica produzida pelo organismo humano advém de reações químicas internas, sendo a mais importante a combinação do carbono, introduzido no organismo sob a forma de alimentos, com o oxigênio, extraído do ar pela respiração. Denomina-se metabolismo esse processo de produção de energia interna a partir de elementos combustíveis orgânicos. A produção total de calor metabólico pode ser dividida em metabolismo basal, ou seja, a produção de calor devido aos processos vegetativos e automáticos que são contínuos, e o metabolismo muscular, ou seja, a produção de calor pelos músculos devido à realização de trabalho controlado de maneira consciente^{10,11}.

TERMÓLISE

A termólise, diferentemente da termogênese, é um fenômeno essencialmente físico e seria a perda de calor pelo corpo humano para o ambiente.

Constituem-se mecanismos termolíticos: a condução, a convecção, a radiação e a evapotranspiração¹³.

MECANISMOS DE CONTROLE

Quando o organismo se encontra em situações de desconforto ou de estresse térmico, são ativados, inconscientemente, os mecanismos de controle, com vistas a desencadear determinadas respostas fisiológicas que auxiliam na manutenção da homeotermia.

O sistema de regulação da temperatura corporal é de natureza nervosa e seu centro regulador se localiza no hipotálamo¹⁰. A termogênese e a termólise são também controladas pelo sistema endócrino. Mas é através da pele, principal órgão termorregulador do organismo humano, que são realizadas as trocas de calor.

A temperatura da pele é regulada pelo fluxo de sangue que percorre o sistema. Conforme o estado térmico do indivíduo, os vasos sanguíneos periféricos são dilatados ou contraídos, determinando a quantidade de calor a ser perdida. Quando os vasos sanguíneos são dilatados, mais sangue flui do centro do corpo para as camadas mais externas deste, aumentando a temperatura da pele, o que resulta em maior perda de calor pelo corpo, uma vez que o gradiente de temperatura entre a superfície do corpo e o ambiente é aumentado. Nos casos em que a temperatura ambiente é mais alta que a temperatura da superfície corporal, o ganho de calor do corpo é reduzido pela vasodilatação.

A vasoconstrição, ou seja, a contração dos vasos capilares mais próximos à pele enquanto os do centro do corpo se dilatam, conduz aos efeitos opostos, armazenando energia para o corpo. O fluxo de sangue do centro para a periferia do corpo é controlado pela temperatura da pele e pela temperatura do centro do corpo. Temperaturas altas no centro do corpo induzem o fluxo circulatório de sangue enquanto baixas temperaturas da pele, o inibem¹⁴.

EQUAÇÃO DO BALANÇO TERMOFISIOLÓGICO

O balanço termofisiológico do corpo humano objetiva a manutenção do equilíbrio entre a termogênese e a termólise com vistas à manutenção da temperatura interna do corpo em nível aproximadamente constante: o calor é produzido continuamente como resultado da atividade metabólica e deve ser dissipado e regulado para evitar mudanças na temperatura corpórea.

O cálculo do balanço de energia é uma aplicação da primeira lei da termodinâmica e descreve as trocas de calor realizadas entre o corpo humano

e o ambiente térmico. Nessa equação, todos os parâmetros meteorológicos relevantes, as características comportamentais (atividade física e vestimenta) e as medidas corporais são considerados. O balanço termofisiológico do corpo humano pode ser representado, segundo a Equação 2.

$$M+W+R+C+LE+ERe+ESw+S=0 \quad (2)$$

em que:

M é a taxa metabólica;

W é a atividade física;

R é o "saldo" devido às trocas por radiação;

C é o fluxo de calor convectivo;

LE é o fluxo de calor latente para evaporação da água em vapor de água difuso através da pele (transpiração imperceptível);

ERe é a soma dos fluxos de calor para aquecimento e umidificação do ar inspirado;

ESw é o fluxo de calor devido à evaporação do suor, e

S é o fluxo de calor a ser armazenado para aquecimento ou resfriamento da massa corporal.

É importante salientar que os termos individuais têm sinal positivo se eles resultam em ganho de energia para o corpo e sinal negativo no caso de perda de energia. M é sempre positivo, W , LE e ESw são sempre negativos. Os fluxos de calor individuais dessa equação são afetados diretamente pelos seguintes parâmetros meteorológicos:

- ◆ Temperatura do ar: C , ERe
- ◆ Umidade do ar: LE , ERe , ESw
- ◆ Velocidade do ar: C , ESw , LE
- ◆ Temperatura radiante média: R

O AMBIENTE CONSTRUÍDO: O COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

Se em um ambiente externo estamos expostos às variações do clima, no ambiente construído é possível controlar essas variações por meio das suas envolventes, como as paredes e cobertura, estando sujeitas às perdas e aos ganhos térmicos através de seus fechamentos.

As edificações são construídas principalmente para promover segurança e proporcionar um ambiente mais adequado às atividades humanas e podem ser consideradas a melhor forma de termorregulação, ou seja, a função dessas construções é proteger os indivíduos das intempéries às quais estão sujeitos, mantendo em seu interior uma proteção contra os rigores do clima. Neste sentido, o principal requisito das edificações é promover o menor estresse térmico aos usuários¹⁵.

TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os processos de transferência de calor podem ocorrer por condução, convecção e por radiação, com ou sem transferência de calor latente. O fluxo de calor sempre ocorre de uma região de maior temperatura para uma região de baixa temperatura e atua no sentido de equalizar as diferenças entre as duas regiões¹⁶.

A condução consiste na transferência de calor de uma zona onde a temperatura é mais elevada para uma zona que apresenta uma temperatura mais baixa. A lei empírica da condução de calor é denominada por *Lei de Fourier* e estabelece que a taxa de calor por condução é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de temperatura na mesma direção, de acordo com a Equação 3, em Watt.

$$Q_x = -k A \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

sendo Q_x a quantidade de calor transmitida por condução num tempo “ t ” através de uma espessura L em uma direção normal à superfície de área A devido à diferença de temperatura ΔT . A condutividade térmica k é uma propriedade do material que é primariamente dependente da fase do meio, temperatura, densidade e ligação molecular¹⁷. A taxa desse tipo de transferência de calor depende da condutividade térmica do próprio material. Como verificado pela *Lei de Fourier*, quanto maior a condutividade térmica, maior a taxa de transferência de calor através do material.

A convecção é outro processo de transferência de calor que acontece entre um fluido e um sólido a diferentes temperaturas quando o escoamento do fluido se faz em contato com a superfície do sólido. O fluxo de calor entre uma superfície quente e um fluido frio, que se movimenta sobre essa mesma superfície, é dado pela Equação 4, em Watt.

$$q = h (T_w - T_f) \quad (4)$$

sendo o coeficiente de transferência de calor em $W m^{-2} °C^{-1}$, q o fluxo de calor do fluido, e T_w e T_f as temperaturas da superfície e do fluido respectivamente¹⁸.

Além dos processos de condução e convecção, ocorre, ainda, o processo de troca de calor por radiação, processo pelo qual o calor é transferido de um corpo em alta temperatura para um corpo em baixa temperatura, quando os mesmos estão separados no espaço, ainda que exista vácuo entre eles. Geralmente, esse conceito é aplicado a todos os tipos de processos que transmitem energia por meio de ondas eletromagnéticas²². A radiação é emitida quando se forma no interior de um corpo e pode ser absorvida por outro corpo na forma de energia eletromagnética. A energia radiante E_b que um corpo emite é calculada pela *Lei de Stefan-Boltzman*, dada pela Equação 5.

$$E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

em que T representa a temperatura absoluta em Kelvin, σ a constante de Stefan-Boltzman ($= 5,6697 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) e ε a emissividade, cujos valores estão compreendidos entre 0 e 1¹⁸.

CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica é uma característica específica dos materiais de conduzir energia térmica. Estruturas feitas com materiais de alta condutividade térmica conduzem energia térmica de forma mais rápida e eficiente que estruturas análogas feitas de materiais com baixa condutividade térmica. Materiais com alta condutividade térmica são utilizados em dissipadores térmicos e materiais de baixa condutividade térmica são utilizados em objetos que visam a prover isolamentos térmicos. A condutividade térmica depende fortemente tanto da pureza do material quanto da própria temperatura na qual esse se encontra (especialmente em baixas temperaturas). Em geral, a condução de energia térmica nos materiais, aumenta à medida que a temperatura aumenta^{19,20}. A condutividade térmica é expressa no coeficiente de condutividade térmica, medido em $W m^{-2} K^{-1}$.

INÉRCIA TÉRMICA

A inércia térmica pode ser definida como uma característica de um corpo que lhe permite resistir à mudança de estado e, conseqüentemente, às alterações de temperatura²¹. Aplicado a um edifício, a inércia térmica é a capacidade de amortecer os extremos de temperatura interiores e exteriores, diminuindo

as variações de temperatura interior. Esse fator está diretamente dependente da massa térmica dos materiais, ou seja, a sua capacidade de acumulação de calor. Quanto maior a massa térmica de um material, maior a sua capacidade de acumulação de calor o que lhe permite resistir mais facilmente às variações de temperatura.

Pela inércia térmica, o calor externo ganho durante o dia é armazenado na massa dos elementos que compõem a envoltória da edificação e somente parte desse calor é transmitido para o interior dos ambientes. É possível avaliar a inércia térmica decompondo-a em dois fenômenos distintos, o atraso térmico e o amortecimento térmico, que se relacionam diretamente com as características térmicas do material e sua espessura²².

Dado que as temperaturas e a radiação solar seguem padrões diários cíclicos dependendo da latitude, as condições térmicas de um edifício sem climatização seguem esses mesmos padrões, dependendo é claro, dos materiais que o constituem. As diferentes constituições de materiais vão modificar sobretudo as variações da amplitude entre as temperaturas máximas e mínimas²³. Na prática, a partir da análise desse fator, pode-se definir o atraso térmico como sendo a diferença de tempo, em horas, decorrido desde o extremo de temperatura registado no exterior e a manifestação desse extremo no interior do edifício. O amortecimento térmico é definido então como sendo a razão entre a amplitude térmica externa e a amplitude térmica interna e caracteriza um edifício em relação à sua capacidade de diminuição das amplitudes térmicas no seu interior²⁴.

Nem sempre a inércia térmica tem suas vantagens, pois em lugares de clima quente e úmido dificulta a retirada do calor interno, prejudicando o resfriamento da construção¹¹. Assim, quando a temperatura do ar externo no período noturno está agradável, a envolvente começa a transmitir o calor armazenado durante o dia. Portanto, o uso de elementos construtivos com considerável inércia térmica se faz pertinente em regiões com grandes amplitudes da temperatura do ar externo nas estações quentes. Com a utilização de materiais com inércia térmica ou capacidade isolante pode-se obter o equilíbrio térmico das temperaturas no interior das edificações. O principal critério para conseguir esse equilíbrio térmico é ter um fluxo mínimo no ganho de calor interno pelas envolventes, no verão, e uma perda mínima de calor, também pelas envolventes, no inverno²⁵.

EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Outros dois processos que influenciam as trocas de calor são a evaporação e a evapotranspiração. A evaporação diz respeito à mudança de fase da água, de líquido para gasoso, necessitando para isso de energia, que é retirada sob a forma de calor. A evapotranspiração alia o processo de evaporação da água na superfície da vegetação e no solo com o processo de transpiração, no qual a água captada pelas raízes das plantas é utilizada em suas funções metabólicas e sai do vegetal para a atmosfera através dos estômatos, órgãos presentes nas folhas das plantas, responsáveis pelas suas trocas gasosas²⁴.

UTILIZAÇÃO DA VEGETAÇÃO PARA A MELHORA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

A radiação solar é o fator que mais influencia nos processos de trocas térmicas, devido à sua forte incidência direta nas superfícies dos fechamentos, que também recebem radiações provenientes do entorno. As edificações construídas com materiais de construção convencionais e expostas à radiação solar absorvem o calor, que, avançando pelo interior das fachadas e telhados, eleva a temperatura interna. Conseqüentemente, surge a necessidade de ativar o ar condicionado para conseguir uma temperatura interior confortável e poder realizar as atividades cotidianas, produzindo, assim, um aumento do consumo de energia^{26,27}.

O processo lógico da construção moderna é trabalhar com as forças da natureza e não contra elas, no intuito de se aproveitar suas potencialidades para concepção de ambientes mais adequados ao conforto humano²⁵, levando também em consideração os fatores condicionantes do clima, como topografia, localização geográfica, cobertura vegetal, entre outros, que podem influenciar na orientação da implantação do projeto, na volumetria da edificação e na seleção dos materiais utilizados na construção, visando à concepção do melhor ambiente aos usuários.

O uso de vegetação é uma técnica que tem sido utilizada por séculos em todo o mundo com o fim de melhorar o conforto térmico dos edifícios. Essa é uma das razões pela qual a técnica está sendo aceita com grande interesse na atualidade, além dos benefícios ambientais que oferece, melhora o conforto térmico interno e a eficiência energética dos edifícios²⁸.

A incorporação vegetação tanto em fachadas quanto em coberturas produz imediatamente sobre o edifício uma zona de sombra capaz de reduzir de 50% a 70% na energia necessária para climatizar ambientes internos, já que por suas

características são capazes de reduzir a temperatura exterior da fachada em 5,5°C devido à incidência da radiação solar não ser direta. Consequentemente, pode-se afirmar que a implantação de jardins verticais nas cidades, qualquer modalidade, produz uma notável melhoria do conforto térmico²⁹.

Vários autores indicam que o uso de vegetação nas envolturas dos edifícios afeta principalmente quatro aspectos, obstruindo e absorvendo parte da radiação solar incidente sobre elas (sombreamento), promovendo refrigeração por evapotranspiração e, por fim, atuando como isolante térmico^{30,31,15,32}. Assim, a vegetação reduz a transferência de calor pela envoltura do edifício, o que consequentemente reduz a demanda de energia para refrigeração dos ambientes^{33,34}. Em um trabalho realizado com o uso de vegetação em coberturas, foi verificada uma redução do consumo de energia de aproximadamente 23% no uso de equipamentos de ar condicionado e 20% em ventiladores, o que resulta em uma redução anual de 8% na fatura elétrica³⁵.

Além do controle da temperatura interna e da melhoria da eficiência energética nas edificações, a utilização das coberturas e fachadas verdes externamente proporcionam outros benefícios, como o aumento da vida útil da impermeabilização da cobertura, retenção das águas pluviais, proteção acústica, redução das ilhas de calor, contribuição à biodiversidade, além de benefícios estéticos e sociais. Internamente, as paredes verdes também proporcionam o aumento da umidade do ar ambiente e a retenção de poeira e gases^{24,36,37,29,38}.

SISTEMAS VEGETAIS VERTICAIS

Existe uma grande variedade de trabalhos sobre coberturas verdes³⁹ e alguns, embora não muitos, de sistemas vegetais verticais, como as fachadas verdes. Porém, em um período de busca de aproximadamente oito anos, não foi encontrado nenhum que contenha uma combinação de ambos. A maioria dos trabalhos sobre o uso de vegetação em fachadas realizados contemplam unicamente problemas de desenho e não existem medições meteorológicas suficientes que permitam verificar a eficiência dos sistemas verticais adotados⁴¹.

Existem várias nomenclaturas para referir-se aos diferentes sistemas vegetais verticais propostos por vários autores, como jardins verticais, denominado pelo botânico francês Patrick Blanc, pioneiro nesse tipo de instalação, sistemas verdes verticais²⁷ ou ainda sistemas de plantação vertical, cujas siglas em inglês são *Vertical Greenery System* (VGS)³². Outro conceito atual que surge

com o uso de vegetação na arquitetura é o de Biofachada (*Biowall*), em trabalhos em paredes internas com a finalidade de melhorar a qualidade do ambiente interior⁴¹.

A vegetação apropriada para esse tipo de aplicação depende das condições climáticas, das características do edifício e das condições do entorno no que se encontra a parede verde. As plantas trepadeiras são consideradas uma solução econômica. Essas espécies possuem dois tipos principais de folhas, perenes ou caducas. As plantas de folha perene mantêm suas folhas o ano todo e as de folhas caducas, perdem suas folhas durante o outono⁴². Portanto, uma fachada verde de planta de folha caduca não só implica uma forte mudança visual ao longo do ano, como também afetará no comportamento térmico do edifício no qual esteja instalada. Normalmente, são utilizadas plantas de folha caduca em lugares com invernos frios, dessa forma com a ausência de vegetação durante a dita estação, se permite a incidência direta do sol sobre a fachada o que implicará em um aumento da temperatura interna³⁴. A Figura 4 mostra os diferentes tipos de sistemas vegetais verticais existentes, distinguindo as fachadas verdes dos muros vivos.

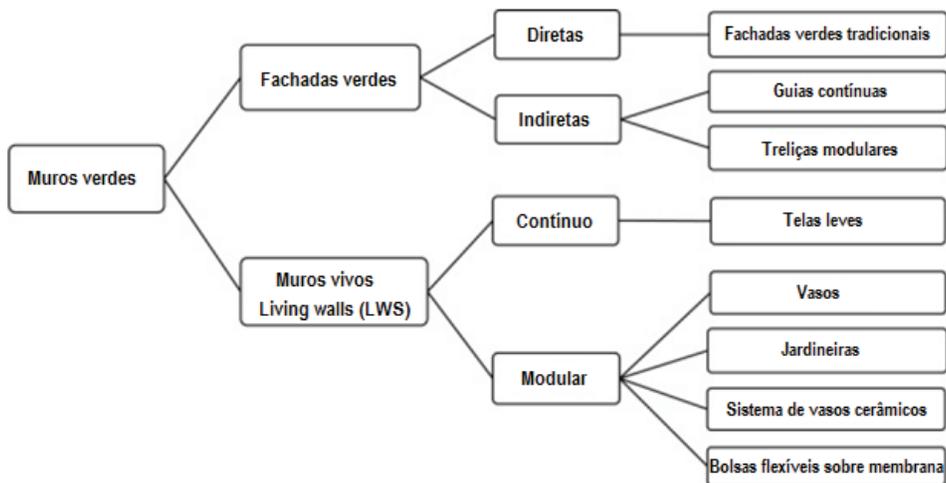


Figura 4 Classificação das fachadas verdes. Fonte: Gallardo (2017)⁴³, adaptado de³⁹.

A diferença principal entre as fachadas e os muros verdes está no fato da primeira possuir plantas crescendo diretamente sobre a parede, enquanto, na segunda, são utilizadas tecnologias e materiais de suporte para essa técnica⁴⁴.

FACHADAS VERDES

As fachadas verdes baseiam-se na aplicação de plantas trepadeiras ou pendentes ao longo da parede. As plantas podem crescer para cima da superfície vertical, como por exemplo, as chamadas fachadas tradicionais, ou crescer para baixo da superfície vertical, caso estejam suspensas em uma altura determinada⁴⁵. As fachadas verdes são classificadas como diretas ou indiretas. Nas primeiras, as plantas estão conectadas diretamente à parede enquanto nas segundas inclui uma estrutura suporte para a vegetação, conforme mostrado na Figura 5A e 5B. As fachadas verdes tradicionais consideram-se como um sistema direto estando as plantas enraizadas diretamente no solo⁴⁶.



Figura 5 (A) Fachada verde direta, casa privada, e (B) fachada verde indireta. *Fonte:* (A) Manso e Castro-Gomes (2015)³⁹, (B) Gallardo (2017)⁴³.

MUROS VIVOS

Os muros vivos são sistemas vegetais que permitem a integração de plantas em edifícios altos e grandes superfícies, mediante o crescimento uniforme ao longo de toda a superfície vertical. Esses sistemas atingem as zonas mais altas que os anteriores e podem ser adaptados a todo tipo de edifícios, além de permitirem a integração de uma ampla variedade de espécies. Os sistemas de muros vivos (LWS, do inglês *Living Wall Systems*) se classificam dependendo do método de aplicação, em contínuo ou modulares. Os LWS

contínuos se baseiam na aplicação de leves telas nas quais as plantas se inserem individualmente, enquanto nas modulares se usam recipientes de dimensões específicas onde é colocado o substrato necessário para que as plantas possam crescer. Cada recipiente é suportado por uma estrutura complementar ou fixado diretamente na superfície vertical⁴⁷.

Os muros vivos contínuos também são conhecidos como jardins verticais, nome dado pelo botânico francês Patrick Blanc, que construiu o primeiro jardim vertical, também conhecido como "Muro Vegetal" em 1994. Patrick Blanc difundiu a aplicação desse tipo de sistema por todo o mundo. Sua obra está presente em vários edifícios dos arquitetos mais famosos (Figura 6).



Figura 6 Sistema de muro vivo contínuo, Caixa Forum, Madrid, Construído em junho de 2013 por Patrick Blanc. *Fonte:* Gallardo (2017)⁴³.

Existem diferentes tipos de muros vivos modulares, como por exemplo, vasos ou jardineiras. Os vasos são normalmente recipientes rígidos, acoplados entre si capazes de conter as plantas e o peso do substrato, ao contrário das jardineiras que são uma adaptação das anteriores com a peculiaridade que são fixadas a uma estrutura vertical.

Outro exemplo são os vasos de cerâmica que se caracterizam por elementos modulares de revestimento exterior ou interior dos edifícios. Especificamente, mais que uma capa de vegetação, esses vasos são revestimentos modulares com inserções para as plantas. Por último, estão os sacos flexíveis sobre membranas, construídas com materiais leves que permitem o cultivo da vegetação dentro dos mesmos³⁹.

COBERTURAS VERDES

A história das coberturas verdes remonta a milhares de anos e através de diferentes culturas, revelando que os propósitos da utilização desse tipo de cobertura eram diversos, devido a sua qualidade de isolamento térmico e como elemento atenuante do estresse urbano, trazendo elementos da natureza para o ambiente construído.

Os relatos mais antigos sobre a utilização de vegetação em telhados indicam que entre os anos 605 e 562 a.C., na antiga Mesopotâmia, os babilônios haviam construído jardins sobre zigurates e palácios. Conhecidas como Jardins Suspensos da Babilônia (Figura 7), essas estruturas teriam sido construídas pelo Rei Nabucodonosor II para consolar Amytis, uma de suas esposas, que sentia falta da natureza e das montanhas da região onde havia crescido. Eram compostas de diversas árvores plantadas em terraços planos suspensos por colunas de pedra e abastecidos por aquedutos⁴⁸.

Nos países nórdicos, as coberturas verdes eram utilizadas para a proteção contra o frio intenso da região devido à sua propriedade de isolamento térmico. Chamadas de *turf house* (Figura 8), essas construções eram encontradas na Dinamarca, Finlândia, Islândia, Noruega e Suécia, Ilhas Faroé e Groenlândia, cujas técnicas foram difundidas para outras regiões pelos colonizadores Vikings. Eram constituídas por estruturas de madeira e pedras revestidos externamente por camadas de cortiça, material bastante resistente e impermeável quando seca, e então recobertos por blocos de turfa, um solo rico em matéria orgânica retirado dos bosques da região e recebendo por fim uma camada de gramíneas⁵⁰.



Figura 7 Ilustração representativa dos Jardins Suspensos da Babilônia. Fonte: Dinsdale; Pearen e Wilson (2006)⁴⁹.



Figura 8 Uma *turf house* tradicional da Islândia. Fonte: Hurstwick (2016)⁵⁰.

Charles-Edouard Jeanneret-Gris, o Le Corbusier, conceituado arquiteto franco-suíço do século XX, formulou em 1927 os "Cinco Pontos para uma Nova Arquitetura", conceitos que se adequavam às novas possibilidades tecnológicas recém-surgidas, especialmente a impermeabilização e as estruturas em concreto armado, nos quais se incluem:

- ◆ Pilotis, liberando o edifício do solo e tornando público o uso desse espaço antes ocupado, permitindo inclusive a circulação de automóveis;
- ◆ Terraço-jardim, transformando as coberturas em terraços habitáveis, em contraposição aos telhados inclinados das construções tradicionais;
- ◆ Planta livre, resultado direto da independência entre estruturas e vedações, possibilitando maior diversidade dos espaços internos, bem como mais flexibilidade na sua articulação;
- ◆ Fachada livre, também permitida pela separação entre estrutura e vedação, possibilitando a máxima abertura das paredes externas em vidro, em contraposição às maciças alvenarias que então recebiam todos os esforços estruturais dos edifícios; e
- ◆ Janela em fita, também consequência da independência entre estrutura e vedações, se trata de aberturas longilíneas que cortam toda a extensão do edifício, permitindo iluminação mais uniforme e vistas panorâmicas do exterior.

Le Corbusier começou a utilizar os terraços-jardins de uma forma mais sistemática ao concretizar um largo número de projetos cujos telhados eram preenchidos por jardins acessíveis aos seus habitantes, somando, assim, uma componente mais funcional à componente estética valorizada anteriormente por Frank Lloyd Wright^{51,52}. Foram os desenhos desses arquitetos que constituíram uma das bases em termos de estrutura e design para o uso de coberturas ajardinadas.

Nas décadas de 60 e 70, verificou-se uma evolução significativa nas tecnologias ligadas à construção de coberturas verdes em vários países em especial na Suíça e Alemanha. Em 1975, com a criação da Sociedade Alemã de Pesquisa da Paisagem, Desenvolvimento e Construção, FLL, uma organização alemã ligada à paisagem e construção em conjunto com algumas universidades alemãs, iniciou-se o desenvolvimento da pesquisa ligada aos diferentes componentes dessas coberturas, nomeadamente de material anti-raiz, membranas impermeáveis, sistemas de drenagem de águas pluviais, substratos e vegetação. Foi a partir dessa data e através desses estudos que as coberturas começaram a ser vistas com rigor científico e como produto com potencial econômico^{53,54,21,29}.

Na Alemanha, o desenvolvimento do mercado para comercialização e construção de coberturas verdes expandiu-se rapidamente nos anos 80, calculando em média um crescimento anual de 15% a 20%. No ano de 1989, um milhão de m² em coberturas verdes já existiam no país. Em 1996, esse número passou para 10 milhões de m². Esse crescimento foi estimulado, em sua maior parte, pelas políticas públicas do estado e por programas de incentivos fiscais²⁹.

No Brasil, a prática construtiva de telhados verdes e terraços verdes começou a ser realizada pelo arquiteto e paisagista Roberto Burle Marx, no final da década de 30 do século passado, com os projetos desse gênero de terraços nas construções do Ministério da Educação e Cultura do Rio de Janeiro, Museu de Arte Moderna, na Associação Brasileira de Imprensa e em edifícios da Petrobras, ambos, também, no Rio de Janeiro^{45,55}.

COMPONENTES DO SISTEMA

As coberturas verdes são sistemas de coberturas que incorporam o uso da vegetação sobre as edificações. A denominação desse sistema construtivo, atualmente, varia em diversas regiões, sendo descrito como telhado verde^{45,56,57}, telhado vegetado⁵⁸ ou cobertura verde leve (CVL)⁵⁹. Uma cobertura verde é uma estrutura em camadas, que podem ser descritas em ordem de aplicação para melhor ilustração:

- a) Impermeabilização e proteção anti-raiz:** A camada de impermeabilização possui a função de impedir que a água e o vapor provenientes da cobertura verde não entre em contato com a estrutura que a suporta e é a camada mais importante e dispendiosa de uma cobertura verde. Há uma grande diversidade de membranas a prova d'água comercialmente disponíveis, variando entre as mantas poliméricas e os produtos líquidos de fácil aplicação. Comumente, são utilizadas membranas impermeabilizantes fabricadas de membranas termoplásticas de policloreto de vinila (PVC), de polietileno de alta densidade (PEAD), resinas sintéticas e betume modificado, conhecidas sob a forma de manta asfáltica de alumínio ou manta asfáltica de polietileno.
- b) Drenagem e filtro:** Manter a drenagem adequada em um telhado verde é extremamente importante para o êxito do sistema. Esse procedimento garante a proteção da membrana impermeável da cobertura, além de remover o excesso de água acumulada, evitando a saturação prolongada do solo, que pode causar doenças em plantas, apodrecimento e eventual morte do sistema radicular vegetal. A camada drenante cobre toda a

superfície da cobertura e pode se constituir de sistemas pré-fabricados, como mantas de baixo peso, que direcionam bem o fluxo da água das chuvas, além de já possuírem filtros de geotêxtil não-tecido em sua estrutura, que retêm as partículas menores evitando a colmatação nos drenos.

c) Substrato: Numa cobertura verde, a camada de substrato é a camada base para o desenvolvimento da vegetação. O tipo e a espessura do substrato determinam o desenvolvimento das plantas e o peso do sistema na estrutura. Para que o sistema radicular da vegetação se desenvolva em um volume limitado, é necessário ter em conta a sua capacidade de retenção de água, a sua relação ar-água e a quantidade e capacidade de retenção de nutrientes. Os principais critérios para a sua escolha são: tamanho, proporção de material orgânico, resistência de geada, estabilidade estrutural, resistência à erosão pelo vento, drenagem, capacidade de retenção de água, teor de nutrientes, arejamento e valor de pH. Uma mistura adequada deve ser escolhida com referência à localização, clima e espécies que serão plantadas. Para melhorar a retenção de água e a estrutura do substrato outros materiais podem ser acrescentados, como materiais orgânicos (turfa ou algum substituto, como fibra de coco e folhas compostadas) ou materiais inorgânicos (perlita ou vermiculita). O substrato é também um importante fator em sistemas de coberturas verdes em função de suas propriedades térmicas e o do seu consequente comportamento como trocador de energia térmica com a atmosfera.

d) Vegetação: As plantas devem ser preferencialmente nativas, adaptadas ao clima local, de crescimento rasteiro, perenes (que não perdem as folhas de acordo com a estação do ano), possuir maior área foliar, raízes curtas, demandem menor manutenção em termos de rega e poda e apresentem elevada capacidade de resistência a estresses climáticos. As espécies do gênero *Arachis* estão entre as plantas recomendadas para uso em coberturas verdes por⁶⁰, juntamente com outras 76 espécies de plantas com potencial para uso em telhados verdes em regiões tropicais, onde grande parte das plantas recomendadas foi selecionada através de experimentos controlados. O gênero *Arachis* é nativo do Brasil sendo considerada a serra do Amambá, entre o Mato Grosso do Sul e o Paraguai, o seu local de origem, sendo encontrada desde o planalto central brasileiro até a região Sudeste e litoral da Bahia. Desenvolve-se bem em áreas sujeitas ao alagamento, é tolerante à sombra, ao frio e à seca. Comumente denominada de amendoim forrageiro, a *Arachis pintoi* apresenta boa adaptação em áreas de alta precipitação, com solos de moderada

fertilidade e com restrições à seca e encharcamento demasiado e encontra-se difundida nas zonas tropicais e subtropicais do Brasil e do mundo^{61,62,63}. Outra planta que pode ser utilizada em coberturas verdes é a grama-batatais (*Paspalum notatum*), uma gramínea originária do continente americano e bem adaptada no Brasil. Possui grande capacidade de cobrir grandes áreas e capaz de adaptar-se a solos pouco férteis, stresse hídrico e ao pisoteio⁶⁴. Na América do Norte e Europa, plantas do gênero *Sedum* sp e outras plantas suculentas são as escolhas preferenciais para coberturas verdes extensivas. Possuem visual agradável, de rápido crescimento e em pouco tempo formam uma cobertura verde uniforme. Porém, as suculentas não aceitam pisoteio e também não possuem um bom desempenho térmico, devido ao seu metabolismo que possui taxas reduzidas de transpiração. A Figura 9 mostra a disposição das camadas que compõem uma cobertura verde.



Figura 9 Camadas da estrutura de uma cobertura verde. *Fonte:* Perussi (2016)⁶⁵, adaptado de Sedum (2016)⁶⁶.

TIPOS DE COBERTURAS VERDES

As coberturas verdes podem ser classificadas em dois tipos: extensivas e intensivas, relacionadas de forma comparativa no Quadro 1. Os fatores que as distinguem são sobretudo o custo que cada uma pode envolver na sua instalação e manutenção, o porte da vegetação e a espessura da camada de substrato.

Quadro 1 Descrição dos sistemas de cobertura verde extensivo e intensivo.

Coberturas verdes extensivas	Coberturas verdes intensivas
Espessura do substrato de 0,02 a 0,20 m.	Espessura do substrato acima de 0,20 m.
Peso entre 60 e 170 Kg/m ² .	Peso entre 150 e 500 Kg/m ² em até 0,40 cm de espessura
Menor custo de implantação.	Maior custo de implantação
Baixa manutenção.	Alta manutenção
Mais adequado a coberturas inclinadas.	Maior restrição em relação à inclinação da cobertura
Apropriado para ser instalado em coberturas já existentes.	Necessidade de uma base que suporte maior sobrepeso
Limitado a espécies vegetais de porte baixo.	Possibilidade de uso de espécies de maior porte
Acesso restrito à manutenção	Permite acesso irrestrito de pessoas

Fonte: Johnston e Newton (1996)⁶⁷.

Outro parâmetro relevante que caracteriza a escolha do tipo de cobertura (extensiva ou intensiva) de um projeto de telhado verde é a declividade adotada. As declividades comumente utilizadas estão no intervalo de 0° a 40° (0% a 84%), sendo classificadas como coberturas planas (0°), coberturas com pouca inclinação 3° (5%), coberturas com inclinação moderada 20° (36%) e coberturas muito inclinadas 40° (84%)³⁷. A instalação da cobertura verde pode ser feita através de sistemas modulares com bandejas pré-vegetadas que se encaixam para formar a cobertura (Figura 10), ou por um sistema laminar onde os componentes das camadas são instalados diretamente no local.

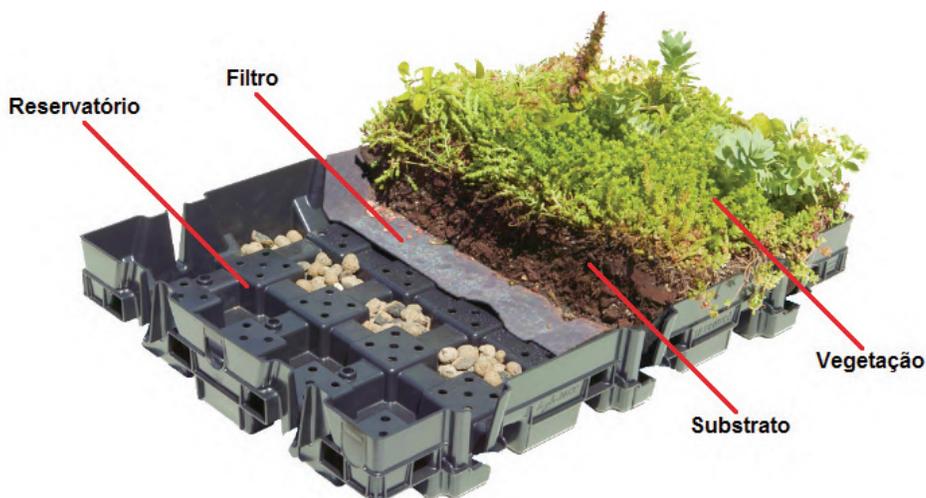


Figura 10 Sistema modular pré-vegetado. Fonte: Columbia (2016)⁶⁸.

Sistemas pré-vegetados possuem preços mais caros, porém são instalados com a vegetação já desenvolvida e em menor tempo em relação ao sistema laminar instalado no local, quando é necessário o transporte e instalação de todos os componentes do sistema e aguardar um período até a vegetação se desenvolver.

Todos os sistemas de fachadas e coberturas verdes requerem manutenção periódica da vegetação, como em um jardim convencional, incluindo a sua poda correta, o controle de plantas invasoras e adubação corretiva quando necessária, tomando-se os devidos cuidados para que os componentes construtivos não sejam danificados, como a impermeabilização, os elementos drenantes e os elementos de escora da vegetação das fachadas.

APLICAÇÕES EM CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO

A seguir são apresentados dois trabalhos experimentais utilizando envolventes vegetais: de análise do desempenho e conforto térmico de fachadas e coberturas verdes, do comportamento térmico de uma cobertura verde em plataformas de teste e também um trabalho sobre a aplicação dos índices de conforto no ambiente externo.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os trabalhos com envolventes vegetais foram conduzidos no Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais – CRHEA da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC-USP. O CRHEA está localizado às margens da Represa do Lobo no município de Itirapina-SP, região central do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 22°01'22"/22°10'13" S e 43°57'38"/47°53'57" O, com altitude de 733 m (Figuras 11 e 12).

O clima da região é quente com inverno seco do tipo Cwa de acordo com a classificação clássica de Köppen-Geiger⁶⁹. Sob a ótica dinâmica do clima, a região se caracteriza pela passagem de frentes frias ao longo de todo o ano. A região possui clima controlado por massas equatoriais e tropicais, caracterizando-se por climas tropicais alternadamente secos e úmidos. No período seco, entre os meses de abril e setembro, a frequência de chuva diminui consideravelmente e se constitui na área de inverno nitidamente mais seco do Estado de São Paulo, quando predominam sobre a região as massas de ar Tropical Continental (mTc), Tropical Atlântica (mTa) e Polar Atlântica (mPa), apresentando baixa precipitação, pouca nebulosidade, baixa umidade relativa e temperaturas médias menores que as dos períodos chuvosos⁷⁰.

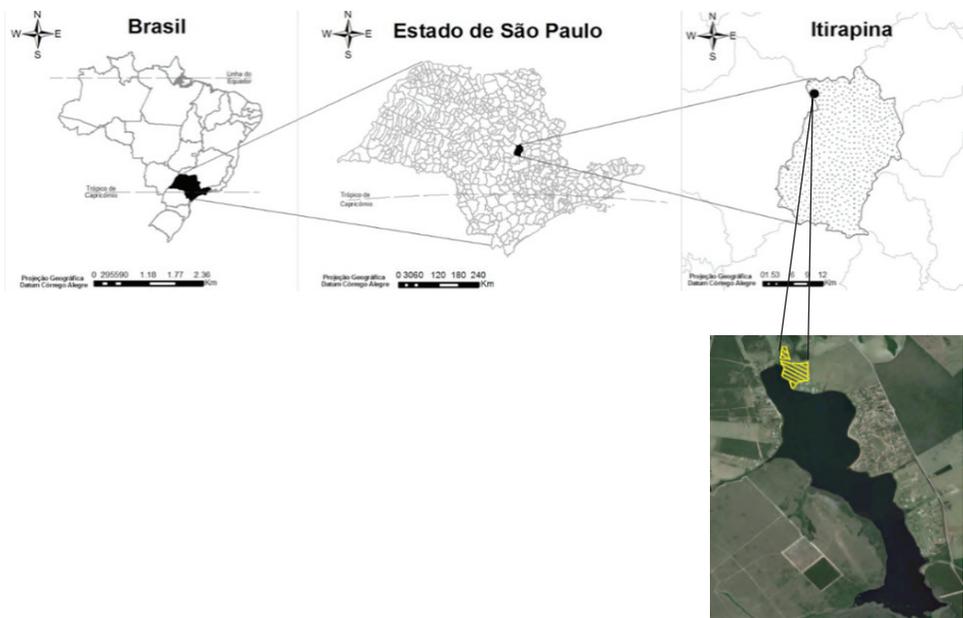


Figura 11 Localização espacial do Município de Itirapina e imagem de satélite indicando a localização do CRHEA. *Fonte:* Adaptado de IBGE e Google Earth (2016).



Figura 12 Estação climatológica e canteiro experimental do CRHEA. *Foto:* Eduardo Fraccaroli (2016)

A estação chuvosa ocorre nos meses de outubro a março, devido às incursões da massa Equatorial Continental (mEc) e ao dinamismo da Frente Polar Atlântica sobre a Tropical Atlântica, que responde em grande parte, pela gênese das chuvas que se produzem durante a atuação de sistemas frontais nesse período do ano^{70,71}.

Os baixos totais pluviométricos no período seco estão associados a atuação do ASAS (Alta Subtropical do Atlântico Sul), pois, nessa estação, tal sistema alcança sua posição mais a oeste do continente se estendendo até a Região Sudeste do Brasil. Eventos de chuva ocorrem quando os sistemas frontais e ciclones extratropicais conseguem se sobrepor ao ASAS⁷². No verão, a persistente precipitação nas Regiões Sudeste, sul do Nordeste, norte do Paraná e Brasil central está relacionada à Zona de Convergência, um fenômeno típico nesse período na América do Sul e se caracteriza por uma faixa de nebulosidade convectiva que, quando se configura, estende-se desde o Sul da Amazônia em direção ao Sudeste até o Oceano Atlântico Subtropical⁷³.

ANÁLISE DOS TIPOS DE TEMPO

Os dados das variáveis climáticas foram coletados pela estação meteorológica automática do CRHEA, composta por um conjunto de sensores específicos conectados a um *datalogger* CR1000 (Campbell Scientific Inc) programado para obter medições dos sensores a cada 30 segundos, com totalização a cada 30 minutos. Foram utilizados registros de radiação solar global por meio de um piranômetro, de temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar por meio de um termo-higrômetro, de pressão atmosférica por meio de um barômetro, de precipitação por meio de um pluviômetro e de velocidade e direção do vento por meio de um anemômetro e anemoscópio.

As análises do comportamento térmico, reações frente ao frio e ao calor, foram realizadas a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica, que permite visualizar fenômenos de caráter temporal mais exíguo, como a identificação do ritmo climático expresso pelo regime de chuvas, pelos períodos de elevada *secura* do ar, ou mesmo pela variação dos valores da pressão barométrica ao longo da penetração de frentes frias, acompanhadas pela alteração da velocidade e da direção predominantes dos ventos³. Assim, é possível analisar o regime climático na forma de episódios representativos, de acordo com a adaptação da definição de tipos de tempo^{74,75}, que apresenta duas etapas básicas: Pré-Frontal, com o início do processo, expressa pelo prenúncio e avanço de uma massa de ar Polar Atlântica, e a Pós-Frontal, etapa final desse processo, representada pelas das

fases de domínio e transição ou tropicalização da massa de ar polar. A partir do reconhecimento dos episódios climáticos registrados durante o período de coleta de dados, por meio das análises das variáveis meteorológicas e confirmação com as imagens de satélite, foram extraídos dois dias típicos experimentais, um para condições de calor, ou seja, máxima radiação solar, maior temperatura externa e céu limpo, e outro para condições de domínio da mPa, que apresentou o menor valor para radiação solar global e temperatura externa do ar, mas aumento da umidade relativa e nebulosidade, sem precipitação. As duas situações climáticas, representadas pelos dias típicos experimentais escolhidos, são primordiais para comparações de desempenho térmico e compreensão da influência da radiação solar sobre o ambiente construído.

Para a análise dos episódios representativos são considerados os dados meteorológicos tomados em superfície junto às propriedades das massas de ar que atuam sobre um determinado local, permitindo que seja determinada a fase mais apropriada à realização de experimentos quando da necessidade de uma análise climática voltada ao estudo do comportamento térmico de sistemas construtivos.

Para a identificação das massas de ar atuantes foram avaliados os dados das principais variáveis climáticas do período dos estudos por meio de gráficos, com confirmação da massa atuante no Estado de São Paulo identificada por meio das imagens do satélite GOES-13 (Geostationary Operational Environmental Satellite), onde as áreas brancas indicam a presença de nuvens, e também com auxílio de cartas sinóticas.

São utilizadas também como referência as Normais Climatológicas 1961 – 1990 computadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia⁷⁶, revisadas e ampliadas em 2009 e que abrange 414 estações meteorológicas de superfície em operação durante anos do período entre 01/01/1961 a 31/12/1990, cobrindo um conjunto de 26 parâmetros meteorológicos. A ABNT NBR 15575:2013⁷⁷ define dia típico experimental para calor aquele no qual foi registrada uma temperatura máxima maior do que as temperaturas máximas da série histórica para o período, assim como define dia típico experimental para frio aquele no qual foi registrada uma temperatura mínima menor do que as temperaturas mínimas da série histórica para o período. As séries históricas são uma base de dados medidos por estações que caracterizam o clima das cidades e são normatizadas Organização Meteorológica Mundial (OMM), calculadas em períodos de 30 em 30 anos a partir das médias mensais dos totais diários.

DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES COM ENVOLVENTES VEGETAIS

Este estudo sobre envoltivos vegetais na arquitetura tem como objetivo determinar se o uso de vegetação em construções com fachadas e coberturas vegetadas podem contribuir com a melhora do desempenho térmico de ambientes internos em clima tropical de altitude comparados com sistemas convencionais, determinando o quanto essas técnicas podem influenciar nas temperaturas internas, que oferece um melhor conforto térmico e proporciona uma maior eficiência energética em resposta ao calor ou ao frio.

A metodologia envolve a instalação de sensores de temperatura em quatro células experimentais de alvenaria, nas quais foram plantadas vegetação nas fachadas norte e oeste, assim como na cobertura, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 Tipos de células de teste utilizadas.

Células	Utilização da vegetação
Célula controle (CCC)	Sem vegetação
Célula 1 (CFV)	Fachadas verdes (Norte e Oeste)
Célula 2 (CCV)	Cobertura verde
Célula 3 (CFV+CV)	Fachada verde + Cobertura verde (Norte e Oeste)

Fonte: Gallardo (2017)⁴³.

CÉLULAS DE TESTE

As células de teste ou unidades experimentais são construções em alvenaria de tijolos cerâmicos maciços, com dimensões de 10 x 20 x 5 cm, sobre radier de concreto armado de 0,05 m, diferentes apenas no sistema de cobertura. As células possuem dimensões 2,00 x 2,50 x 2,81m e foram construídas com a mesma orientação de forma que recebem radiação solar igual e nenhuma faz sombra na outra. Possuem uma porta de madeira com dimensões 2,10 x 0,60m e uma janela na fachada Norte com 1,00 x 0,70m (Figura 13).

Para se obter as medições de temperatura, em cada célula de teste foram instalados termopares tipo T de cobre-constantan (um filamento de cobre e um filamento de liga de cobre com níquel) de junção fria, na qual os filamentos são mantidos em contato permitindo a condução do pulso elétrico sem o uso de nenhum tipo de solda (Figura 14). Foram dispostos 15 termopares nas superfícies, para se obter as temperaturas superficiais internas

(TSI), inseridos em pequenos orifícios nos tijolos e cobertos com pasta térmica para evitar influência do ambiente nos valores, e 1 termopar foi mantido no centro da célula de teste a uma altura de 1,20m do chão para se obter a temperatura de bulbo seco (TBS) do ar interno.



Figura 13 Células de teste utilizadas no estudo. *Fonte:* Gallardo (2017)⁴³.

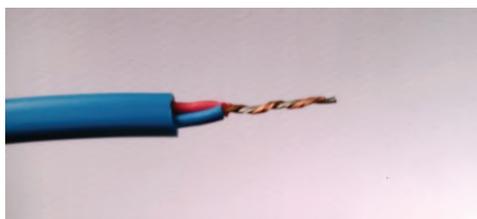


Figura 14 Termopar tipo T. *Fonte:* Perussi (2016)⁶⁵.

Os termopares foram conectados a um *datalogger* CR1000 através de um multiplexador AM416, ambos da Campbell Scientific Inc. A Figuras 15A, 15B e 15C mostram a distribuição dos termopares nas fachadas e no teto das células.

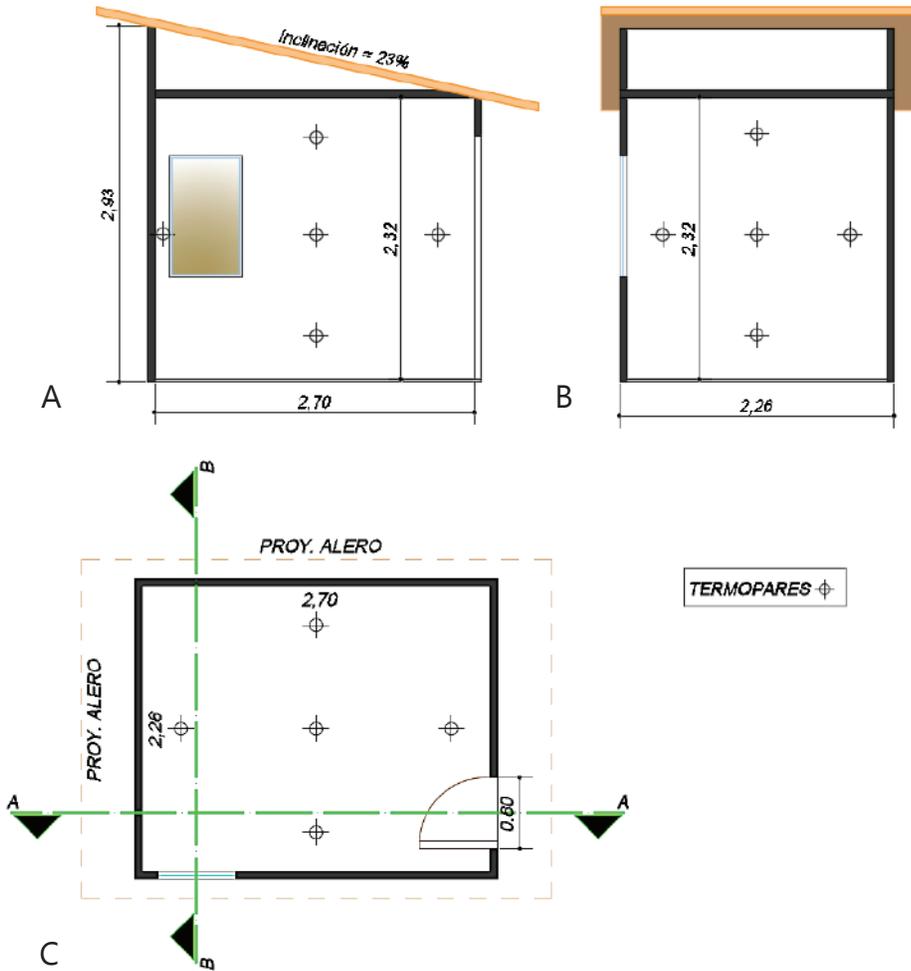


Figura 15 Distribuição dos termopares: (A) Fachadas Oeste, (B) Fachadas Norte e (C) Coberturas. Fonte: Gallardo (2017)⁴³.

Para a obtenção dos resultados, o trabalho foi baseado no registro e análise de dados adquiridos durante um ano, dentro do qual foram selecionados os três dias experimentais:

- ◆ Um dia típico experimental de frio (inverno) – 10/7/2015.
- ◆ Um dia típico experimental de calor (verão) – 24/9/2015.
- ◆ Foi selecionado também um dia típico experimental de calor para realização de teste com ventilação natural.

Para compor o sistema de fachada verde, foi utilizado o sistema sem contato direto com a fachada. Foi instalada uma tela de metal teste do chão até o teto do chão até o teto da célula de teste para servir de suporte à vegetação. Para compor o sistema foi escolhida a espécie *Thumbergia grandiflora* (Tumbérgia azul), pertencente à família das Acanthaceae (Figura 16). É uma planta volúvel, bem adaptada ao clima local e de baixa exigência de manutenção. Possui folhas verde escuras que favorecem um boa cobertura e floração azulada⁷⁸.



Figura 16 Crescimento da vegetação sobre a fachada e detalhe da floração da *Thumbergia grandiflora*. Fonte: Gallardo (2017)⁶.

As coberturas verdes foram instaladas sobre lajes pré-moldadas de cerâmica, as quais receberam uma camada de cimento e aplicação de resina impermeabilizante. A seguir, foi instalada uma manta de drenagem composto por geotêxtil estruturado, uma camada de solo retirado do próprio local do estudo e vegetação formada pela grama *Paspalum notatum* (grama-batatais).

CÁLCULO DOS LIMITES DE CONFORTO TÉRMICO

Os limites de conforto térmico foram estimados a partir do índice de conforto adaptativo sugerido pela ASHRAE, a qual estabelece uma metodologia para determinar os graus-hora de desconforto pelos usuários de uma edificação. Essa metodologia se baseia na hipótese de que as pessoas se adaptam ao seu ambiente. A norma estabelece uma zona de conforto aceitável a partir da ponderação das temperaturas externas dos dias anteriores ao período estudado. São calculados os limites de conforto superior e inferior para 80% ou 90% das pessoas satisfeitas⁷⁹.

A equação adotada neste trabalho corresponde ao índice de conforto para 80% das pessoas satisfeitas, conforme mostrado nas Equações 6 e 7.

$$\text{Limite superior 80\% satisfeitas} = 0,31 t_{(pma(out))} + 21,3 \quad (6)$$

$$\text{Limite inferior 80\% satisfeitas} = 0,31 t_{(pma(out))} + 14,3 \quad (7)$$

em que $t_{(pma(out))}$ corresponde às temperaturas diárias médias dos últimos 15 dias. Representada graficamente, a temperatura de conforto se localiza no meio da faixa. A equação foi aplicada aos dias típicos experimentais, considerando os 15 dias anteriores a eles.

Foram calculados, também, os limites de desconforto⁷⁹. Para quantificar os graus-hora de desconforto são comparadas as temperaturas-limite (superior e inferior) e a temperatura operativa (TBS) para cada hora. Os graus-hora de desconforto são gerados quando a temperatura operativa interna das células de teste ultrapassa os limites estabelecidos pela Norma, sendo números positivos para calor e números negativos para frio (Figura 17).

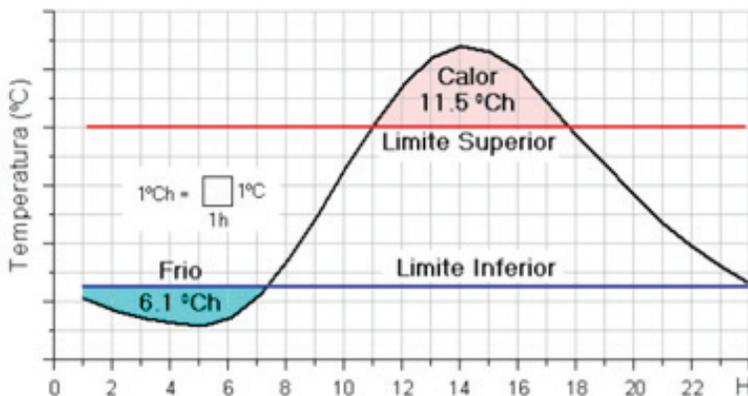


Figura 17 Grau-hora de desconforto. Fonte: Roriz et al. (2015)⁸⁰.

ANÁLISE DO PERÍODO ESTUDADO

Para comprovar a hipótese de que o uso de fachadas verdes e coberturas verdes em construções pode contribuir para a melhora do desempenho térmico nas construções, favorecendo as condições térmicas internas em períodos de maior ou menor temperatura externa, foram selecionados dois dias críticos experimentais, sendo um dia crítico de frio e um de calor.

DIA CRÍTICO EXPERIMENTAL DE FRIO

Para realizar o estudo da reação perante o frio, foi considerado o episódio climático de 7 a 12 de julho de 2015, dias em que a região noroeste do Estado de São Paulo esteve sob domínio de uma massa de ar polar. Analisando as condições climáticas do período, foi selecionado o dia 10/7/2015 como o dia crítico experimental de frio, tendo sido registrado como forma de excepcionalidade climática um valor de radiação de 614 W/m^2 e uma temperatura horária mínima de $8,8^\circ\text{C}$, temperatura menor do que as mínimas absolutas da série histórica para o período, que foi de $12,1^\circ\text{C}$. A Figura 18 mostra as principais variáveis climáticas e a imagem de satélite, em que se observa a chegada de uma frente fria a partir do dia 7 de julho, com alta concentração de umidade, precipitação e temperaturas variando entre 12°C e 18°C , aproximadamente.

O dia excepcional de frio ocorreu em 10 de julho, com a chegada de uma frente fria vinda de latitudes mais altas da América do Sul até o Estado de São Paulo, estabelecendo um dos episódios de frio mais intensos do período analisado. Sob o domínio de uma massa fria, a temperatura mínima atingiu $8,8^\circ\text{C}$. Durante o transcurso desse dia, a temperatura máxima chegou a 26°C , com ausência de nebulosidade e registros de elevada radiação solar. Nos dias 11 e 12 do mesmo mês, condicionados pela instabilidade atmosférica, a região registrou precipitações e posteriormente a passagem do sistema polar sobre a região do estudo.

DIA CRÍTICO EXPERIMENTAL DE CALOR

Para o estudo da reação perante o calor, foram analisadas as condições climáticas do mês de setembro, de onde foi selecionado o dia crítico experimental de calor em 24 de setembro, sendo que, nesse dia, foi configurada uma excepcionalidade climática, com temperatura máxima horária de $35,8^\circ\text{C}$, maior do que as máximas absolutas para o período registrada nas Normais Climatológicas 1961-1990, de 27°C , e radiação solar de 859 W/m^2 .

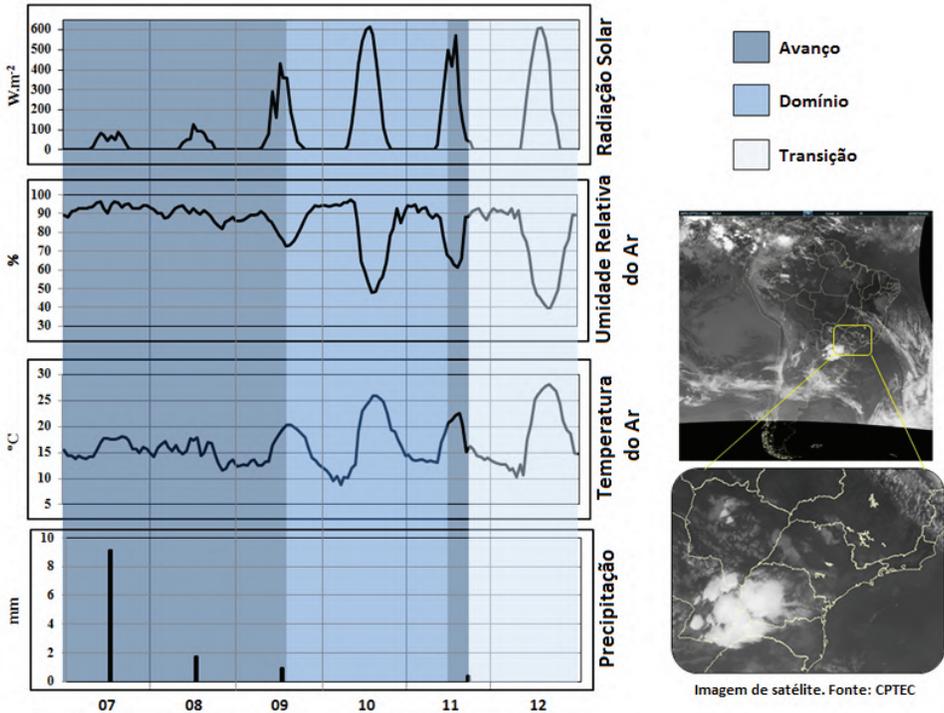


Figura 18 Gráficos das principais variáveis climáticas e imagem de satélite mostrando a chegada de uma frente fria entre os dias 7 e 9 de julho. *Fonte:* Gallardo (2017)⁴³.

Esse período se caracterizou por instabilidade atmosférica precedida pela transição de uma fase polar em fase de tropicalização e o predomínio de um anticiclone sobre grande parte da América do Sul, com o notável aumento das temperaturas máximas entre os dias 21 e 24, atingindo no dia 24 o registro mais alto (35,8°C) e o valor mínimo de 15°C, com ausência de precipitação. No dia 25 de setembro, o avanço de um sistema polar trouxe instabilidade atmosférica e precipitação com valor de 15 mm, reduzindo a temperatura máxima e aumentando a temperatura mínima. Foram registrados altos valores de umidade do ar e mudança significativa da radiação solar (Figura 19).

CÁLCULO DO CONFORTO PARA O DIA CRÍTICO DE FRIO

Foram aplicadas as Equações 8 e 9 no cálculo de conforto para o dia crítico experimental de 10 de julho, quando foi registrada uma temperatura mínima externa de 8,8°C, às 5h00, e uma temperatura máxima externa de 27,9°C, às 15h00, com amplitude térmica de 19,2°C.

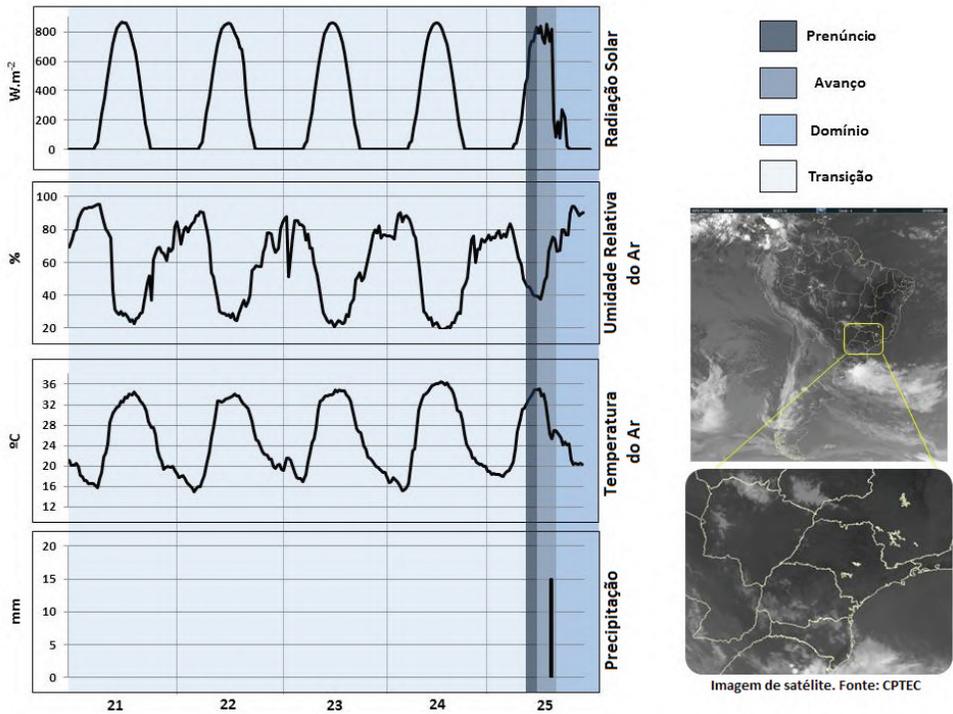


Figura 19 Gráficos das principais variáveis climáticas e imagem de satélite entre os dias 21 e 25 de setembro, mostrando a ocorrência de instabilidade com precipitação. *Fonte:* Gallardo (2017)⁴³.

$$\text{Limite superior 80\% satisfeitas} = 0,31 t_{(pma(out))} + 21,3 = 26,14^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

$$\text{Limite inferior 80\% satisfeitas} = 0,31 t_{(pma(out))} + 14,3 = 19,14^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

A Figura 20 apresenta as temperaturas internas do ar no dia crítico experimental de frio. Nas primeiras horas do dia todas as células de teste encontram-se abaixo do limite inferior de conforto para frio. Após as 13h00, todas as células se encontram dentro dos limites, não havendo, portanto, desconforto.

As temperaturas mais altas foram registradas na célula de teste controle e na célula com cobertura verde, contudo, as menores temperaturas são verificadas nas células com fachadas verdes e também na que possui cobertura verde e fachada verde.

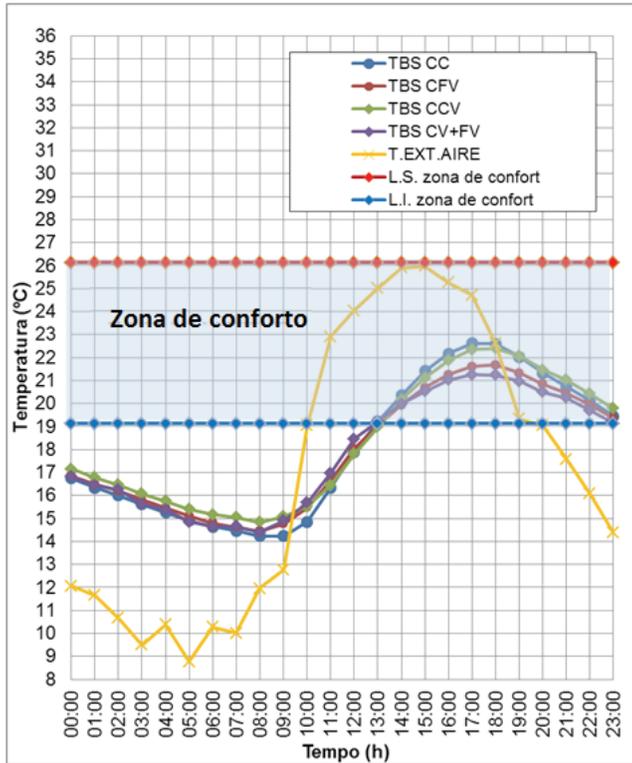


Figura 20 Temperatura de bulbo seco e limites de conforto para o dia crítico experimental de frio: 10/07/2015. Fonte: Gallardo (2017)⁴³.

CÁLCULO DO CONFORTO PARA O DIA CRÍTICO DE CALOR

Para o cálculo de conforto no dia crítico experimental de calor foram aplicadas as Equações 10 e 11, quando, no dia 24 de setembro, foi registrada uma temperatura mínima externa de 15,1°C, às 6h00, e uma temperatura máxima externa de 35,8°C, às 15h00, com amplitude térmica de 15,6°C. A Figura 21 mostra a variação da temperatura interna do ar das células (TBS) e a temperatura externa do ar, além dos limites de conforto.

$$\text{Limite superior 80\% satisfeitas} = 0,31 t_{(pma(out))} + 21,3 = 28^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

$$\text{Limite inferior 80\% satisfeitas} = 0,31 t_{(pma(out))} + 14,3 = 21^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

Os resultados obtidos por meio dos registros, tanto no dia experimental de frio como no de calor, sempre indicam variação no período noturno com característica predominantemente fria, ou seja, abaixo do limite inferior de conforto. No período diurno, algumas células se encontram dentro dos limites de conforto e outras ultrapassam o limite, no caso de um dia quente.

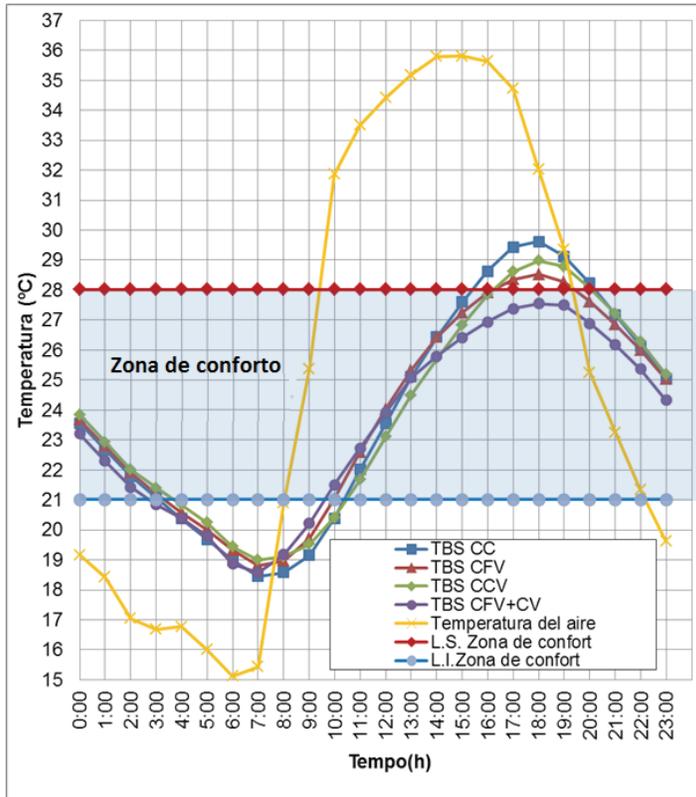


Figura 21 Temperatura de bulbo seco e limites de conforto para o dia crítico experimental de calor: 24/10/2015.

As temperaturas internas mais baixas para os dois dias críticos experimentais são registradas na célula controle, construída com materiais convencionais, a qual apresenta valores das temperaturas internas mais próximos dos registrados externamente.

Comparando a célula controle (CC) com a célula com vegetação (FV+CV), pode-se observar que não há diferenças significativas em relação às temperaturas. Portanto, para períodos frios, o tratamento com vegetação não apresenta diferença significativa em termos de temperatura, uma vez que ambas as células apresentam o mesmo valor de temperatura interna do ar.

A Tabela 1 mostra o cálculo de graus-horas para o dia crítico de calor e para o dia crítico de frio. A única célula de teste em que não se registra nenhuma hora de desconforto por calor é a célula FV+CV, e o valor mais elevado de graus-hora por desconforto de calor se observa na célula controle (4,98°C.h). No caso de graus-hora de desconforto por frio, o maior valor registrado foi

na célula controle (11,48°Ch). As células CV e FV apresentam valor similar, de aproximadamente 8,5°Ch. A célula de ensaio com fachada e cobertura apresenta 9°Ch de desconforto por frio.

A célula controle mostra maior desconforto tanto por frio quanto por calor, enquanto as células possuem vegetação em alguma das envolventes apresenta menos horas de desconforto durante o dia.

Tabela 1 Grau-horas de desconforto calculados para as células de teste (°Ch).

GRAUS-HORA DE DESCONFORTO		
CASOS	CALOR	FRIO
CCC	4,98	-11,48
CFV	1,11	-8,66
CCV	2,39	-8,53
CFV+CV	0,00	-9,21

Fonte: Gallardo (2017)⁴³.

COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS TEMPERATURAS SUPERFICIAIS INTERNAS (TSI) DAS FACHADAS NORTE E DAS COBERTURAS

As superfícies que mais recebem radiação solar são as fachadas norte e as coberturas e, por isso, receberam maior interesse no estudo do comportamento térmico das células de teste. As Figuras 22A e 22B mostram os resultados obtidos das temperaturas superficiais das fachadas norte das células de teste para os dias críticos de frio e de calor.

No dia experimental de frio, as temperaturas superficiais internas das fachadas norte são similares quando se registram as temperaturas mínimas externas durante as primeiras horas do dia (entre as 0h00 e as 8h00), e a diferença entre a célula controle e a FV+CV é de aproximadamente 1°C e de 6°C, respectivamente, em relação à temperatura externa.

No entanto, no gráfico do dia experimental de calor pode-se observar diferença de aproximadamente 2°C entre a CC e a CFV+CV. Em relação à temperatura externa do ar há um atraso térmico na temperatura superficial interna de aproximadamente de 3 a 4h.

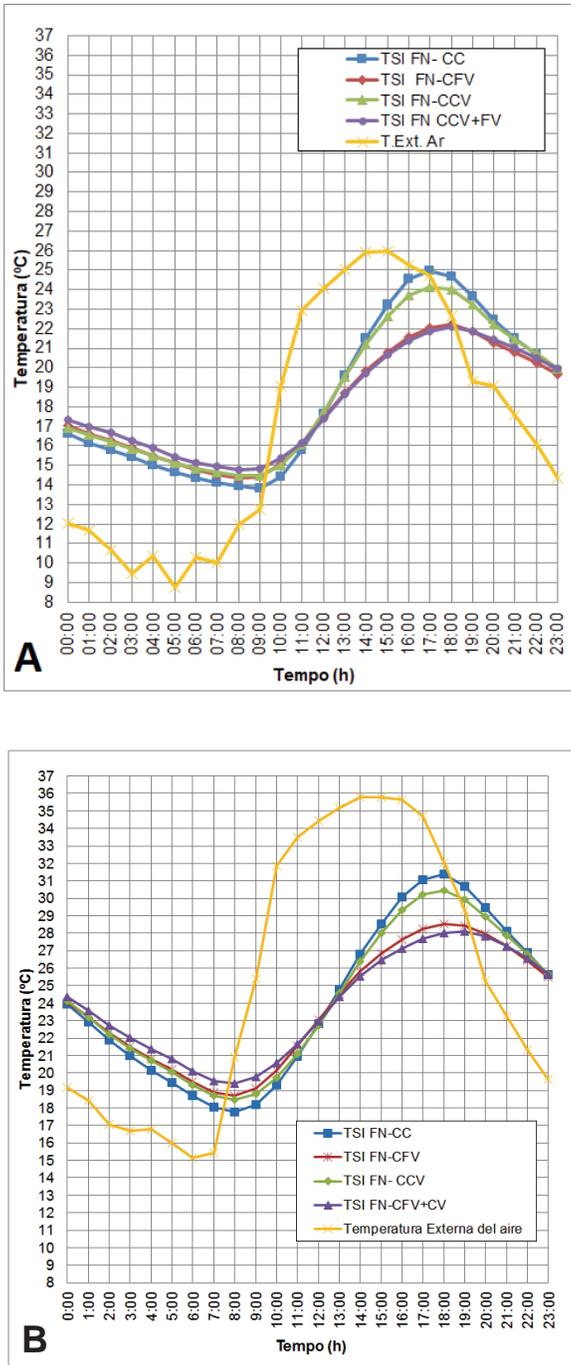


Figura 22 (A) Temperaturas superficiais internas das fachadas norte no dia experimental de frio, em 10/7/2015, e (B) temperaturas superficiais internas das fachadas norte no dia experimental de calor, em 24/9/2015. *Fonte:* Gallardo (2017)⁴³.

Quando a temperatura externa começa a se elevar, o comportamento das células de teste passa a se diferenciar, registrando-se na CC uma temperatura superficial interna máxima na fachada norte de 25°C às 17h00 e de 31,4°C às 18h00 durante o dia de frio e o dia de calor, respectivamente. Porém, observando-se o período vespertino nos dois dias, as temperaturas mais baixas são registradas na CFV+CV e na CFV, em que se detecta uma diferença de 2,6°C em relação à CC e de 5°C em relação à temperatura externa para o dia de calor. No dia de frio, a diferença entre CFV+CV e CC é de 3°C.

Os dados de temperatura obtidos das coberturas nos dois dias experimentais (Figuras 23A e 23B), mostram que essa é a superfície onde se percebe maior diferença de temperatura entre as células de teste, tanto para o dia experimental de frio quanto para o de calor.

Para ambos os dias, quando são registradas as temperaturas externas mais baixas durante o período da manhã, as células de teste que apresentam menores temperaturas na superfície interna das coberturas são as que possuem telhado cerâmico, ou seja, CC e CFV. As células que registram maiores temperaturas são aquelas com cobertura verde (CCV e CFV+CV), com diferenças de 2°C em relação às outras células para o dia de calor e de 1°C para o dia de frio, o que indica um resfriamento radiativo menor, dessa superfície para a atmosfera.

No período da tarde, ocorre aumento da temperatura externa, o que implica aumento das temperaturas superficiais internas. Novamente, as células que apresentam as temperaturas mais altas são as que não possuem cobertura verde (CC e CFV). A célula com menor temperatura é a CFV+CV, com diferença em relação à CC de 2,2°C para o dia experimental de frio e 3,2°C para o dia de calor.

O atraso térmico para o dia experimental de frio é de 4h00 para CFV+CV e para CCV. No dia de calor, as células com telhado cerâmico registraram atraso térmico de 3h00, enquanto CFV+CV e CCV registraram atraso de 4h00.

Analisando os resultados obtidos para o dia crítico de calor, pode-se concluir que o uso de fachadas e coberturas verdes combinadas traz benefícios por impedir ganhos excessivos de calor provocados pela incidência da radiação solar. A vegetação, por sua capacidade de gerar sombra, diminui a absorção do calor, tanto por radiação quanto por condução, até o interior da edificação em virtude da redução do impacto da radiação solar direta.

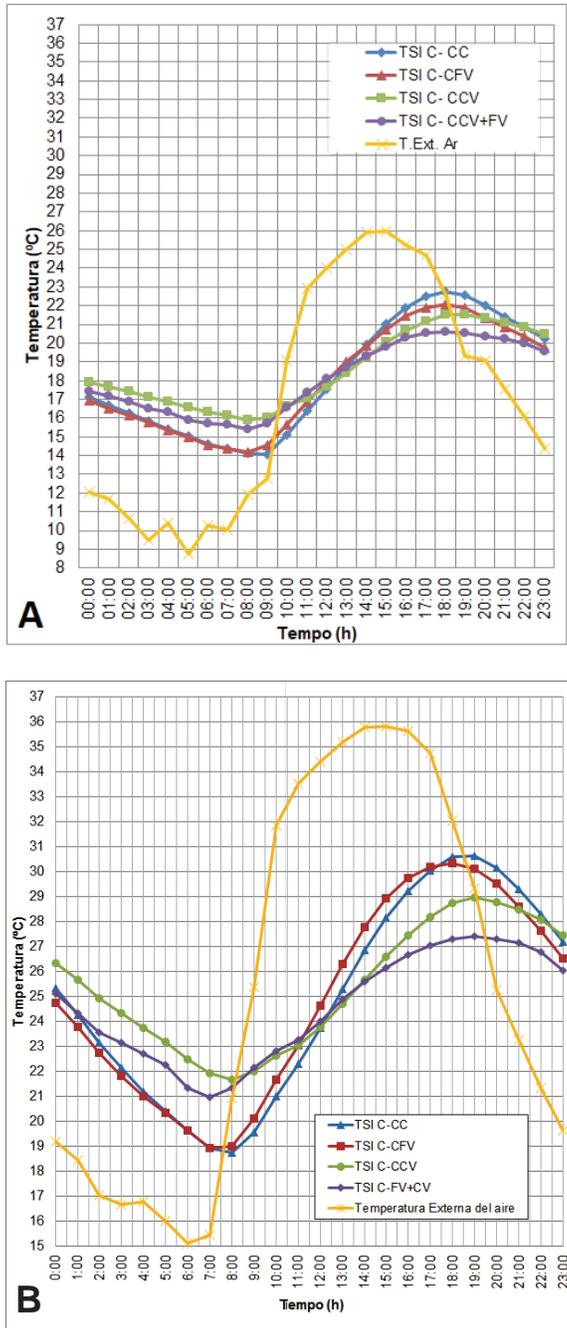


Figura 23 (A) Temperaturas superficiais internas das coberturas no dia experimental de frio, em 10/7/2015, e (B) temperaturas superficiais internas das coberturas no dia experimental de calor, em 24/9/2015. Fonte: Gallardo (2017)⁴³.

Considerando a análise do dia crítico experimental de frio, conclui-se que a vegetação é capaz de reduzir as variações de temperatura interna, uma vez que CFV+CV consegue manter temperatura mais estável no ambiente interno, pois durante as primeiras horas do dia, quando se registram as temperaturas externas mais baixas, se observam as temperaturas internas mais altas. Para o dia, a diferença entre as células com e sem vegetação nas horas mais frias não foi significativa.

CONSIDERAÇÕES

As fachadas verdes proporcionam melhora do conforto térmico no ambiente interno das edificações pelo bloqueio de parte da radiação solar incidente. Neste estudo, foi evidenciado que a escolha da fachada que receberá o sistema é um critério importante a ser seguido, e a associação dos sistemas de fachadas com coberturas verdes amplia o efeito de amortecimento térmico. A escolha das espécies vegetais a serem utilizadas é um fator-chave para o sucesso do sistema. Devem estar adaptadas ao clima local e sua manutenção deve ser executada de modo que não se danifiquem os componentes do sistema, como os suportes e sistemas de irrigação e impermeabilização da fachada.

As fachadas verdes permitem contato praticamente em tempo integral com a vegetação, que pode ser vista pelas janelas e sacadas durante o tempo em que se permanece dentro do ambiente. Assim, a aplicação da vegetação nas superfícies das edificações favorece a melhora tanto do ambiente interno quanto do entorno das edificações que a utilizam.

COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS VERDES

As edificações, em geral, estão sujeitas às perdas e aos ganhos térmicos através de seus fechamentos. A envolvente é a responsável em manter estáveis os níveis de temperatura e de umidade do ar dentro das margens admissíveis pelo corpo humano. Nesse sentido, a cobertura é a parte das edificações, principalmente térreas, que está sujeita às maiores flutuações térmicas, pois, durante o dia, alcança elevadas temperaturas superficiais internas, devido a sua exposição direta à radiação solar e, durante a noite, é a parte das envolventes opacas que mais calor perde por radiação para a abóbada celeste^{81,82}.

A diferença entre as coberturas vegetadas e as sem vegetação é qualitativa e quantitativa. O processo de transferência de calor é totalmente diferente. A radiação solar, a temperatura externa e a umidade relativa apresentam valores

mais baixos assim que passam a camada da vegetação sobre a cobertura. As plantas, para as suas funções biológicas como a fotossíntese, transpiração e evaporação, absorvem uma quantidade significativa de radiação solar. A radiação solar restante alterada em termos de carga térmica influencia o clima interno à medida que passa através da vegetação e dos elementos do telhado⁸³.

Em relação ao substrato sob a vegetação, a sua condutividade térmica depende da sua estrutura, da sua quantidade de água e de ar. Um substrato pouco compacto tem uma maior proporção de ar, que apresenta uma baixa condutividade térmica e por isso transmite menos calor às camadas inferiores. Já um substrato compacto com menor conteúdo de ar conduz mais facilmente o calor às camadas inferiores. Durante o dia, absorve o calor da radiação solar e, à noite, o fluxo de calor inverte, perdendo-o para o ambiente. A cobertura da vegetação protege o substrato da radiação direta durante o dia e também atrasa a perda da radiação térmica durante a noite. Em climas onde há queda de neve, a camada formada também ajuda na proteção térmica do substrato. O balanço energético de uma cobertura verde pode, então, ser representado simplifadamente pela absorção da radiação solar incidente, o calor armazenado, o calor perdido pela convecção, a energia utilizada no metabolismo e a perda de calor latente por evaporação²¹.

A melhor performance térmica das coberturas verdes é atingida no verão, quando há maior intensidade e períodos mais longos de incidência de radiação solar. Nesse caso, a vegetação contribui com os processos de troca de calor já abordados. Do total da radiação incidente, 27% é refletida, 60% é absorvida pelas plantas e substrato e 13% é transmitida ao substrato. O ar retido entre as folhas da vegetação forma uma camada contínua que age como isolante térmico⁸⁴.

Os conceitos relacionados à condutividade e à inércia térmica tratados neste capítulo podem ser verificados no presente estudo experimental sobre a análise do comportamento térmico de um sistema extensivo de cobertura verde, no qual foram utilizadas plataformas de teste.

PLATAFORMAS DE TESTE E AQUISIÇÃO DOS DADOS

O experimento foi composto por duas plataformas de testes construídas de forma a reproduzir um sistema de cobertura verde extensiva nas quais foram instalados 14 termopares tipo T de junção fria. A junção de cada sensor recebeu uma camada delgada de resina para proteger contra a oxidação dos metais e foram calibrados individualmente e entre si por imersão em

gelo fundente permitindo verificar alguma possível discrepância e tempo de resposta entre os valores obtidos. Uma plataforma recebeu o plantio de vegetação, denominada "Plataforma Verde", e a outra foi mantida sem vegetação, denominada "Plataforma Controle", a qual simula o comportamento térmico de um solo exposto. Os termopares foram conectados a um multiplexador AM25T conectado a um *datalogger* CR10X (da empresa Campbell Scientific Inc.). O multiplexador é um distribuidor de canais independentes que por sua vez é conectado ao *datalogger*, o que possibilita a conexão de uma maior quantidade de sensores (Figuras 24A e 24B).

**A****B**

Figura 24 (A) *Datalogger* e multiplexador com a conexão dos termopares; (B) Plataformas de teste. Fonte: Perussi (2016)⁶⁵.

Foram monitoradas as temperaturas do nível superior e inferior do substrato e também as temperaturas externas abaixo da base das plataformas em um período de calor entre as estações primavera-verão. As Figuras 25A, 25B e 25C mostram o posicionamento dos sensores.

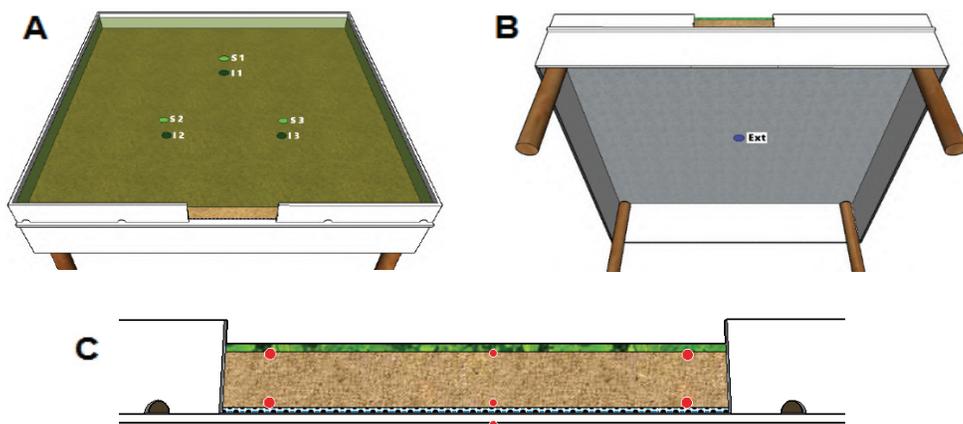


Figura 25 (A) Representação com a indicação do posicionamento dos sensores superiores e inferiores no substrato; (B) do sensor externo nas plataformas e (C) corte mostrando o posicionamento dos sensores. *Fonte:* Perussi (2016)⁶⁵.

ANÁLISE DOS VALORES DE TEMPERATURA

Para a análise dos dados de temperatura foi utilizada a média aritmética dos valores registrados simultaneamente pelos 3 sensores de cada superfície do substrato (superior e inferior) de ambas as plataformas, denominadas Temperatura Média Verde Superior (èVS), Temperatura Média Verde Inferior (èVI), Temperatura Média Controle Superior (èCS), Temperatura Média Controle Inferior (èCI), permitindo-se comparar os valores entre os dois níveis do substrato e superfícies externas ao longo do período de análise. As temperaturas externas foram denominadas Temperatura Verde Externa (èV Ext) e Temperatura Controle Externa (èC Ext).

ANÁLISE DO PERÍODO ESTUDADO

Para determinação do episódio representativo de tempo quente, foram utilizados os dados meteorológicos registrados pela estação meteorológica automática do CRHEA-USP (Figura 26), com o auxílio das imagens de satélite e das cartas sinóticas fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CEPTEC-INPE), para confirmação das massas de ar atuantes (Figura 27).

As análises do comportamento térmico foram realizadas a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica como forma de conhecer a influência das flutuações do tempo meteorológico permitindo a identificação de episódios de tempo representativos e suas repercussões sobre os valores de temperatura obtidos das plataformas de teste por meio da elaboração e análise de gráficos.

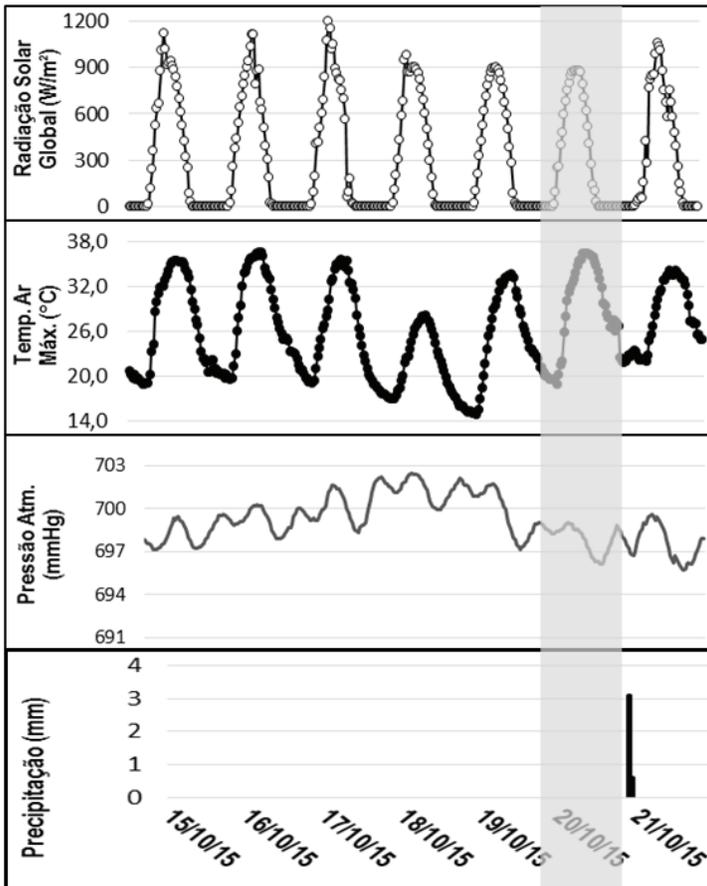


Figura 26 Análise das principais variáveis climáticas do período de 15 a 21/10/2015. Fonte: Perussi (2016)⁶⁵.

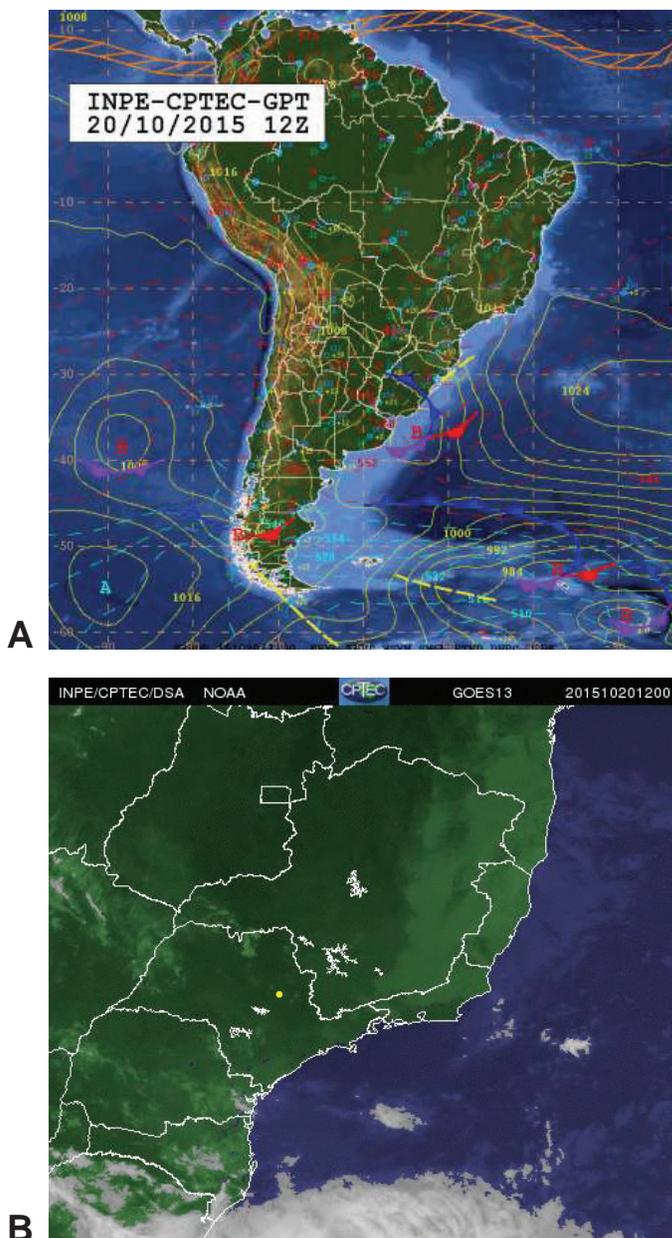


Figura 27 (A) Imagens do satélite da região Sudeste e (B) carta sinótica mostrando a atuação das massas de ar sobre a América do Sul em 20/10/2015. Fonte: (A) INPE (2016)⁸⁵, (B) INPE (2016)⁸⁶.

O episódio de tempo selecionado para a análise foi registrado entre os dias julianos 15 a 21/10/2015, dias em que a região esteve sob o domínio de uma massa de ar de característica quente e seca e de onde foram extraídos os dias típicos experimentais. Após a análise dos episódios atmosféricos ocorridos no período, o dia 20 de outubro foi tomado como dia de referência para o estudo, quando a temperatura do ar atingiu o valor de 36,6°C, superando a temperatura máxima absoluta para o mês de outubro registrada em 1963 com valor de 36,4°C, obtida das Normais Climatológicas para São Carlos de 1961 – 1990.

ANÁLISE DOS DADOS DAS PLATAFORMAS

Para a análise do comportamento térmico dos sistemas de cobertura, os valores obtidos foram plotados na forma de gráficos mostrando a variação da temperatura do ar, das temperaturas superficiais superior e inferior do substrato e dos sensores externos das plataformas verde e controle. As Figuras 28A e 28B e a Tabela 2 mostram as temperaturas referentes ao dia experimental de 20 de outubro.

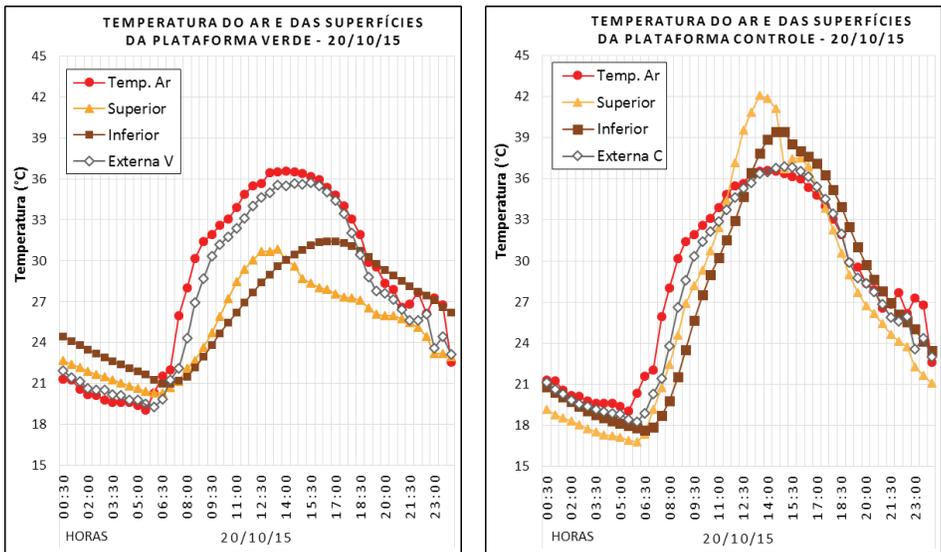


Figura 28 (A) Gráficos dos valores das temperaturas do ar, das superfícies superior e inferior do substrato e da superfície externa da plataforma verde e (B) da plataforma controle no dia 20 de outubro. Fonte: Perussi (2016)⁶⁵.

Tabela 2 Valores e respectivos horários da temperatura máxima, mínima e a amplitude térmica do ar, das superfícies superiores e inferiores e dos sensores externos das plataformas verde e controle no dia 20 de outubro.

Indicadores	Ar	θVS	θVI	θV Ext	θCS	θCI	θC Ext
T máx (°C) (hora)	36,6 (14h30)	30,9 (13h30)	31,4 (16h30)	35,7 (15h30)	42,1 (13h30)	39,4 (15h00)	36,8 (15h30)
T mín (°C) (hora)	19,1 (5h30)	20,3 (6h00)	21,0 (7h00)	19,3 (6h00)	16,8 (6h00)	17,7 (6h30)	18,3 (6h00)
ΔT (°C)	17,5	10,6	10,4	16,4	25,3	21,7	18,5

Fonte: Perussi (2016)⁶⁵.

Os valores da temperatura máxima das superfícies superiores de ambas as plataformas foram registrados 1h00 antes da temperatura máxima do ar. Na cobertura verde o valor da temperatura máxima da superfície inferior foi registrada 3h00 após o registro da temperatura máxima da superfície superior, superando-a em apenas 0,5°C. Nas superfícies superior e inferior foram registrados valores de temperatura máxima de 5,7°C e 5,2°C abaixo da temperatura máxima do ar respectivamente, sendo que a amplitude térmica da superfície superior foi maior do que a da superfície inferior em apenas 0,2°C.

Na cobertura controle a temperatura máxima da superfície inferior foi registrada 1h30 após o registro da temperatura máxima da superfície superior e com valor de 2,7°C menor. Os valores das temperaturas máximas da superfície superior e inferior da cobertura superaram a temperatura máxima do ar em 7,2°C e 4,4°C respectivamente e amplitude térmica da superfície superior foi 3,7°C maior do que a dos valores da superfície inferior.

Os sensores das superfícies externas de ambas as plataformas registraram temperaturas máximas no mesmo horário com um atraso térmico de 1h00 em relação à temperatura máxima do ar, quando o sensor da plataforma verde registrou uma temperatura 0,9°C abaixo da temperatura do ar e o sensor da plataforma controle 0,2°C acima da temperatura do ar. O sensor da plataforma verde apresentou uma amplitude térmica 2,1°C menor do que o sensor da plataforma controle.

A menor amplitude térmica registrada nas duas superfícies da cobertura verde em comparação com a registrada nas superfícies da cobertura controle resulta do bloqueio de parte da radiação solar pela vegetação, que tanto impede o ganho de energia térmica pelas camadas inferiores durante o período diurno como também impede que parte dessa energia seja perdida para o ambiente. A Figura 29 mostra a variação valores das temperaturas do ar e da superfície externa, abaixo das plataformas verde e controle.

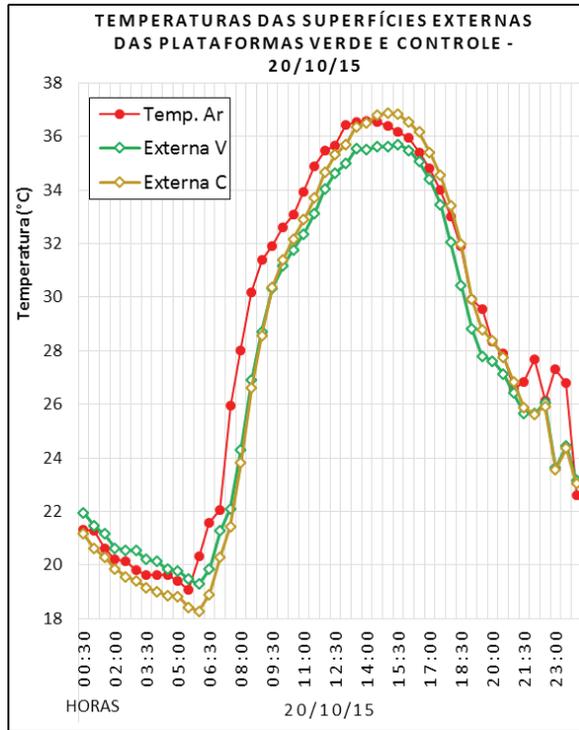


Figura 29 Gráficos dos valores das temperaturas do ar e da superfície externa das plataformas verde e controle no dia 20 de outubro. *Fonte:* Perussi (2016)⁶⁵.

Nos dois dias experimentais as temperaturas externas acompanham as tendências das respectivas coberturas, onde, na plataforma verde, a temperatura máxima da superfície externa não supera a temperatura máxima do ar e, na plataforma controle, a temperatura máxima da superfície externa supera a temperatura máxima do ar.

Ressalta-se que o melhor desempenho pela cobertura verde na redução da temperatura nas superfícies do substrato comparado com a cobertura sem vegetação ocorre tanto pelo efeito da evapotranspiração quanto pelo maior albedo dessa cobertura. O sombreamento proporcionado pela camada foliar da vegetação favorece a retenção da umidade no substrato, que perde energia térmica através da evapotranspiração. Na ausência de uma cobertura vegetal, o substrato exposto retém menos umidade que seria evaporada durante o dia e também absorve mais radiação por possuir menor albedo do que a camada foliar. Para a obtenção de um melhor desempenho térmico em uma cobertura verde, torna-se importante a escolha do tipo de vegetação a ser utilizada, que deve priorizar espécies com maior cobertura foliar e com maior taxa de transpiração.

É possível definir para um dia quente e seco que a cobertura do substrato com uma camada densa de vegetação influencia os processos de troca de calor no perfil do substrato pelo bloqueio de parte da radiação solar incidente, fator principal que determina esses processos, permitindo que a superfície superior não atinja temperaturas acima da temperatura máxima do ar diária e também que essa temperatura se manifeste com maior atraso na superfície inferior que, em última análise, é a que estará em contato com um elemento construtivo, como uma laje ou um forro. O conjunto formado por uma camada de substrato composto por materiais de uso comercial e com espessura suficiente para suportar uma vegetação de cobertura foliar densa e nativa do Brasil, confere um bom desempenho térmico em períodos de calor, características desejáveis em sistemas extensivos de cobertura verde.

O presente trabalho contribui com os estudos de sistemas de cobertura verde para o uso na construção civil ao fornecer parâmetros em relação à amplitude e atraso térmicos de um sistema de cobertura verde extensivo que podem ser utilizados na formulação de normas para coberturas não-convencionais de edificações.

CONSIDERAÇÕES

No presente estudo buscou-se trazer ao leitor alguns aspectos relativos às coberturas verdes mostrando as suas origens, a evolução desta técnica construtiva ao longo do tempo e os componentes dos sistemas, que trazem benefícios à qualidade de vida no ambiente interno das edificações, além de apresentar um trabalho no qual se pode verificar experimentalmente o amortecimento térmico proporcionado pelo sistema solo-planta em uma cobertura verde extensiva.

A utilização da vegetação nas construções é capaz de amortecer as flutuações térmicas e com possibilidades de aplicação em diferentes tipos de clima, melhorando o conforto térmico para seus ocupantes, a melhora da eficiência energética na edificação e proporcionando também benefícios ambientais às cidades. É necessário se avançar em alguns aspectos para a que as coberturas verdes sejam utilizadas em maior escala, como normatizações para a construção civil e parcerias entre o setor construtivo e centros de pesquisas.

ÍNDICES CLIMÁTICOS PARA TURISMO

Quando realizamos nossas atividades em um ambiente externo nos encontramos sob influência direta das variáveis climáticas, como a radiação solar, a temperatura do entorno, a chuva e o vento, tendo como proteção somente nossas vestimentas, diferentemente de quando estamos em um ambiente construído sob a proteção das envolventes. Sendo assim, é possível avaliar o conforto térmico ao se exercer alguma atividade, como um trabalho, uma atividade de lazer ou atividade turística, por exemplo, por meio da análise dos processos de transmissão e recebimento de calor pelo nosso organismo em interação com o clima. Vários pesquisadores desenvolveram algoritmos que possibilitam interpolar estas informações de uma maneira muito mais eficiente e eficaz, convertendo essa relação em índices de conforto térmico ou ambiental que são melhor interpretados por profissionais de outras áreas. Os índices de conforto já são muito utilizados em áreas como da engenharia, arquitetura e medicina, mas últimas décadas com o avanço das tecnologias outras áreas do conhecimento começaram a utilizar estas ferramentas de análise do conforto em suas atividades. Nesse sentido, as atividades turísticas realizadas em ambiente externo não poderiam ficar de fora da aplicação desses índices, e diversas pesquisas e trabalhos tem demonstrado o potencial dos algoritmos. Neste estudo apresentaremos alguns destes índices e explanaremos brevemente suas potencialidades e contribuições para atividades turísticas.

DADOS CLIMATOLÓGICOS

A aquisição dos dados climatológicos de qualidade é essencial para desenvolvimentos de pesquisas nesta área. Quanto maior for a rede de estações disponíveis, maior a precisão dos resultados. O Brasil possui excelentes bancos de dados que podem ser acessados gratuitamente por qualquer cidadão na internet ou via e-mail em plataformas como o *HIDROWEB*, da Agência Nacional de Águas (ANA), o *CPTEC*, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas CIIAGRO, além de estações de superfície que não estão conectadas a nenhuma plataforma, como a do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA-USP), que possui dados desde da década de 1970.

ÍNDICES DE CONFORTO

Os índices de conforto térmico tentam representar o efeito do tempo e clima na sensação térmica, considerando a fisiologia, vestimenta e ambiente a

que o indivíduo está exposto. Conforme mencionado acima, as muitas combinações possíveis da variação dos fatores climáticos podem proporcionar respostas diferentes em indivíduos diferentes e locais diferentes. Relacionamos abaixo 3 índices muito utilizados por pesquisadores para estudos de conforto.

PET (*PHYSIOLOGICAL EQUIVALENT TEMPERATURE*)

O índice "Temperatura Fisiológica Equivalente" (*Physiological Equivalent Temperature* - PET) é um índice térmico universal para a avaliação biometeorológica do meio ambiente termal que fornece uma estimativa do componente térmico de um ambiente (interno ou externo).

Para calcular o PET é necessário determinar a temperatura, pressão, umidade, velocidade do vento, cobertura de nuvens e temperatura radiante média. Os parâmetros humanos relativos a atividade, vestimenta, altura e peso geralmente padronizados, porque o objetivo do indicador não é avaliar as características individuais, mas as condições climáticas em diferentes locais.

Para quantificar a percepção do ambiente térmico pelos indivíduos, são definidas classes de conforto. Os valores mostrados na tabela abaixo consideram uma taxa metabólica referente a uma caminhada e vestimenta de verão. O indivíduo considerado é o padrão (1,75m de altura, 75 kg, 35 anos, homem) e permanece no sol.

As seguintes suposições são feitas para o ambiente:

- ◆ Temperatura radiante média igual à temperatura do ar ($T_{mrt} = T_a$)
- ◆ Velocidade do ar igual a 0,1 m/s
- ◆ Pressão de vapor igual a 12hPa

Parâmetros do indivíduo para o ambiente:

- ◆ Metabolismo (atividade física leve) igual a 80W, adicionado ao metabolismo basal
- ◆ Resistência térmica da roupa igual a 0,9 clo

Cálculo do PET:

- ◆ Cálculo das condições térmicas do corpo com para uma dada combinação de parâmetros meteorológicos;
- ◆ Inserção dos valores calculados para temperatura da pele e para temperatura do centro do corpo e resolução do sistema de equações para encontrar a respectiva temperatura do ar (T_a), com $v=0,1\text{m/s}$, $VP=12\text{hPa}$ e $T_{mrt} = T_a$.

A temperatura do ar resultante corresponde à temperatura equivalente fisiológica (PET), em °C, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 Faixas de valores da Temperatura Fisiológica Equivalente (PET).

PET (°C)	Percepção térmica	Estresse fisiológico
< 4,1	Muito frio	Estresse de frio extremo
4,1 – 8,0	Frio	Estresse de frio forte
8,1 – 13,0	Fresco	Estresse de frio moderado
13,1 – 18,0	Levemente fresco	Estresse de frio leve
18,1 – 23,0	Confortável	Sem estresse térmico
23,1 – 29,0	Levemente morno	Estresse de calor leve
29,1 – 35,0	Morno	Estresse de calor moderado
35,1 – 41,0	Quente	Estresse de calor forte
> 41,0	Muito quente	Estresse de calor extremo

Fonte: Silva (2017), adaptado de Hoppe (1999)⁸⁷

O cálculo do PET pode ser feito utilizando o modelo *RayMan*^{88,89,90,91}. O modelo *Rayman* (Radiation On The Human Body) foi desenvolvido para permitir aplicações em ambientes internos e externos porque pode considerar vários horizontes complexos. Além disso, diversos índices térmicos podem ser calculados com o *RayMan*. O software foi desenvolvido pelo professor Andreas Matzarakis e seu grupo de pesquisadores da universidade de Freiburg na Alemanha e pode ser obtido gratuitamente através <http://www.mif.uni-freiburg.de/rayman>.

UTCI (UNIVERSAL THERMAL CLIMATE INDEX)

O UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) foi desenvolvido pela Sociedade Internacional de Biometeorologia (*ISB - International Society of Biometeorology*) com o objetivo de avaliar o conforto em ambientes externos por meio da resposta fisiológica do corpo humano, sendo válido e aplicável a todos os tipos de clima e tempo independente das características pessoais dos indivíduos⁹².

O UTCI segue o conceito da temperatura equivalente e apresenta para o ambiente de referência as seguintes definições:

- ◆ 50% de umidade relativa (com pressão de vapor não excedendo 20 hPa);
- ◆ Temperatura do ar (T_a) igual à temperatura radiante média (T_{rm});
- ◆ Velocidade do vento de 0,5 m/s, medida a 10 m de altura.

Considera também

- ◆ O comportamento adaptativo em relação ao isolamento térmico.
- ◆ A distribuição da roupa em diferentes partes do corpo;
- ◆ A redução da resistência térmica e evaporativa da roupa causada pelo vento e pelo movimento em superfície plana.

Assim, a temperatura UTCI equivalente para dada combinação de variáveis climáticas (vento, radiação, umidade e temperatura do ar) é definida como a temperatura do ar do ambiente de referência, que produz o mesmo valor de estresse térmico.

O UTCI abrange as seguintes faixas climáticas: -

- ◆ 50 °C d" Ta d" 50 °C
- ◆ -30 °C d" Trm-Ta d" 70 °C
- ◆ Velocidade de vento entre 0,5 e 30,3 m/s
- ◆ Umidade relativa de 5% a 100% (pressão de vapor máxima 5 kPa)

As faixas de estresse térmico são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 Faixas de estresse térmico do UTCI.

Faixas do UTCI	Categorias de estresse
> 46 °C	Extremo estresse para o calor
38 °C a 46 °C	Muito forte estresse para o calor
32 °C a 38 °C	Forte estresse para o calor
26 °C a 32 °C	Moderado estresse para o calor
18 °C a 26 °C	Conforto térmico
9 °C a 18 °C	Sem estresse térmico
0 °C a 9 °C	Pouco estresse para o frio
0 °C a -13 °C	Moderado estresse para o frio
-13 °C a -27 °C	Forte estresse para o frio
-27 °C a -40 °C	Muito forte estresse para o frio

Fonte: ISB (2003)⁹²

ÍNDICE CLIMÁTICO PARA TURISMO DE MIECZKOWSKI (ICTM)

Embora tenha sido criado há quase três décadas ainda é utilizado para avaliar a adequabilidade climática de destinos turísticos em diferentes regiões. O Quadro 3 mostra a região de aplicação dos índices e suas respectivas referências na literatura.

Quadro 3 Aplicação do ICT (Índice Climático para Turismo) de acordo com a região estudada e suas respectivas referências.

Região	Referência
Austrália	93
Sudoeste da Inglaterra	94
Japão	95
América do Norte	96
Europa	97
Irã	98, 99, 100
Ilhas do Caribe	101
Espanha	102
Turquia	103
Mediterrâneo	104

Fonte: Elaborado por Silva (2017).

O ICT é baseado nas médias mensais de sete variáveis climáticas (temperatura máxima do ar, temperatura média do ar, umidade relativa mínima, umidade relativa média, volume de precipitação, horas de insolação e velocidade média do vento). A Tabela 5 mostra os componentes do Índice Climático para Turismo e seus respectivos pesos.

Tabela 5 Componentes do ICT (Índice Climático para Turismo).

Variável	Variável Climática	Peso (%)
Índice de conforto diurno (ICD)	Temperatura máxima diária do ar (°C) Umidade relativa mínima diária (%)	40
Índice de conforto diário (ICA)	Temperatura média diária do ar (°C) Umidade relativa média diária (%)	10
Precipitação (P)	Precipitação total (mm)	20
Insolação (I)	Total de horas de insolação (horas)	20
Vento (V)	Velocidade média do vento (km/h ou m/s)	10

Fonte: Mieczkowski (1985)¹⁰⁵

O Índice de Conforto Diurno (ICD) é uma combinação da temperatura máxima diária com a umidade relativa mínima diária para avaliar conforto térmico no período em que ocorre a maior parte das atividades turísticas. Essa variável tem o maior peso (40%) porque os turistas são mais ativos durante o dia.

O Índice de Conforto Diário (ICA) é uma combinação da Temperatura média diária com a umidade relativa média diária para avaliar o conforto térmico em um período de 24 horas, incluindo o período noturno. As variáveis Insolação (I) e Precipitação (P) têm o segundo maior peso (20% cada). O Índice de Conforto Diário (ICA) e a velocidade do vento têm o menor peso (10% cada).

A soma das parcelas ponderadas é multiplicada por 2 para que o valor máximo do ICT seja 100. O ICT é calculado conforme a Equação 12 e as categorias para avaliação do ICT, são mostradas na Tabela 6.

$$\text{ICT} = 2 (4\text{ICD} + \text{ICA} + 2\text{P} + 2\text{I} + \text{W}) \quad (12)$$

Tabela 6 Categorias para avaliação do ICT.

ICT	Descrição das categorias	ICT	Descrição das categorias
90 – 100	Ideal	40 – 49	Marginal
80 – 89	Excelente	30 – 39	Desfavorável
70 – 79	Muito bom	20 – 29	Muito desfavorável
60 – 69	Bom	10 – 19	Extremamente desfavorável
50 – 59	Aceitável	Abaixo de 9	Impossível

Fonte: Mieczkowski (1985)¹⁰⁶

Os primeiros índices de conforto foram desenvolvidos pela Bioclimatologia Humana e com o avanço da tecnologia e das pesquisas áreas como a de Turismo estão assimilando estes conhecimentos. Vale lembrar que o turismo já corresponde a 10% da economia mundial e assim como em outros setores da economia, o clima e o tempo, podem aumentar ou diminuir a rentabilidade de uma localidade¹⁰⁶. Se o clima caracteriza as condições médias de um local observadas ao longo do tempo, por outro lado a condição meteorológica é a manifestação do clima em um ponto específico do tempo e do espaço. Assim, embora os turistas possam esperar determinadas condições climáticas quando viajam para um local, eles vão encontrar as condições meteorológicas reais que podem ser bastante diferentes das condições médias.

Pode-se verificar, no entanto, que a maior parte das informações sobre o clima disponível em guias turísticos e páginas na internet está relacionada com os valores médios dos parâmetros (com grande destaque para dados sobre temperatura e pluviosidade). Porém, os indivíduos não reagem a “valores médios”, mas sim a condições reais (uma combinação de parâmetros

meteorológicos). Os dados necessários para análise dos aspectos climáticos e meteorológicos de uma região são bastante complexos, o que torna difícil sua utilização por planejadores e administradores da área de turismo.

Vários trabalhos encontrados na literatura analisaram o relacionamento entre o turismo (a demanda de turismo) e as condições climáticas e meteorológicas de um local por meio de índices de conforto, como, por exemplo: 107,108,109,110,111,112,113,114,115,116,117,118,119,120,121.

Dois trabalhos pesquisados apresentam revisões abrangentes sobre diferentes métodos utilizados para avaliar a influência do clima e das condições meteorológicas no turismo^{122,123}.

O Índice Climático para Turismo (ICT) de Mieczkowski¹⁰⁵ em 1985, por exemplo, foi utilizado para avaliar os recursos climáticos para turismo em trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores^{94,124,125}, incluindo algumas alterações incluídas em sua formulação. A Quadro 4 apresenta uma listagem de alguns trabalhos onde o índice PET foi utilizado.

Quadro 4 Aplicações do PET em estudos relacionados ao turismo.

Região	Referência
Irã	126
	127
	128
Croácia	129
Turquia	130
Tailândia e China	131,132
Áustria	133
Portugal	134
Grécia	111

Fonte: Elaborado por Silva (2017).

Muitas pesquisas comparam diversos índices afins de identificar o mais compatível com a realidade climática local. Para a comparação dos índices geralmente são estabelecidos três critérios baseados na correlação entre os resultados fornecidos pelos diversos índices e os resultados encontrados em questionários previamente aplicados, levando em consideração os valores médios obtidos para as situações levantadas. Depois, para cada índice são realizados duas análises e um cálculo, descritos a seguir:

- ◆ Correlação entre os resultados do parâmetro adotado pelo índice e os resultados, em termos de respostas subjetivas de percepção de sensação térmica, do levantamento de campo.
- ◆ Correlação entre os resultados do índice dos modelos e os resultados, também em termos de respostas subjetivas de percepção de sensação térmica, do levantamento de campo.
- ◆ Porcentagem de equivalência de respostas do índice para os casos em que haja a possibilidade de estabelecimento de correlação entre as faixas interpretativas de cada índice e as utilizadas no levantamento de campo.

Ao final dessas etapas, um índice mais coerente com a realidade da área de estudo pode ser mais facilmente visualizado e interpretado, principalmente se forem apresentados na forma de cartas bioclimáticas gerados em SIGs. Com a elaboração da carta temática contendo os resultados das comparações entre os índices de conforto, é possível delimitar a zonalidade geográfica segundo o comportamento espacial de variáveis climáticas em relação a atividade turística por meio dos processos de espacialização de dados, como a Krigagem. Tais classificações são definidas em função do comportamento espacial e temporal das variáveis climáticas mencionadas anteriormente. A carta bioclimática permite, assim, inferir tanto a distribuição espacial de domínios climáticos como também dos domínios das zonas de conforto. Intercalando essa compreensão do clima com os limites do nosso organismo, torna-se possível planejar atividades turísticas praticadas tanto no ambiente externo quanto no ambiente construído.

A relação do clima e tempo com o Turismo é entendida como sendo de alta complexidade e necessita de muita pesquisa para que se alcance uma compreensão ampla da realidade. Entretanto, o aumento da capacidade de processamento computacional e o acesso a equipamentos de alto nível tecnológico têm permitido avanços significativos nessa área ultimamente. Embora o turismo seja uma atividade que vem se consolidando na economia brasileira, poucos trabalhos focam no turismo como temática principal para estudos de conforto. A possibilidade de “traduzir” essa complexa relação é o fator mais importantes dos índices climáticos para turismo, pois possibilita aos gestores e proprietários das áreas turísticas um planejamento de forma mais eficiente, eficaz e sustentável as atividades desenvolvidas na região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nosso organismo responde às alterações das condições do tempo através de mecanismos fisiológicos os quais permitem nos adaptarmos aos diversos estados dos ambientes nos quais nos encontramos exercendo diversas atividades. A partir da compreensão do clima e conhecendo os limites do nosso organismo é possível planejar atividades tanto no ambiente externo quanto no ambiente construído, considerando-se o clima local quando da concepção de projetos arquitetônicos. Neste sentido, torna-se importante a obtenção de dados meteorológicos com uma escala temporal diária na avaliação das influências dos elementos do clima tanto no organismo, com o auxílio de referenciais como os índices de conforto, quanto nas envolventes das edificações.

Dentre os elementos do clima, a radiação é aquele que mais influencia no comportamento térmico dos materiais, que por sua vez transferem energia térmica para os ambientes, tanto externos quanto internos. A utilização de vegetação nas envolventes das edificações, como as fachadas e coberturas verdes, constituem em técnicas que contribuem com o amortecimento térmico no ambiente construído pelo efeito combinado de sombreamento e de evapotranspiração proporcionados pela cobertura vegetal, resultando em melhoria no conforto térmico aos seus ocupantes e reduzindo o consumo de energia para resfriamento durante os períodos de calor e de aquecimento durante os períodos de frio.

Os conceitos interdisciplinares relacionados à Bioclimatologia, conforto e desempenho térmico, assim como as técnicas construtivas utilizando vegetação apresentados neste capítulo, constitui-se em um material de apoio aos estudantes e professores de diversas áreas, como ciências ambientais, arquitetura, engenharia, turismo e demais áreas correlatas.

RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR

MAGILL, J. D.; MIDDEN, K; GRONINGER, J.; THERRELL, M. **A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research**. *Research Papers*. Paper 91, 2011, disponível em: <http://opensiuc.lib.siu.edu/gs_rp/91> acessado em: 15/12/2016.

QUESTÕES DE REVISÃO

- Para uma residência em construção em uma região com inverno frio e seco e verão quente e úmido no hemisfério sul será proposta a instalação de uma fachada verde. Com base nos seus conhecimentos sobre a inércia térmica dos materiais e sabendo que durante o inverno existe a necessi-

dade de permitir a insolação nas fachadas, qual fachada você elegeeria para receber vegetação? Por quê?

- Considerando uma cidade localizada em uma região quente e úmida e outra em uma região quente e seca, qual sistema de cobertura verde e vegetação você proporia utilizar? Por quê?
- Tendo em vista a complexa relação que o clima e tempo possui com as atividades turísticas, em qual das situações abaixo o turista está se sentindo mais confortável e mais desconfortável na sua opinião? Por quê?
 - A. Temperatura 17° C, Umidade 46% ventos de 6 m/s
 - B. Temperatura 26° C, Umidade 11% ventos de 0 m/s
 - C. Temperatura 38° C, Umidade 94% ventos de 1 m/s
- Sugestões de pesquisas:
 - ◆ Conforto térmico e rendimento do trabalhador.
 - ◆ Aclimação de atletas e fatores que afetam a performance.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SARTORI, M. G. B., **Clima e percepção geográfica: fundamentos teóricos à percepção climática e à bioclimatologia humana**. Santa Maria. Editora Palotti. 192 p., 2014.
- [2] VECCHIA, F. **Comportamento térmico de sistema de cobertura**. São Paulo: Eternit, 2003.
- [3] CUNHA, D. G. F.; VECCHIA, F. As abordagens clássica e dinâmica de clima: uma revisão bibliográfica aplicada ao tema da compreensão da realidade climática. **Ciência e Natura**, UFSM, 29 (1): 137-149, 2007.
- [4] STEINKE, E. T. **Climatologia fácil**. São Paulo: Oficina de Textos, 144 p., 2012.
- [5] LAMBERT R., DUTRA L., PEREIRA O.R.F. **Eficiência Energética na arquitetura**. 2005.
- [6] FREITAS, R. O que é conforto. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: COTEDI, p. 726-735, 2005.
- [7] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Thermal Comfort**. ASHRAE, 55, 1992.
- [8] BOGO, A. et al. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico**. Santa Catarina: Núcleo de pesquisa em construção, Departamento de Engenharia civil, Universidade Federal de Santa Catarina, (Relatório interno), 1994.
- [9] SCARAZZATO, P.S. **Investigação sobre critérios para determinação e medição de níveis de conforto térmico**. São Paulo: FAU/USP, 1988.
- [10] MONTEIRO, M. **Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços**

abertos. 378p. Tese (Doutorado) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

[11] FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico.** 2.ed. São Paulo: Studio Nobel, 243p. 1995.

[12] RUAS, Á.C. **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificados e sua aplicação num software.** 2002. 183p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

[13] HIRASHIMA, S, Q. S. **Calibração do índice de conforto térmico temperatura fisiológica equivalente (PET) para o município de Belo Horizonte, MG.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura. 2010.

[14] HÖPPE, P. **Heat balance modelling.** *Experientia*, v. 49, p. 741-746. 1993.

[15] OKE, T.R.. **Boundary Layer Climates.** 2nd ed. New York:Methuen. 1987.

[16] YOUNG, H.D.; FREEDMAN, R.A. **Física II: Termodinâmica e Ondas.** 12ª ed. São Paulo, Addison-Wesley, 2008.

[17] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 2.** São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 4a Edição, 1996.

[18] INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **DE Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** Third Edition. John Wiley & Sons, 1990.

[19] KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor.** Ed.Edgard Blücher. Instituto nacional do livro. MEC, 1973.

[20] CALLISTER, W. **Materials Science and Engineering - An Introduction.** John Wiley & Sons, INC., 2003.

[21] CORREA, C. B. **Análisis de la Viabilidad y Comportamiento Energético de la Cubierta Plana Ecológica.** Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

[22] PAPST, A.L. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis-SC.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

[23] MORAIS, C. S. DE. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos-SP.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de São Carlos, 2004.

[24] SANTOS, D. J. P. **Desempenho térmico de uma cobertura verde num edifício solar passivo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.

[25] OLGAY, V. **Arquitetura e clima: manual de desenho bioclimático para arquitetos e urbanistas.** Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

[26] SERRA, R. **Arquitectura y climas.** Barcelona: Gustavo Gili S.A. 94p, 2002.

[27] COSTA, E.C.C. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural.** São Paulo: Edgard Blücher. p.264, 1982.

[28] DUNNETT, N.; KINGSBURY, N. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. **Urban Ecosyst**, v.11, n.4, p.385-398, Dec. 2008.

- [29] PECK, S. W.; CALLAGHAN, C; KUHN, M. E.; BASS, B. **Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion.** Canada: Mortgage and Housing, 1999.
- [30] HOLM, D. Thermal improvement by means of leaf cover on external walls – a simulation model. *Energy and Buildings*, v.14, n.1, p.19-30, Dec. 1989.
- [31] McPHERSON, E.G. Preserving and restoring urban biodiversity: cooling urban heat islands with sustainable landscapes. In: Platt, R.H.; ROWNTREE, R.A.; MUICK, P.C. (Ed.). **The Ecological city.** Amherst: University of Massachusetts Press, p.151-172, 1994.
- [32] TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v.25, n.2, p.99-103, 1997.
- [33] PÉREZ, G et al. Ensayos con arquitectura vegetada: medida experimental de la contribución de las cubiertas y fachadas verdes al ahorro energético en la edificación en España. **Seguridad y Medio Ambiente**, n.118, p.34-45, 2010. Disponível em: <https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1059105>. Acesso em: 10/10/2014.
- [34] PÉREZ, G. et al. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. **Applied Energy**, v.88, n.12, p.4854-4859, Dec. 2011.
- [35] BASS B.; BASKARAN, B. **Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas.** Ottawa: Institute for Research and Construction; National Research Council, (NRCC-46737, Project number A020, CCAF report B1046), 2003.
- [36] ACKERMAN, J. **Espaço para a alma.** National Geographic Brasil, São Paulo, n.79, p.90–95, out, 2006.
- [37] MINKE, G. **Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos.** Montevideo: Fin de Siglo, 2003.
- [38] WOLVERTON, B.C.; DOUGLAS, W.; BOUNDS, K. **A Study of interior landscape plants for indoor air pollution abatement.** Washinton: Indorr air Quality Committee, 1989.
- [39] MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J. Green wall systems: a review of their characteristics **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.41, p.863-871, Jan. 2015.
- [40] HUNTER, A.M. et al. Quantifying the thermal performance of green façades: a critical review. **Ecological Engineering**, v.63, p.102-113, 2014.
- [41] FRANCIS, R.; LORIMER, J. Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls. **Journal Environmental Management**, v.92, n.6, p.1429-1437, June 2011.
- [42] KISSMANN, K.G. **Plantas infestantes e nocivas.** São Paulo: BASF Brasileira, p.679-684, 1997.
- [43] GALLARDO, N. P. **Resposta térmica de edificações com envoltórios vegetais: cubiertas verdes y fachadas verdes.** Tese (Doutorado em Ciências) Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2017.
- [44] KOHLER, M., Green facades- A review back and some vision. *Urban Ecosyst.* Nº 11,423-436. 2008.
- [45] DUNNETT, N; KINGSBURY, N. **Planting Green Roofs and Living Walls.** Portland: Timber Press, 327p, 2008.

- [46] LAURENZ, J. et al. Natural envelope: the green element as a boundary limit. In: **THE 2005 WORLD SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE**, Tokyo, 2005.
- [47] CORRADI, L. **Hydroponic growing system**. Pat. US 20090007486, 8 Jan. 2009.
- [48] OATES, J. **Babylon**. Revised Edition. Thames and Hudson, London p. 144, 1986.
- [49] DINSDALE, S.; PEAREN, B.; WILSON, C. **Feasibility study for green roof application on queen's university campus**. Kingston: Queen's Physical Plant Services. p.58, 2006.
- [50] HURSTWICK **Turf Houses in the Viking Age**. Disponível em: <http://www.hurstwic.com/history/articles/daily_living/text/Turf_Houses.htm>, Acesso em: 15/12/2016.
- [51] MACIEL, C. A. **Vila Savoye**: arquitetura e manifesto. Vitruvius, Arqtextos, 2002, Disponível em <<<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arqtextos/02.024/785>>>. Acessado em 08/4/2016.
- [52] HENEINE, M. C. A. S. **Cobertura Verde**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- [53] DVORAK, B., VOLDER, A. Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. **Landscape Urban Planning**, 96, 197–213, 2010.
- [54] MORAN, A. C. A **North Carolina Field Study to Evaluate Greenroof Runoff Quantity, Runoff Quality, and Plant Growth**. North Carolina State University, 2004.
- [55] KÖHLER, M.; SCHMIDT, M.; LAAR, M. **Roof Gardens in Brazil. World Climate & Energy Event**. Rio de Janeiro, Brasil. p. 455-460, 2003.
- [56] DURHMAN, A. K.; ROWE, D. B.; RUGH, C.L. **Effect of Substrate Depth on Initial Growth, Coverage, and Survival of 25 Succulent Green Roof Plant Taxa**. HortScience v. 42, n. 3, p.588-595, 2007.
- [57] PLEDGE, E. Green Roofs: **Ecological Design and Construction**. Philadelphia: Shiffler. 154 p, 2005.
- [58] EMILSSON, T. **Extensive Vegetated Roofs in Sweden: Establishment, Development and Environmental Quality**. 2005a. 34f. Tese (Doutorado em horticultura) - Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science. Department of Landscape Management and Horticultural Technology Alnar. Swedish University of Agricultural Sciences. Sweden, 2005.
- [59] VECCHIA, F. **Cobertura Verde Leve (CVL): Ensaio Experimental**. In. VI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) e IV Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído (ELACAC), Maceió, AL, Brasil. p. 2146-2155, 2005.
- [60] YOK, T. P.; SIA, A. **A Selection of Plants for Green Roofs in Singapore**. Publication of National Parks Board, Singapore, 2008.
- [61] VALLS, J. F. M.; SIMPSON, C. E. **Taxonomy, natural distribution, and attributes of Arachis**. In: KERRIDGE, P. C.; HARDY, B., eds., *Biology and Agronomy of Forage Arachis*, Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Chapter 1. p. 1-18, 1994.
- [62] VALENTIM, J. F., CARNEIRO, J. da C., SALES, M. F. L. **Amendoim forrageiro cv. Belmonte: leguminosa para a diversificação das pastagens e conservação do solo no Acre, Rio Branco**. Embrapa Acre, 18p. (Circular Técnica, 43), 2001.

CAPÍTULO 5

TECNOLOGIAS E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO:

Monitoramento de
Ambientes e Aplicações
em Climatologia

Adriano Rogério Bruno Tech
Marcelo Eduardo de Oliveira
Vandoir Bourscheidt
Bruno Eduardo Teixeira
Guilherme Augusto Spiegel Gualazzi



Resumo: Um dos temas mais debatidos ultimamente, diz respeito ao bem-estar humano e animal, onde o homem busca a cada momento formas e maneiras de compreender como o processo de evolução tem comprometido o ambiente e tudo o que nele habita e, conseqüentemente, o próprio homem. Assim, a espécie humana tem procurado entender o funcionamento do globo, do meio para poder interferir de maneira a evitar maiores transtornos, em relação ao que hoje já se observa. O homem tem desenvolvido novas tecnologias tentando corrigir os danos já causados à natureza, ao meio e a ele mesmo, por meio de estudos e trabalhos científicos que visam minimizar os problemas através da utilização de Tecnologias de Informação para coletar, processar e compreender como ocorre e como essa interação pode e tem causado desconfortos a nós. A utilização de tecnologias de monitoramento tem contribuído significativamente para que possamos estudar e quantificar o meio, buscando assim, alterar um determinado ambiente ou torná-lo o mais agradável possível. O objetivo deste Capítulo é conceituar e mostrar algumas possibilidades existentes com o apoio da Tecnologia e dos Sistemas de Informação, mais especificamente aquelas voltadas para quantificar o meio em relação a algumas variáveis climáticas e, se preciso for interferir positivamente no mesmo. É relevante que se entenda que o objetivo é mostrar algumas possibilidades de monitoramento e gerenciamento de ambientes tanto indoor como outdoor.

INTRODUÇÃO

Para que se possa entender como a Tecnologia e os Sistemas de Informação podem contribuir para que o homem possa estudar e entender a natureza, alguns conceitos se fazem necessários, e dentre eles o principal é o que deu origem a Teoria Geral de Sistemas (TGS), o qual facilita a interpretação de como muitos processos ocorrem de uma maneira geral.

Para que se possa modelar um meio, independente de qual meio seja, é necessário compreendê-lo, entender o seu processo e, a partir desse, desenvolver estratégias que possam auxiliar o homem no processo de desenvolver tecnologias que possibilitem a ele diminuir ou reduzir as intempéries existentes. O termo muito utilizado em administração e em computação é o de Sistemas, tema esse que surgiu por volta de 1930, com os trabalhos desenvolvidos pelo biólogo alemão Ludwig von Bertalanffy. Sua difusão se deu a uma necessidade de síntese e integração das teorias precedentes e de suas aplicações com o meio para compreender como essas relações e interações ocorriam¹³. Muitos estudos de conforto térmico

apresentam dificuldades para a obtenção de dados meteorológicos com uma escala temporal diária, tornando a qualidade dos resultados insatisfatória. Porém, essa realidade tende a mudar uma vez que, atualmente, é possível contar com muitos pontos de observações meteorológicas além de plataformas de aquisição de dados automáticas¹.

Para Bertalanffy, Sistemas poderiam ser compreendidos como um conjunto de unidades inter-relacionadas, decorrentes do conceito de propósito (ou objeto) e o de globalismo (ou totalidade). Esses dois processos se relacionam e retratam como a interação entre eles ocorrem, resultando em uma terceira, que é a informação que se procura ou a que ficou evidenciada.

A Figura 1 descreve o conceito de Sistemas e suas inter-relações, evidenciando a troca de dados e a geração da informação que o mesmo disponibiliza.

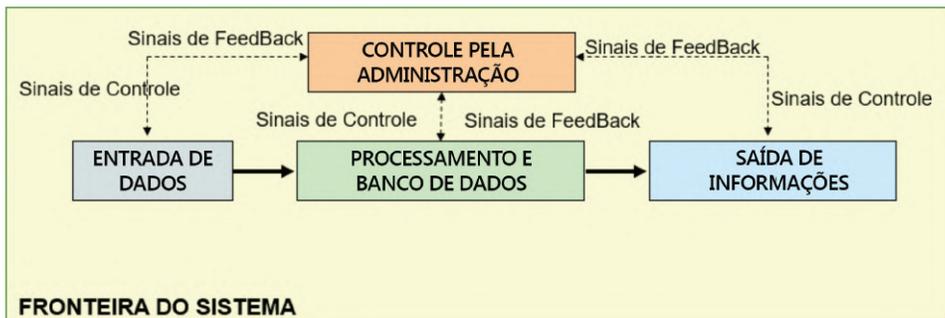


Figura 1 Conceito de Sistemas. Fonte: Adaptado de Rezende² (2000).

Esse conceito permite de uma forma simples e clara compreender como todo o processo é realizado. Assim, a compreensão se torna mais clara e fácil de ser entendida, o que permite a ampliação de seu conceito para o de Sistemas de Informação, onde um sistema (individual) pode se comunicar com outros, ou com ele mesmo, bastando para isso o simples conhecimento de que todo sistema é aberto e, que pode influenciar o seu entorno, ou seja, que a saída gerada por um sistema pode alimentar um outro sistema diferente ou a ele mesmo. Com esse conceito evidenciado e bem compreendido, podemos entender como a programação de computadores ou a criação de *softwares* acontecem.

Os analistas antes de conceberem um produto final, ou um *software* propriamente dito, realizam um estudo profundo para melhor entender como todo o fluxo de dados ocorre e como ele interage com os demais processos existentes no meio em modelagem.

Para que o analista possa modelar um sistema, independente de qual sistema seja, existem na literatura vários conceitos ou metodologias de análise, desde as mais simples até as mais complexas, passando de um simples fluxograma e chegando em uma Modelagem de Orientação a Objeto, por meio da Metodologia UML, onde os analistas criam cenários que irão representar o processo em construção (modelo real) por meio de diagramas inter-relacionados, como *Use Cases*, Diagramas de Classe, de Objetos, de Impressão, de Atividades dentre outros, criando assim, o modelo virtual de representação da realidade (modelo real).

Uma vez familiarizado com os conceitos básicos a próxima etapa consiste em entender que as entradas do processo são captadas basicamente de duas formas, ou seja, o sistema pode ser alimentado manualmente ou de forma automatizada; quando alimentado de forma manual o sistema permite que o usuário acesse o sistema e insira os dados de entrada solicitados, já no modo automático tem-se o auxílio das tecnologias que percebem o meio e que alimentam o sistema através deles. Dentre essas tecnologias encontra-se os sensores que percebem o meio e realizam o *input* (entrada) no sistema, para que ele possa processá-lo e, de acordo com esse processamento, conferir uma saída (resultado), que irá ou não ativar algum outro processo.

É dessa maneira que, basicamente, o homem trabalha no seu dia a dia, percebendo o meio e interagindo com ele através de seu conhecimento, ou como comumente chamamos, de seu Modelo Mental.

A seguir, alguns exemplos de sensores disponíveis no mercado e que podem contribuir para a implementação de soluções que permitam interagir com o meio em que vivemos e que são muito úteis nas áreas de climatologia e ambiência. O objetivo aqui não é torná-los *experts* em computação ou eletrônica e, sim, introduzi-los aos conceitos básicos usados na área de automação de ambientes produtivos.

As aplicações com sensores vão desde simples coleta de luz, som, até os complexos sistemas de coleta de dados do ambiente, com a interação de mais de um sensor.

Duas das áreas que mais utilizam esses conceitos e aplicações são a Mecatrônica e Robótica, onde o uso de sensores é muito interessante. Por meio deles é possível fazer a leitura de determinadas características do ambiente, tais como a ausência de luz, presença de um obstáculo no caminho de um *drone* ou VANT (Veículo Aéreo Não-Tripulado), medir a temperatura de um ambiente, e responder, ainda, a essa interação interferindo no meio onde estão inseridos. De uma forma simples, pode-se entender um sensor

como um dispositivo que responde a um estímulo físico ou químico de maneira específica e mensurável analógica ou digitalmente³.

Os sensores podem ser classificados como um tipo de transdutor. Um transdutor nada mais é do que um componente que consegue transformar um tipo de energia em outra. Como exemplo, vamos imaginar um motor automotivo: ele consegue transformar energia química ou elétrica em energia mecânica. Porém, um sensor também pode ser compreendido como um transdutor específico, o qual converte algum tipo de energia (luz, calor, movimento) em energia elétrica, muito utilizada para coletar dados de um ambiente³.

Muitos desses sensores são usados para mensurar algo no ambiente e, dentre eles se destacam o sensor de iluminação, conhecido como LDR (Resistor Dependente de Luz), isso significa que, quanto mais luz no ambiente monitorado, mais baixa será a resistência por ele medida. Ou seja, se tivermos um alto índice de iluminação no ambiente este sensor irá retornar um valor baixo de resistência e vice-versa (Figura 2).

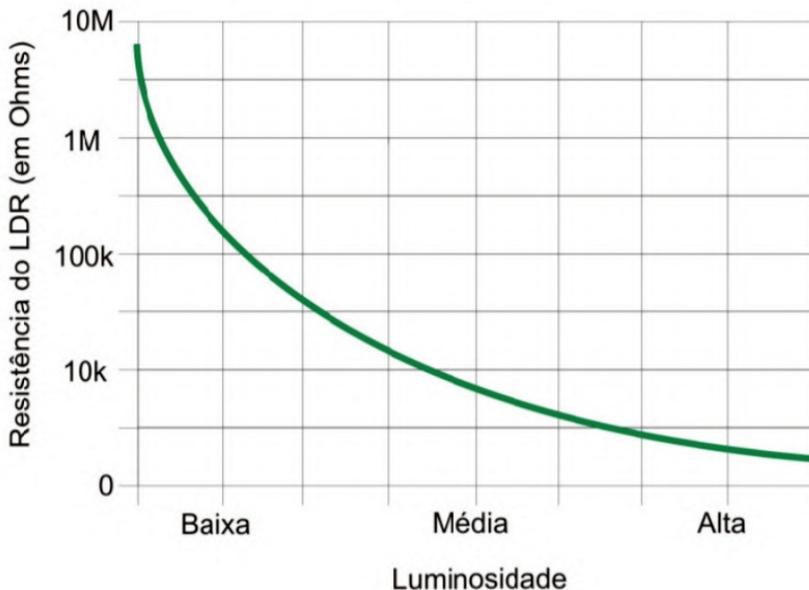


Figura 2 Gráfico da resposta do LDR. Fonte: Pakto³ (2017).

Outro sensor muito utilizado para monitorar o ambiente é o termistor, um componente utilizado para medir as variações de temperatura e que possui o mesmo princípio do LDR. Existem dois tipos de termistores: o NTC

(Coeficiente de Temperatura Negativa) e o PTC (Coeficiente de Temperatura Positiva), que são classificados de acordo com sua resposta em relação à temperatura (Figura 3).

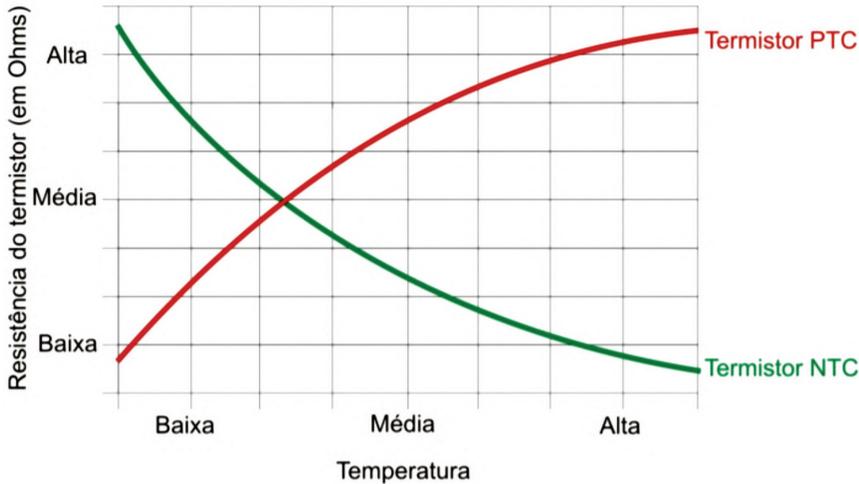


Figura 3 Gráfico da resposta dos termistores NPC e PTC. Fonte: Pakto ³ (2017).

Um aspecto importante durante a utilização do termistor é observar a faixa limite de operação, que varia de acordo com o fabricante e é recomendado não expor o componente a temperaturas maiores que 100° C, limite este de alguns componentes disponíveis no mercado³.

Entendido como funciona o sistema de aquisição de dados por meio de sensores, torna-se mais simples compreender como atuar sobre o ambiente monitorado através dos atuadores, que nada mais são do que sistemas que permitem ao homem atuar sobre o meio. Como exemplos pode-se citar os ventiladores, aquecedores, nebulizadores, totens de aquecimento, cortinas automatizadas, sistemas de alimentação, dentre outros.

Esses sistemas vão atuar após o processamento dos dados de entrada (sensores), que são interpretados ou mesmo processados, mediante um modelo matemático (na maior parte das vezes) e, uma vez processados resultaram em um valor que, de acordo com os parâmetros do meio em monitoração ativaram ou não os sistemas atuadores (saídas).

A Figura 4 mostra a interação *hardware / software* de um sistema controlado por um micro controlador, que é uma espécie de computador em escala bem menor, mas que desempenha sua tarefa de forma autônoma. Muito utilizado em sistemas de automação de ambientes e muito difundido agora

através da tecnologia *Arduino*, que evidencia de forma clara a relação entre micro controlador, entrada e saída de dados, por meio de sensores e atuadores de ambiente.

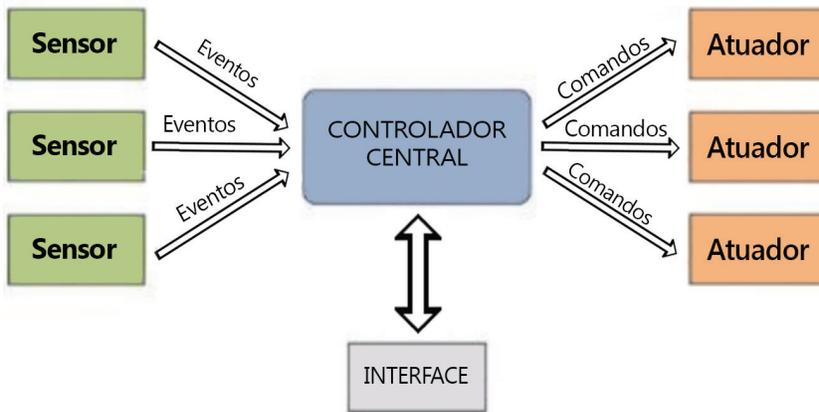


Figura 4 Arquitetura de um sistema microcontrolado. Fonte: Ferreira⁴ (2017).

O importante nesse início é verificar que todo o processo em descrição é baseado no Teoria de Sistemas, não diferindo quase em nada dele. Isso facilita o aprendizado por parte dos estudantes que passam a entender de maneira simples como os analistas e engenheiros trabalham na construção de sistemas de automação. É lógico, que esses sistemas podem se tornar tão complexos quanto o meio em análise.

Para a manipulação desses dados (entrada, processamento e saída), torna-se necessário a construção de programas e circuitos que possam atuar de maneira autônoma no meio. E, para que isso ocorra, é necessário que sejam implementados em uma linguagem de programação e possam ser inseridos em um sistema de controle (micro controlador), por meio de circuitos integrados.

ARDUINO UNO

Inicialmente, é necessário entender o que é *Arduino* e para o que ele foi desenvolvido. O *Arduino* foi inicialmente projetado como um recurso para auxiliar estudantes e profissionais em seus projetos de pesquisa automatizados, em sistemas simples. Entretanto, em 2005, ele foi lançado comercialmente, tornando-se um produto de sucesso entre fabricantes, profissionais e estudantes, devido a sua fácil utilização e durabilidade.

Manipular circuitos, implementar e confeccionar placas cobreadas não é uma tarefa muito fácil e traz muitas dificuldades para quem não é da área da mecatrônica, robótica, computação ou mesmo da área de análise de sistemas. Assim, foram implementadas tecnologias que simulam um computador em dimensões menores, bem menores e que permitem, via programação e componentes eletrônicos operacionalizar algumas funções básicas e muitas vezes complexas.

De uma maneira bem simples, pode-se entender *Arduino* como sendo “uma plataforma *open-source* de prototipagem eletrônica com hardware e *software* flexíveis e de fácil uso, destinado a artistas, *designers*, *hobbyistas* e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos, de maneira simples e rápida”, ou seja, é uma plataforma formada basicamente por dois componentes: a Placa e a IDE (*Integrated Development Environment*). A placa pode ser entendida como o *hardware* do sistema e que será estruturada para receber os projetos que serão desenvolvidos e o IDE, que nada mais é que o *software* que irá operacionalizar o *hardware*, como um computador⁵.

Atualmente, existem diversas placas de *Arduino*, sendo a escolhida para o projeto o *Arduino Uno*. A Figura 5 mostra uma placa *Arduino Uno*.

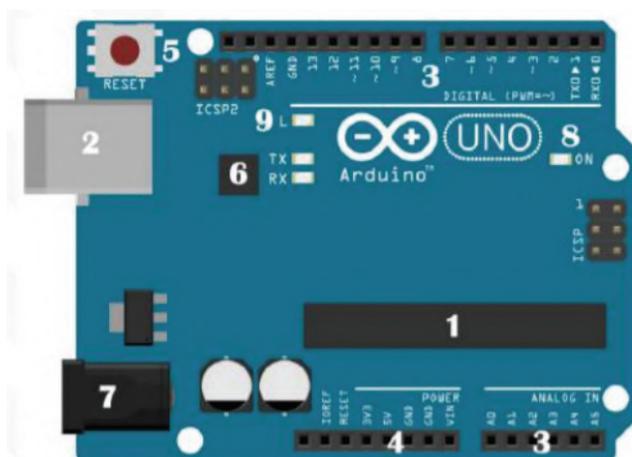


Figura 5 *Arduino Uno*. Fonte: Vidadesilicio⁵ (2017).

Os componentes básicos do *Arduino* são:

1. **Micro controlador:** é responsável por processar o *software* e manipular as portas de entrada e saída. É o cérebro do sistema e funciona como um computador dentro de um pequeno *chip*.

2. **Conector USB:** é responsável por conectar a placa ao computador e, por onde ocorre a transferência do programa implementado para dentro da placa (do circuito).
3. **Pino de Entrada e Saída de dados:** é responsável por fazer com que a placa possa se comunicar com o ambiente externo. O *Arduino* possui 14 portas digitais, 6 pinos de entrada analógica e 6 pinos de saída analógica (PWM).
4. **Pinos de alimentação:** é responsável por fornecer diversos valores de tensão e são responsáveis por energizarem os componentes do projeto.
5. **Botão Reset:** é o responsável por reiniciar ou *resetar* a placa.
6. **Conversor Serial-USB e LEDs TX/RX:** é o responsável pela comunicação entre o computador e o micro controlador, sendo necessário um *chip* que faça a tradução de comunicação de um para o outro. O LED Tx/Rx acende quando alguma transmissão ou recepção está sendo realizada pela porta serial.
7. **Conector de Alimentação:** é o responsável por receber a fonte de alimentação externa e que pode ter uma tensão que varia de 7 a 20 *volts* e uma corrente mínima de 300 mA. Recomenda-se uma voltagem de 9 V.
8. **LED de Alimentação:** indica se a placa está energizada.
9. **LED Interno:** LED conectado ao pino digital⁵.

A próxima etapa está ligada a IDE do *Arduino*, responsável pela programação do micro controlador, ou seja, é o ambiente de desenvolvimento dos projetos confeccionados e que serão gerenciados pelo *Arduino* e armazenados no micro controlador. Uma das grandes facilidades dessa IDE é seu ambiente de programação que é baseada na linguagem C/C++. A Figura 6 mostra a IDE de programação do *Arduino*.

O *software*, que é a IDE propriamente dito, ou seja, o ambiente de desenvolvimento do programa que será responsável por gerenciar e dar funcionalidade ao circuito, é implementada e executada em um computador (programação), conhecida como *sketch*, que após concluída será transferida via *upload* para a placa de prototipagem *Arduino*, através de uma comunicação serial. O *sketch implementado pelo analista* diz ao sistema ou à placa o que deve ser executado durante o seu funcionamento.

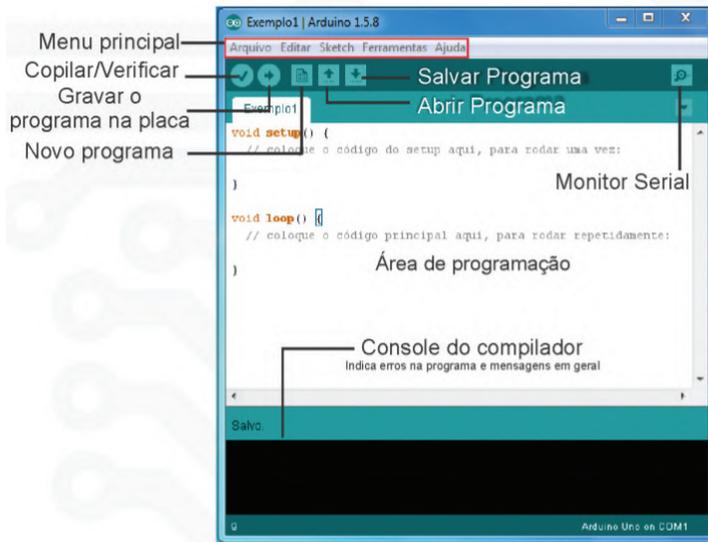


Figura 6 Ambiente de desenvolvimento do *Arduino* (IDE). Fonte: Vidadesilicio⁵ (2017).

A IDE possui uma linguagem própria baseada na linguagem C e C++, como já descrito. O ciclo de programação pode ser compreendido da seguinte maneira:

1. Conexão da placa a uma porta USB do computador.
2. Desenvolvimento de um *sketch* com comandos para a placa.
3. *Upload* do *sketch* para a placa, utilizando a comunicação USB.
4. Aguardar a reinicialização, após ocorrerá a execução do *sketch* criado.

A partir do momento que foi feito o *upload*, o *Arduino* não precisa mais do computador: o *Arduino* executará o *sketch* criado, desde que seja ligado a uma fonte de energia (entre 9 e 12 volts).

APLICAÇÕES EM MONITORAMENTO DE AMBIENTES

Para facilitar ao leitor como ocorre a construção de um projeto, será apresentado de forma sucinta, um pequeno sistema de permite monitorar temperatura e umidade em tempo real. Aqui, o objetivo é mostrar a ligação dos componentes de maneira simples.

Inicialmente, é necessário entender como o processo ocorre, de acordo com o que visto no item 1, relacionado ao que é um Sistema e toda a sua interação com a entrada, processamento e saída de dados. Para que se possa coletar dados do ambiente, deve-se buscar na literatura, ou mesmo na internet, fabricantes que trabalhem com sensores de temperatura e umidade, podendo

encontrar vários, inclusive com sensores trabalhando independentemente, mas, neste caso, será usado o sensor digital DHT11 (*Digital Humidity and Temperature Sensor*), que mede temperatura e umidade relativa do ar ao mesmo tempo, economizando assim, uma porta no *Arduino*.

É importante frisar que, em programação tem-se a facilidade de inclusão de bibliotecas que já trazem em seu código a maneira de manipular determinados componentes, e, nesse caso, a sua importação torna a operacionalizado do software mais amigável e fácil, inserindo-a no código de programação que será executada no micro controlador. A Figura 7 mostra o sensor DHT11.

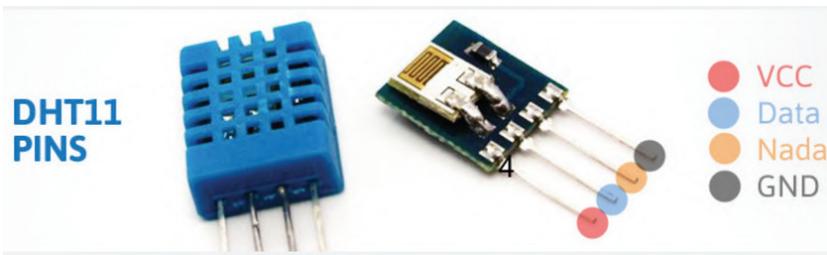


Figura 7 Sensor digital DHT11. Fonte: Wikipedia⁶ (2017).

O próximo passo, diz respeito à montagem do circuito e programação do código fonte na IDE, com futura transferência do código para o microcontrolador. A Figura 8 mostra a ligação do sensor com a placa *Arduino*.

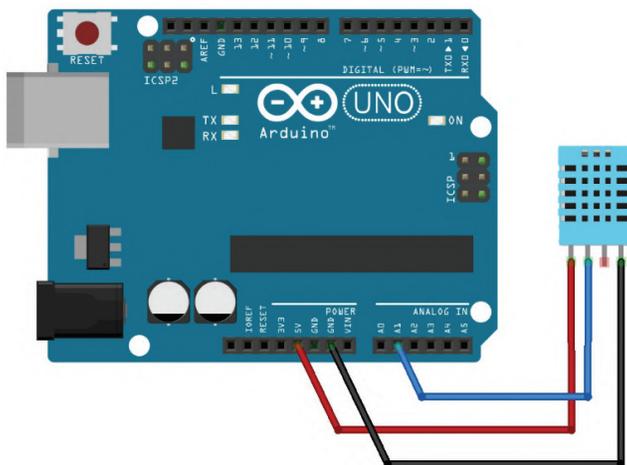


Figura 8 Ligação do Sensor digital DHT11 com a placa *Arduino* UNO. Fonte: Vidadesilicio⁵ (2017).

Agora, o próximo passo é implementar o código que irá processar e interpretar os dados provenientes do sensor e, torná-lo visível ao usuário. Nesse exemplo, será inserido o *display*, responsável por mostrar os valores de temperatura e umidade, conhecido como *display* LCD.

A Figura 9 ilustra o código que dá operacionalidade ao sistema de monitoramento de ambiente proposto ⁶.

```

1 //Programa: Sensor de Humidade e Temperatura DHT11
2
3 #include <dht.h> //Inclusão da biblioteca
4 #define dhtpin A1 //Constante
5
6 dht DHT; //Inicializa o sensor
7
8 void setup()
9 {
10     Serial.begin(9600);
11     delay(1000); //Delay para o início da execução do programa
12 }
13
14 void loop()
15 {
16     DHT.read11(dhtpin); //Lê as informações do sensor
17
18     Serial.print("Umidade: "); //Impressão na saída serial
19     Serial.print(DHT.humidity);
20     Serial.print(" % ");
21     Serial.print("Temperatura ");
22     Serial.print(DHT.temperature);
23     Serial.println(" Celsius ");
24     delay(2000); //Delay de dois segundos entre as leituras da informa
25 }
26
27 //Fim do programa

```

Figura 9 Código fonte do programa de coleta de temperatura e umidade. Fonte: ⁶

Na aplicação 2, o foco é trabalhar com um projeto envolvendo sensor de luminosidade (LDR), e para isso, será usada uma *protoboard*, que irá auxiliar na montagem do projeto. Para a confecção do projeto, os seguintes componentes são necessários: 1 placa *Arduino* R3, 1 *protoboard*, 1 LDR (Resistor Dependente de Luz), 1 LED vermelho, 1 LED amarelo, 1 LED verde, 3 resistores de 330 ohms, 1 resistor de 10k ohms e fios de *jumpers* para que possamos fazer as ligações entre os componentes e a *protoboard*. Cabe aqui uma ressalva, os 3 resistores de 330 ohms podem variar de acordo com o tipo de LED usado. Para isso, verifique essas informações no momento da compra dos componentes (<http://facacomarduino.info/projeto-5-sensor-de-luminosidade-com-ldr.html>).

Antes de iniciar a montagem, verifique se o *Arduino* está desligado e tome cuidado na hora de montar o projeto para evitar danos à placa. O próximo passo é conectar os componentes à *protoboard* e à placa do *Arduino*, como mostra a Figura 10.

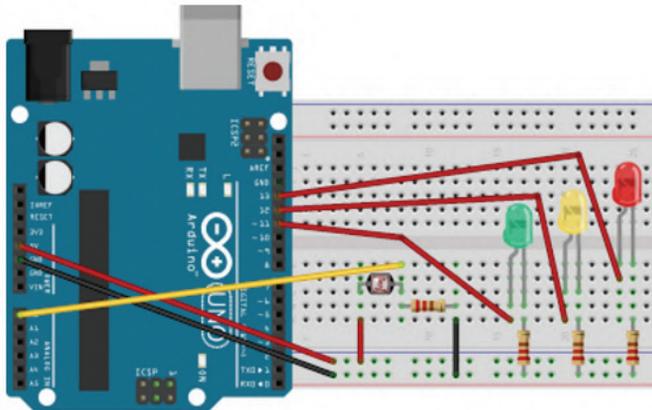


Figura 10 Montagem completa do projeto para verificar luminosidade. *Fonte:* Wikipedia⁶ (2017).

Não se preocupe com as cores dos jumpers, o importante é realizar a montagem de acordo com a Figura 10. Agora, só resta implementar o código na IDE e transferi-la para o microcontrolador para que o sistema passe a funcionar.

Código fonte ⁶:

// Projeto - Sensor de luminosidade com LED's

// Define o pino analógico A0, onde será lido o valor do sensor

```
int sensorAnalogPin = 0;
```

// Define uma variável qualquer para armazenar o valor lido do pino A0

```
int armazenaValor = 0;
```

// Definindo pinos onde estão conectados os LED's

```
const int ledVerde = 11;
```

```
const int ledAmarelo = 12;
```

```
const int ledVermelho = 13;
```

```
void setup(){
```

```
// Ativando o serial monitor que exibirá os valores lidos no sensor
```

```

Serial.begin(9600);

// Definindo pinos digitais dos LED's como de saída
pinMode(ledVerde,OUTPUT);
pinMode(ledAmarelo,OUTPUT);
pinMode(ledVermelho,OUTPUT);
}

void loop(){
// Faz a leitura da porta analogica A0 e armazena na variável armazenaValor
int armazenaValor = analogRead(sensorAnalogPin);

//Os valores da luminosidade podem ser alterados conforme a necessidade
//Luminosidade baixa
if (armazenaValor < 600) {
  apagaLeds();
  digitalWrite(ledVermelho,HIGH);
}

// Luminosidade média
if (armazenaValor >= 600 && valorSensor <= 850) {
  apagaLeds();
  digitalWrite(ledAmarelo,HIGH);
}

// Luminosidade alta
if (armazenaValor > 850) {
  apagaLeds();
  digitalWrite(ledVerde,HIGH);
}

// Exibindo o valor do sensor no serial monitor.
Serial.print("Lendo valor... "); // Imprime no monitor serial
Serial.println(valorSensor); // Mostra o valor lido pela porta serial
delay(1000);
}

// Está função criada para apagar todos os leds de uma vez
void apagaLeds() {
  digitalWrite(ledVerde,LOW);
  digitalWrite(ledAmarelo,LOW);
  digitalWrite(ledVermelho,LOW);
}

```

PROGRAMAÇÃO *PYTHON* APLICADA À CLIMATOLOGIA

Este tópico aborda a aplicação da computação científica por meio da linguagem *Python* para a manipulação de dados climáticos. Inicialmente são abordados alguns conceitos básicos importantes sobre o uso de linguagem de programação. Em seguida, é feita uma breve apresentação tanto da linguagem *Python* quanto da instalação do ambiente e bibliotecas necessárias. Finalmente, destaca-se seu uso nos estudos climáticos, com dois exemplos (que poderão ser executados) de aplicações úteis no dia a dia de alunos de graduação e pós-graduação nas diferentes áreas

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, o uso de técnicas computacionais e *softwares* se tornou rotineiro no meio acadêmico. No entanto, nem sempre estes *softwares* realizam as operações específicas da forma que os usuários gostariam. Além disso, muitas vezes os usuários de *softwares* ficam dependentes de treinamento sobre a execução das ferramentas existentes e acabam assimilando apenas os roteiros de execução, sem compreender a fundo o funcionamento da ferramenta. Essa compreensão, contudo, pode ser decisiva para garantir que a aplicação de determinada técnica seja eficaz e/ou eficiente.

Nesse sentido, tem-se incentivado os alunos de graduação e pós-graduação, nas mais diferentes áreas do conhecimento, a que tenham um mínimo de contato com linguagens de programação^{7,8,9}. O desenvolvimento da linguagem *Scratch*¹⁰ pelo *Lifelong Kindergarten Group* do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) pode ser considerado um exemplo desse incentivo, visto que é possivelmente a ferramenta atual mais amigável para que diferentes usuários possam aprender os princípios básicos da lógica estruturada e programação¹¹.

Boa parte das linguagens de programação adotadas atualmente no meio acadêmico (por exemplo, nas ciências ambientais e atmosféricas) são as chamadas de alto nível, sendo essas proprietárias ou de código livre (*R*, *Python*, *Matlab*, etc.). Essas linguagens têm por principal característica a facilidade de interpretação dos roteiros ou *scripts* pelos usuários. Logo, com algum conhecimento básico de lógica estruturada, torna-se relativamente simples apreender e utilizar a programação para facilitar a preparação e a

análise de dados, principalmente nos casos em que as análises são sistemáticas e repetitivas.

Outra característica importante de linguagens como o *Python* é sua integração com os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), amplamente utilizados nas Geociências, na Ecologia, etc., com diversas ferramentas desenvolvidas com as mais variadas finalidades: desde a implantação de modelos hidrológicos até a ecologia de paisagens^{11,12,13,14}.

Na Climatologia, pensando em uma perspectiva meteorológica, a abordagem computacional pode ser entendida como inerente, especialmente ao se observar o desenvolvimento dos modelos meteorológicos e climáticos existentes. Sobre a perspectiva geográfica, por outro lado, também se tem apontado a importância do conhecimento de linguagem de programação para realizar análises dos dados¹⁵. É nesse sentido que este material pretende contribuir.

A fim de apresentar de forma básica e simplificada o potencial das linguagens, este tópico pode ser dividido em dois momentos. Primeiramente, são abordados aspectos específicos sobre a linguagem a ser adotada (*Python*), com apresentação do ambiente de execução e de procedimentos para instalação do *software* e das principais bibliotecas. Em seguida, são apresentadas duas análises específicas sobre alguns dados de estações meteorológicas: (1) um roteiro para extrair dados semelhantes em diferentes bancos de dados e (2) outro para realizar análises específicas sobre séries temporais de dados.

Computação Científica com *Python*

Python é uma linguagem livre que conta com grande número de usuários. Conforme levantamento¹⁶, a maioria das melhores universidades americanas utiliza *Python* como sua linguagem de introdução à Ciência da Computação, o que facilita enormemente o desenvolvimento de algoritmos específicos, pois os usuários compartilham bibliotecas e suas respectivas documentações. Essas bibliotecas são basicamente *scripts* desenvolvidos por outros usuários que podem ser integrados a novos algoritmos. Para exemplificar, pode-se pensar no cálculo do desvio-padrão de uma série de dados: é possível implementar uma função para fazer esse cálculo, mas é mais eficiente utilizar bibliotecas preexistentes, como a biblioteca *Numpy*, para realizar tal operação. Além disso, por ser uma linguagem interpretada, não há necessidade de compilar o código, de modo que os resultados podem ser exibidos imediatamente após a execução dos comandos, agilizando o desenvolvimento das rotinas.

Dessa forma, têm-se a produtividade com o *Python* como uma das grandes vantagens da linguagem. Para um aprofundamento sobre a linguagem *Python*, uma boa leitura que pode ser indicada é o *ebook*¹⁷, que avança sobre a linguagem com diversos exercícios, juntamente com uma discussão mais detalhada sobre a computação científica.

Ambientes para execução do Python

Assim como a maior parte das linguagens de programação baseadas em *software* livre, o *Python*, em si, não possui interface amigável como outras linguagens, conforme a comparação com o *Matlab*¹, que pode ser vista na Figura 11. Contudo, isso não é mais um fator limitante. Para tornar a programação por meio do *Python* mais amigável, é possível instalar *softwares* específicos como o *Anaconda* ou o *Enthought Canopy*, o qual é interessante por ter uma versão acadêmica que incorpora ferramentas de *debug*, que facilitam significativamente a análise dos códigos e a avaliação dos resultados obtidos em cada etapa de execução. Além disso, a versão acadêmica ainda conta com treinamento gratuito sob demanda (em língua inglesa).

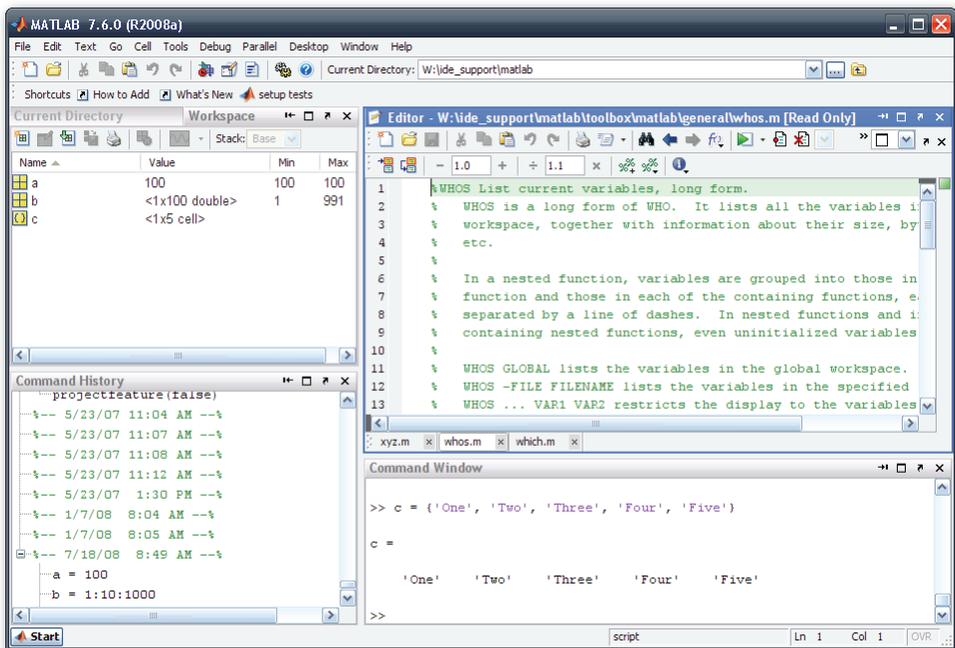
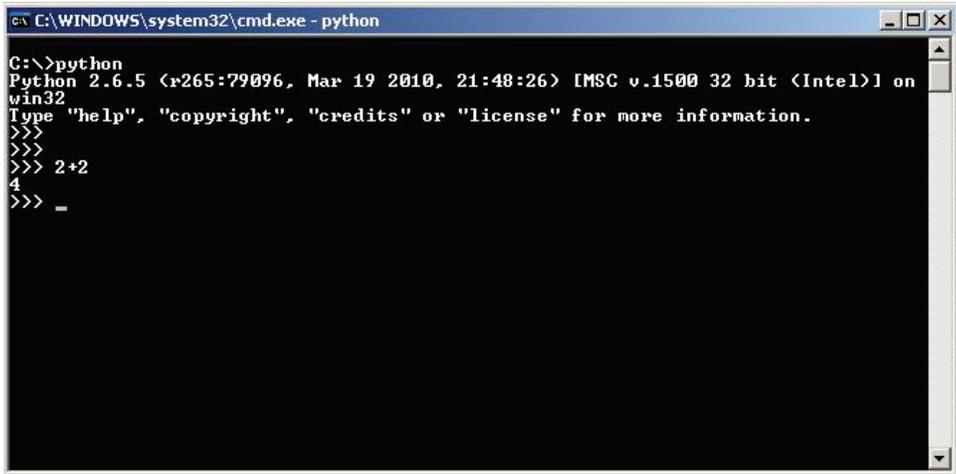


Figura 11a Comparação entre as interfaces do *Matlab* e do *Python* (na sua forma mais básica). Fonte: Matlab Community Blog¹⁷.



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe - python

C:\>python
Python 2.6.5 <#265:79096, Mar 19 2010, 21:48:26> [MSC v.1500 32 bit <Intel>] on
win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>>
>>>
>>> 2+2
4
>>> _

```

Figura 11b Comparação entre as interfaces do *Matlab* e do *Python* (na sua forma mais básica). Fonte: Elaborado pelos autores.

Esse é o ambiente utilizado nas atividades desenvolvidas neste capítulo. Sua instalação é simples e, para ter acesso a versão acadêmica, deve ser realizado cadastro por meio do endereço <https://store.enthought.com/licenses/academic/> com uma conta institucional (email@ies.br). Em seguida, é necessário confirmar a licença enviada para o e-mail cadastrado e, depois de concluir a instalação do *software*, realizar o *login* na tela inicial do *Canopy* (Figura 2).

Maiores detalhes sobre o procedimento de instalação do *Canopy* podem ser encontrados no site, com um passo a passo detalhado para a instalação no *Windows* (http://docs.enthought.com/canopy/quick-start/install_windows.html).

Outra facilidade do ambiente *Canopy* é na instalação de bibliotecas ou pacotes. A versão acadêmica possui, além das bibliotecas consideradas essenciais (*Matplotlib*, para visualização e plotagem uma grande quantidade de pacotes adicionais que podem ser instalados, como por exemplo, *Basemap* (para visualização e preparação de mapas), *Pandas* (pacote para manipulação de dados tabelados), entre outros. A instalação é simplificada através de uma interface, conforme explicado na próxima seção (Figura 12).

Além disso, no caso de possuir acesso acadêmico, também fica disponível ao usuário o serviço de treinamento sob demanda, que possui uma gama enorme de vídeo-aulas e tutoriais (com exemplos práticos para serem desenvolvidos) sobre o ambiente *Canopy*, sobre a linguagem *Python* e sobre as suas principais bibliotecas (*numpy*, *scipy*, etc.).

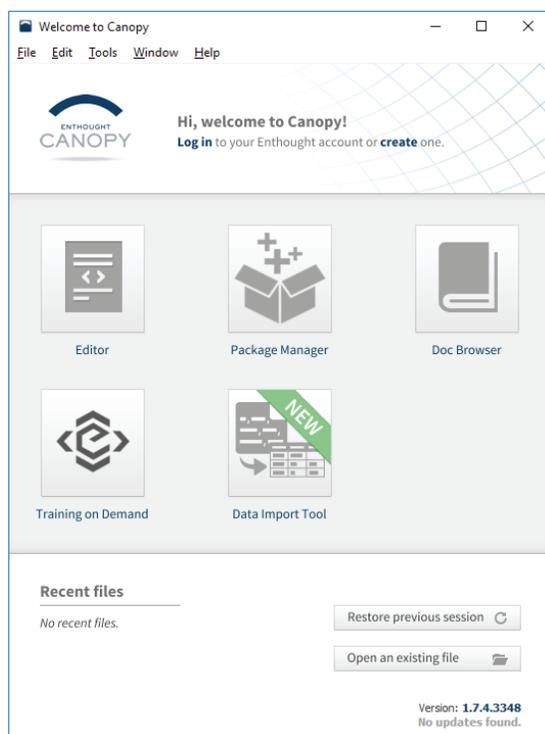


Figura 12 Tela inicial do *Canopy* com os principais componentes: editor de *scripts*, gerenciador de pacotes e o treinamento sob demanda. *Fonte: Interface Canopy.*

A Figura 13 mostra um exemplo da janela principal do editor de *scripts*. As diferentes operações com o *script* de exemplo são realizadas na barra superior, que permite, entre outras funcionalidades, salvar (a), executar (b), executar a seleção (c), exibir janela de debug (d) e executar com *debug* (e). A janela (C) só irá aparecer quando a opção de *debug* estiver ativa (letra d). Com a ativação desse recurso, é possível executar o código até um certo ponto, indicado pelo círculo vermelho na Figura 13. Para realizar a execução do código com *debug* deve se usar o botão (e) ao invés do (b). Para inserir o ponto de parada de execução, basta dar um duplo clique sobre o espaço em branco ao lado da numeração das linhas do *script*.

Os comandos também podem ser executados diretamente na janela de comandos (B), sem a necessidade de preparar um *script*. Essa funcionalidade auxilia na elaboração do *script*, pois permite ao usuário ir realizando testes sobre cada etapa do código, o que agiliza o desenvolvimento dos roteiros ou códigos.

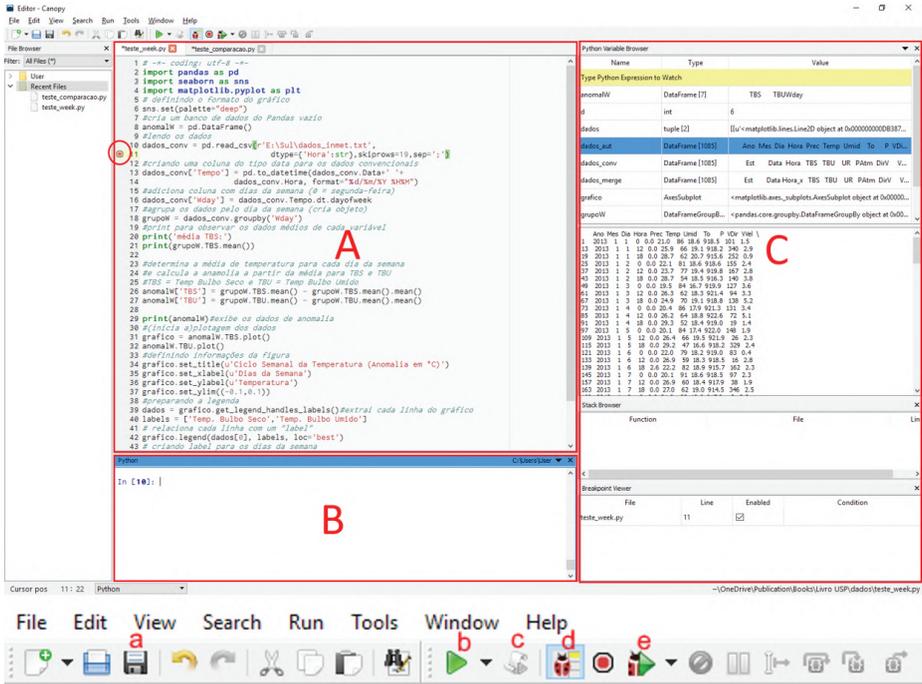


Figura 13 Editor principal do *Enthought Canopy*, com a janela para edição de *scripts* (A), o console para execução de comandos (B) e a aba com ferramentas de *debug* (C). Na base está um destaque sobre o menu superior, com as funcionalidades básicas e ferramenta de *debug* (destaques pelas letras minúsculas). *Fonte:* Elaborado pelos autores.

Bibliotecas pré-existent

Há diversas bibliotecas disponíveis, que podem ser importadas ou instaladas junto com o ambiente Canopy. Se um usuário tem interesse em trabalhar com operações simbólicas (como, por exemplo, descobrir a derivada da equação $2x^2 + 3x$), é necessário instalar a biblioteca chamada *sympy*. Se pretende criar gráficos e procura uma opção mais avançada em relação ao pacote básico do *Matplotlib* (outra biblioteca), sugere-se instalar o pacote *seaborn*, destacado no exemplo da Figura 14. Esse pacote será necessário para executar o *script/comandos* do segundo exemplo a ser apresentado na seção 3.2.

ANÁLISE DE DADOS CLIMÁTICOS COM PYTHON

Com o *software* e as bibliotecas instalados, pode-se desenvolver roteiros de interesse de cada usuário, que podem ir desde a simples leitura de um arquivo até a execução de avançados modelos matemáticos, integrando diversas bibliotecas.

Este material visa possibilitar que qualquer pessoa possa aprender rapidamente as bases da linguagem *Python* com exemplos práticos sobre dados climáticos. Para tanto, nesta seção, são apresentadas duas rotinas específicas baseadas em dados do INMET: uma para relacionar dados de diferentes tipos de estações utilizando um atributo semelhante (data e hora); e outra para analisar variações cíclicas em séries temporais. Nos dois exemplos, gráficos são gerados ao final das rotinas para facilitar a assimilação do que foi realizado. Porém, antes de iniciar a análise, é apresentado um roteiro para realizar o *download* dos dados climáticos.

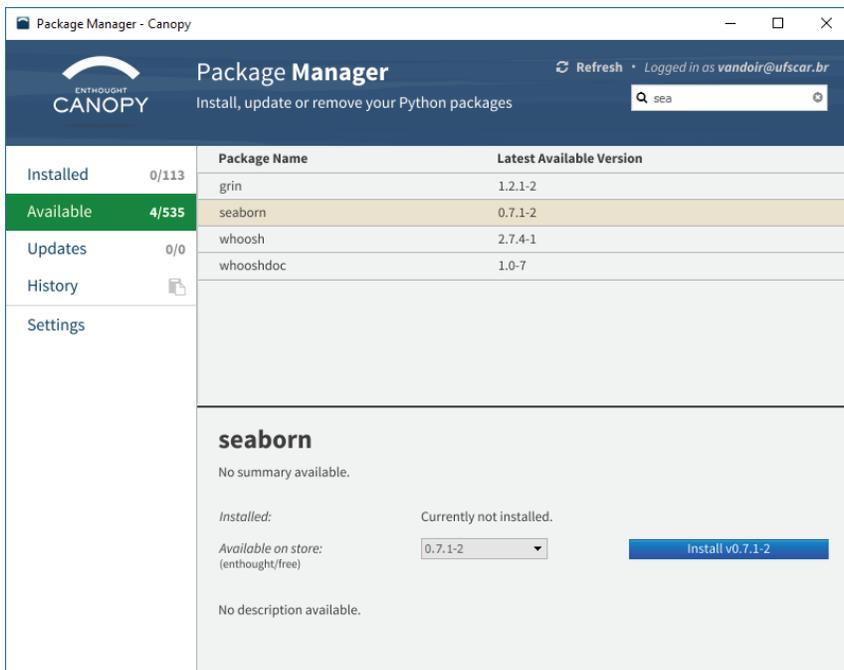


Figura 14 Gerenciador de pacotes do *Canopy*. Basta realizar uma busca de um pacote específico (ex. *seaborn*) e realizar a sua instalação (botão azul). *Fonte:* Interface *Canopy*.

Obtenção de dados de estações

O primeiro passo é ter acesso aos dados históricos do INMET (BDMEP). Para isso, basta acessar o site do INMET em Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>, realizar o cadastro e posteriormente realizar o *login*. Os dados históricos estão organizados no formato ASCII com algumas linhas de cabeçalho, conforme o exemplo:

```

-----
BDMEP - INMET
-----
Estação      : SAO CARLOS - SP (OMM: 83726)
Latitude (graus) : -21.96
Longitude (graus) : -47.86
Altitude (metros): 856.00
Estação Operante
Início de operação: 24/09/1939
Período solicitado dos dados: 01/01/1950 a 31/12/2016
Os dados listados abaixo são os que encontram-se digitados no BDMEP
Hora em UTC
-----
Obs.: Os dados aparecem separados por ; (ponto e vírgula) no formato txt.
      Para o formato planilha XLS, siga as instruções
-----
Cabeçalho completo:
Estacao;Data;Hora;TempBulboSeco;TempBulboUmido;UmidadeRelativa;PressaoAtmEstacao;DirecaoVento;VelocidadeVento;Nebulosidade
Cabeçalho simplificado:
Est;Data;Hora;TBS;TBU;UR;PAtm;DirV;VelV;Neb;
83726;01/01/1961;1200;20.6;19.9;94;914.4;36;3;7;
83726;01/01/1961;1800;22.4;21;88;912.6;32;3;8;
83726;02/01/1961;0000;20.4;20;96;913;27;2;8;
83726;02/01/1961;1200;20.2;20;98;913.5;5;5;8;
.....

```

Para obter dados de estações automáticas, pode-se realizar o *download* diretamente do *site* (onde é possível obter dados para o ano), ou solicitá-los através de *e-mail*, no caso de dados para um período mais longo. Os dados obtidos no site também são disponibilizados no formato ASCII, com um cabeçalho mais simples (exemplo para a estação automática do INMET em São Carlos):

```

codigo_estacao,data,hora,temp_inst,temp_max,temp_min,umid_inst,umid_max,umid_min,pto_orvalho_inst,pto_orvalho_max,pto_orvalho_min,pressao,pressao_max,pressao_min,vento_direcao,vento_vel,vento_rajada,radiacao,precipitacao
A711,12/03/2016,12,23.0,23.4,22.1,67,75,67,16.5,17.8,16.5,919.9,919.9,919.5,0.9,259,////,1284.,0.0
A711,12/03/2016,13,24.2,25.0,23.0,63,69,61,16.6,17.7,16.0,920.2,920.2,919.9,1.0,6,3.1,2338.,0.0
A711,12/03/2016,14,24.3,25.2,23.6,67,68,63,17.8,18.7,16.4,920.1,920.2,920.1,1.8,358,4.4,2266.,0.0
.....

```

As informações das estações automáticas não estão disponíveis no BDMEP. Para facilitar o desenvolvimento das atividades previstas, foram disponibilizados dois exemplos de bancos de dados que estão em uma pasta compartilhada do Onedrive, no endereço <https://1drv.ms/f/s!AgovI-C8Ry7NgZ4-EXbpxyEh9xhQ9g>.

Exemplos de rotinas

Dois exemplos de rotinas são apresentados. O primeiro, cujo código pode ser observado na Figura 15, utiliza principalmente a biblioteca *Pandas* para comparar dois conjuntos de dados meteorológicos distintos (estação automática, em intervalo horário, e estação convencional, em intervalos variáveis de 3 ou 6 horas), de modo a criar um novo banco de dados que retorne apenas as informações constantes nos dois bancos de dados.

Esse tipo de operação pode ser útil, por exemplo, para analisar a correlação entre as informações coletadas, permitindo avaliar a representatividade dos dados, como observado nos trabalhos de ^{18,19,20}. O resultado final da aplicação do código pode ser observado na Figura 16, mais adiante.

Para avaliar o que ocorre a cada etapa de sua execução, o código abaixo é discutido em partes. Na análise detalhada dos comandos, não são colocadas as linhas comentadas (antecedidas pela *hashtag* na Figura 15). Apenas a título de esclarecimento, a *hashtag* (#) é o comando utilizado para indicar que o conteúdo deve ser ignorado durante a execução. Sugere-se a replicação das linhas de comando em um novo *script* para facilitar a compreensão e assimilação.

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 import pandas as pd #importa a biblioteca Pandas
3 import datetime #importa a biblioteca Datetime
4 #importa a biblioteca Pyplot do Matplotlib
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7 #lendo os dados. Observar que a estrutura dos dados é
8 #diferente em cada arquivo
9 dados_conv = pd.read_csv(r'E:\SUL\dados_inmet.txt', dtype={'Hora':str},
10                          skiprows=19, sep=';')
11 dados_aut = pd.read_csv(r'E:\SUL\saocarlos_2013.txt', sep=';')
12
13 #criando uma coluna ("Tempo") do tipo date (data e horário)
14 #para os dados convencionais
15 dados_conv['Tempo'] = pd.to_datetime(dados_conv.Data+ ' '+
16                                     dados_conv.Hora, format="%d/%m/%Y %H%M")
17
18 #criando uma coluna ("Tempo") do tipo date (data e horário)
19 #para os dados automáticos
20 dados_aut['Tempo'] = dados_aut[['Ano', 'Mes', 'Dia',
21                               'Hora']].apply(lambda s : datetime.datetime(*s), axis = 1)
22
23 #extraindo linhas semelhantes com a função "merge"
24 dados_merge = pd.merge(dados_conv, dados_aut, on='Tempo', how='inner')
25
26 #atualizando cada dataframe para conter apenas os dados
27 #disponíveis nos dois bancos de dados
28 dados_aut = dados_aut[dados_aut['Tempo'].isin(dados_merge['Tempo'])]
29 dados_conv = dados_conv[dados_conv['Tempo'].isin(dados_merge['Tempo'])]
30
31 #plotando os resultados para avaliar a semelhança entre as temperaturas
32 #das estações convencional e automática
33 plt.plot(dados_conv['TBS'], dados_aut['Temp'], '*')
34 plt.show()
--

```

Figura 15 Script para realizar a comparação entre dois conjuntos de dados (estações automática e convencional). *Fonte:* Elaborado pelos autores.

A fim de facilitar o entendimento na análise detalhada, alguns dos principais elementos do código foram colocados em cores diferentes: em azul, são indicados os comandos intrínsecos do *Python*, como o *import*, que é usado para carregar as bibliotecas a serem utilizadas; em vermelho, as bibliotecas, como a biblioteca *Pandas*; e em verde, funções ou comandos vinculados às bibliotecas.

A primeira parte do código mostra o carregamento das bibliotecas necessárias: *Pandas*, para realizar as análises estatísticas e organizar os dados temporalmente; *Datetime*, para converter a hora e a data da estação automática para o formato adequado; e *Matplotlib*, para realizar a exibição e plotagem de dados. Para carregar essas bibliotecas, basta colar e executar:

```
import pandas as pd
import datetime
import matplotlib.pyplot as plt
```

É importante destacar que cada linha deve ser executada em uma nova linha do editor de *scripts* ou da janela de comandos, pois a junção possivelmente levará a erro de execução. É possível unir as duas primeiras linhas com um ponto-e-vírgula, mas sugere-se evitar seu uso, para que o código seja mais facilmente compreendido por outros usuários. Outra observação a ser feita é que determinado comando pode continuar em uma nova linha, desde que a separação seja feita de forma apropriada (após uma vírgula ou, então, após o sinal de '+', usado normalmente para concatenar *strings*), conforme pode ser observado adiante.

A próxima parte do código utiliza a biblioteca do *Pandas* e sua função específica, "*read_csv*", para ler o arquivo ASCII com os dados das estações (é necessário alterar o diretório para coincidir com o local onde os dados foram salvos). Percebem-se pequenas diferenças na leitura dos dados, especificamente os argumentos/parâmetros *dtype* e *skiprows*, que indicam, respectivamente, que a coluna *horas* deve ser lida no formato de texto (*str*) e que 19 linhas devem ser ignoradas no cabeçalho do arquivo 'dados_inmet.txt'. Outro argumento necessário à leitura dos dois arquivos é o separador (*sep*), que, nesse caso, é ponto-e-vírgula (";"). Todos os registros lidos do arquivo são organizados em um chamado *Dataframe*, como nome *dados_conv* e *dados_aut*:

```
dados_conv =
    pd.read_csv(r'E:\SUL\dados_inmet.txt', dtype={'Hora':str},
               skiprows=19, sep=';')
dados_aut = pd.read_csv(r'E:\SUL\saocarlos_2013.txt', sep=';')
```

Na sequência, observa-se a função específica "*to_datetime*", que é usada para converter informações para o formato de data específico do *Python*, o que facilita a obtenção de informações, como dia do ano, da semana, etc. Para que a conversão ocorra, devem ser passadas a(s) coluna(s) que possuem a informação de data e hora (que são duas colunas independentes no exemplo em questão) e também indicar o formato desses dados de entrada.

Por exemplo, `"%d/%m/%Y %H%M"` equivale a `"15/06/2016 15:30"`. No exemplo abaixo, é feita concatenação de duas colunas do *Dataframe* (Data e Hora). Os dados convencionais convertidos são salvos na coluna "Tempo", que é adicionada ao *dataframe*, quando o comando é aplicado desta forma:

```
dados_conv['Tempo'] = pd.to_datetime(dados_conv.Data+' '+
                                    dados_conv.Hora, format="%d/%m/%Y %H%M")
```

Observa-se que a conversão depende do formato de entrada dos dados. No caso dos dados da estação automática, os dados estão organizados de forma um pouco diferente, o que exige que outro procedimento seja utilizado na sua conversão, conforme segue:

```
dados_aut['Tempo'] = dados_aut[['Ano', 'Mes', 'Dia',
                                'Hora']].apply(lambda s :
                                                datetime.datetime(*s), axis = 1)
```

No exemplo, cada variável do *dataframe* (ano, mês, dia e hora) está em uma coluna diferente. A nova coluna é criada utilizando a biblioteca e a função *datetime*, que recebe como entrada cada informação separada, conforme o formato do *dataframe*. Mas, para que a função *datetime* seja aplicada sobre todas as linhas do arquivo de dados, é necessário utilizar também as funções *apply* e *lambda*, as quais, em resumo, aplicam determinado comando sobre uma série de dados, atuando como uma função anônima a ser aplicada sobre os dados. Para facilitar o entendimento, pode-se imaginar a seguinte função sendo aplicada para cada linha do *dataframe*:

```
"dados_aut['Tempo'] = datetime.datetime(['Ano', 'Mes', 'Dia',
    'Hora'])".
```

Por fim, o argumento *axis*, relacionado à função *apply*, indica em qual direção será feita a operação *lambda* (0 sobre as colunas e 1 sobre as linhas), nesse caso sobre cada linha.

Após essa etapa, os dados já estão organizados de forma que se possa realizar o procedimento para comparar os *dataframes* (ambos possuem a coluna 'Tempo' com o mesmo formato). Essa operação é realizada por meio da função *Merge*, que integra a biblioteca do *Pandas*:

```
dados_merge = pd.merge(dados_conv, dados_aut, on='Tempo',
                        how='inner')
```

Essa função necessita de dois argumentos: *on*, que indica em qual variável (coluna) ou lista de variáveis (colunas) é feita a comparação dos dois bancos de dados; e *how*, que indica qual é a forma de união com base nas colunas especificadas no outro argumento. No caso do exemplo, deseja-se manter apenas os dados que existem em ambos os arquivos, por isso é adotado o parâmetro *'inner'*.

Após a extração dos dados que estão presentes nos dois arquivos para um novo *dataframe*, os *dataframes* iniciais são filtrados para que contenham apenas as datas semelhantes. Para tal, é aplicada a análise lógica *isin*:

```
dados_aut =
dados_aut[dados_aut['Tempo'].isin(dados_merge['Tempo'])]

dados_conv =
dados_conv[dados_conv['Tempo'].isin(dados_merge['Tempo'])]
```

A extração dos dados é feita com um comando lógico que separa apenas os dados coincidentes para as colunas com nome 'Tempo' no *dataframe* 'dados_aut' e no *dataframe* 'dados_merge'). A mesma operação é aplicada sobre os dados convencionais ('dados_conv'). Como resultado, os *dataframes* são atualizados para conter apenas os dados coincidentes.

Por fim, realiza-se a plotagem para comparar as colunas de temperatura dos dados convencionais (TBS) e das estações automáticas (Temp), usando três argumentos para plotar: dados do eixo X (TBS), dados do eixo Y (Temp) e a forma de exibição dos dados (* é usado para indicar o formato de estrela). O resultado pode ser observado na Figura 16. O segundo comando é aplicado apenas para forçar a exibição do gráfico na tela (já que algumas vezes embora a figura seja criada, a mesma não aparece):

```
plt.plot(dados_conv['TBS'], dados_aut['Temp'], '*')
plt.show()
```

Fazendo uma rápida análise do resultado, constata-se a clara relação entre os conjuntos de dados. Porém, também ficam evidentes as variações entre estes, principalmente em torno de 25°C, indicando possíveis limitações para o uso integrado de diferentes técnicas de medida, o que exige constante de cautela ao analisar esse tipo de informação.

O segundo exemplo de código a ser abordado refere-se a análise de dados climáticos através dos ciclos semanais da temperatura, e pode ser observado na Figura 17. Este ciclo, analisado principalmente no contexto de áreas urbanas e ilhas de calor, já vem sendo analisado há vários anos ao redor do mundo ^{10, 21}. Um exemplo recente é o trabalho de Earl ²².

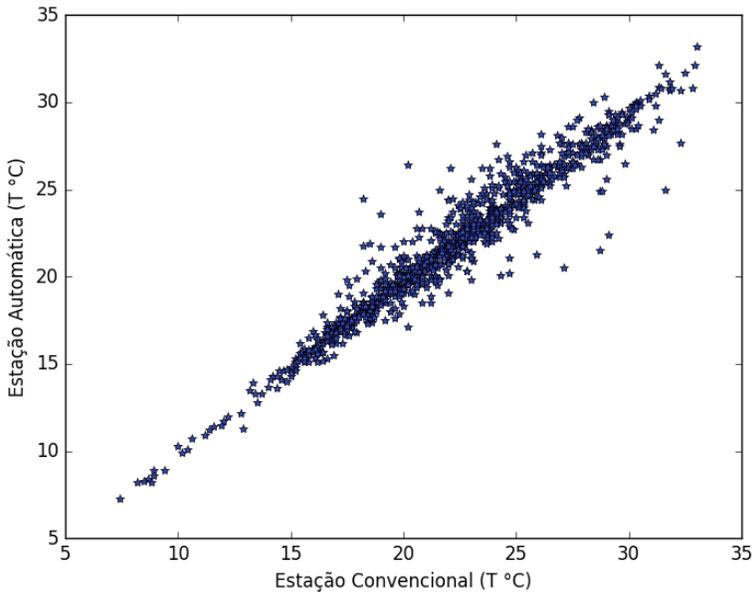


Figura 16 Correlação entre Estações Automáticas e Convencionais do INMET. *Fonte:* Elaborado pelos autores.

Observa-se logo linhas de código que são semelhantes ao exemplo anterior com algumas diferenças nas bibliotecas que são utilizadas, com destaque para a biblioteca *Seaborn* (mais detalhes podem ser obtidos em <http://seaborn.pydata.org/index.html>), que é uma biblioteca de visualização (baseada no *Matplotlib*) para melhorar a exibição de gráficos no *python*:

```
import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
```

A aplicação do *seaborn* inicia com a definição de alguns aspectos do gráfico. No exemplo, adota-se uma formatação simples e altera-se a paleta de cores:

```
sns.set(palette="deep")
```

Mais especificações sobre a aplicação do *seaborn* são dadas adiante. Continuando no detalhamento do código, tem-se a criação de um *dataframe* vazio. Este *dataframe* será usado posteriormente para armazenar os dados de anomalia da temperatura, razão do nome adotado para o mesmo:

```
anomalW = pd.DataFrame()
```

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  import pandas as pd
3  import seaborn as sns
4  import matplotlib.pyplot as plt
5  # definindo o formato do gráfico
6  sns.set(palette="deep")
7  #cria um banco de dados do Pandas vazio
8  anomalW = pd.DataFrame()
9  #lendo os dados
10 dados_conv = pd.read_csv(r'E:\Sul\dados_inmet.txt',
11                          dtype={'Hora':str}, skiprows=19, sep=';')
12 #criando uma coluna do tipo data para os dados convencionais
13 dados_conv['Tempo'] = pd.to_datetime(dados_conv.Data+ ' '+
14                                     dados_conv.Hora, format="%d/%m/%Y %H%M")
15 #adiciona coluna com dias da semana (0 = segunda-feira)
16 dados_conv['Wday'] = dados_conv.Tempo.dt.dayofweek
17 #agrupa os dados pelo dia da semana (cria objeto)
18 grupoW = dados_conv.groupby('Wday')
19 #print para observar os dados médios de cada variável
20 print('média TBS:')
21 print(grupoW.TBS.mean())
22
23 #determina a média de temperatura para cada dia da semana
24 #e calcula a anomalia a partir da média para TBS e TBU
25 #TBS = Temp Bulbo Seco e TBU = Temp Bulbo Umido
26 anomalW['TBS'] = grupoW.TBS.mean() - grupoW.TBS.mean().mean()
27 anomalW['TBU'] = grupoW.TBU.mean() - grupoW.TBU.mean().mean()
28
29 print(anomalW)#exibe os dados de anomalia
30 #(inicia a)plotagem dos dados
31 grafico = anomalW.TBS.plot()
32 anomalW.TBU.plot()
33 #definindo informações da figura
34 grafico.set_title(u'Ciclo Semanal da Temperatura (Anomalia em °C)')
35 grafico.set_xlabel(u'Dias da Semana')
36 grafico.set_ylabel(u'Temperatura')
37 grafico.set_ylim((-0.1,0.1))
38 #preparando a legenda
39 dados = grafico.get_legend_handles_labels()#extrai cada linha do gráfico
40 labels = ['Temp. Bulbo Seco', 'Temp. Bulbo Umido']
41 # relaciona cada linha com um "label"
42 grafico.legend(dados[0], labels, loc='best')
43 # criando label para os dias da semana
44 weekday_map= {0:'SEG', 1:'TER', 2:'QUA', 3:'QUI',
45              4:'SEX', 5:'SAB', 6:'DOM'}
46 grafico.set_xticklabels([weekday_map[d] for d in range(0,7)])
47 plt.show()#força a exibição do gráfico

```

Figura 17 Código para análise do ciclo semanal da temperatura para a estação convencional do INMET em São Carlos (dados de 1961 até o presente).

Em seguida, aparecem linhas de comando análogas ao exemplo anterior e que não serão discutidas (referem-se a leitura dos dados e a criação da coluna no formato de data). A coluna criada no formato de data ('Tempo') é necessária para que se possa aplicar outras funções necessárias para o

exemplo em questão, como a obtenção da informação sobre o dia da semana a partir dos dados temporais, utilizando a função `dt.dayofweek`:

```
dados_conv[ 'Wday' ] = dados_conv.Tempo.dt.dayofweek
```

São duas funções vinculadas ao *Pandas*, onde a primeira é chamada de objeto de acesso (que obtém informações do *dataframe* neste caso) e a segunda é a função aplicada sobre as informações obtidas (no caso, a função *dayofweek*, que obtém os dias da semana). Os resultados são adicionados a uma nova coluna do *dataframe* (coluna 'Wday'), na qual os dias da semana são organizados no formato numérico, de modo que segunda-feira equivale a 0 e domingo equivale a 6.

Com a nova coluna adicionada, pode se passar a análise dos dados com base no dia da semana. Para tal, foi aplicada a função *groupby* para agrupar os dados com base na coluna do dia da semana. Esta operação cria um *dataframe* na forma de objeto, que chamamos de grupoW:

```
grupoW = dados_conv.groupby( 'Wday' )
```

A partir daí, é possível extrair informações das diferentes colunas aplicando comandos como o apresentado adiante, que imprime na janela de comandos o resultado da média da temperatura de bulbo seco (TBS) para cada dia da semana:

```
print( 'média TBS:' )
```

```
print( grupoW.TBS.mean() )
```

Percebe-se que o objeto *grupoW* possui os dados do *dataframe* *dados_conv*, mas, por ter sido agrupado, retornará as estatísticas levando em conta a coluna indicada para o agrupamento (*Wday*). Com esse resultado, já seria possível gerar um gráfico com os valores médios para cada dia da semana. Porém, visando à exibição dos dados, pode-se analisá-los em termos de sua anomalia, obtida pela diferença entre o valor médio de cada dia da semana em relação à média de todos os dias da semana. Essa operação pode ser observada nos comandos a seguir, que são aplicados para obter resultados tanto para a temperatura de bulbo seco quanto para a de bulbo úmido (TBS e TBU), armazenando os resultados em um novo *dataframe* com duas colunas:

```
anomalW[ 'TBS' ] = grupoW.TBS.mean() - grupoW.TBS.mean().mean()
```

```
anomalW[ 'TBU' ] = grupoW.TBU.mean() - grupoW.TBU.mean().mean()
```

Observa-se que, para obter a média geral, aplica-se a função média duas vezes (`mean().mean()`). Para exibir os resultados na janela de comandos, novamente é usada a função intrínseca `print`:

```
print(anomalW)
```

Todos os passos seguintes referem-se à (preparação para) plotagem. O primeiro passo é criar um objeto do tipo gráfico (nomeado também como *grafico*), que pode ser obtido com o seguinte comando:

```
grafico = anomalW.TBS.plot()
```

```
anomalW.TBU.plot()
```

Com o primeiro comando, a temperatura de bulbo seco é adicionada ao objeto *grafico*. Normalmente, uma figura já é exibida. Na segunda linha, com o objeto já existente, basta aplicar o comando `plot` sobre os dados de bulbo úmido (TBU). O comando `plot` é aplicado, nesse caso, por ser o padrão para a criação de gráficos de linha, mas outros comandos podem ser, conforme interesse do programador aplicados (*boxplot*, *tsplot*, *subplot*, etc.). Para tal, sugere-se a busca de informações na documentação do *Matplotlib* e do *Seaborn*, bem como o uso de sites de busca. Outra fonte interessante de informações e dicas são fóruns e também o site <http://stackoverflow.com/>, onde usuários compartilham soluções para problemas em diversas linguagens, inclusive *python*.

As linhas seguintes do *script* são usadas basicamente para configurar o gráfico (conforme o código: título, etiquetas e limites verticais do gráfico):

```
grafico.set_title(u'Ciclo Semanal da Temperatura (Anomalia em °C)')
```

```
grafico.set_xlabel(u'Dias da Semana')
```

```
grafico.set_ylabel(u'Temperatura')
```

```
grafico.set_ylim((-0.1,0.1))
```

O limite é usado para estender a área de plotagem para limites específicos que não os dados por *default*, normalmente levando em conta os valores máximos e mínimos. Isso é feito aqui apenas a título de exemplo. O passo seguinte é usado para preparar a legenda:

```
dados = grafico.get_legend_handles_labels()
```

```
labels = ['Temp. Bulbo Seco', 'Temp. Bulbo Umido']
```

```
grafico.legend(dados[0], labels, loc='best')
```

Primeiro, são obtidos os objetos (*handles* e *labels*) associados com cada informação (TBS e TBU). Depois, é criada uma lista com as etiquetas desejadas para cada dado (variável *labels*). Por fim, a legenda é adicionada ao gráfico, vinculando o objeto (*handles*) com a lista de etiquetas geradas. O argumento *loc* indica onde a legenda deve ser localizada no gráfico. No exemplo, a escolha da localização é automática.

A última etapa do código é usada para alterar os valores dos dias da semana, no eixo horizontal do gráfico, do padrão (0-6) para (SEG-DOM). Aqui, novamente um tipo específico de dados é usado: dicionário. Nele, um dado numérico é vinculado a um dado textual e armazenado em uma variável do tipo dicionário. Por fim, um *loop* é aplicado sobre cada um dos elementos do dicionário, que ao final são indicados como etiqueta do eixo horizontal do gráfico:

```
weekday_map= {0: 'SEG', 1: 'TER', 2: 'QUA', 3: 'QUI',
              4: 'SEX', 5: 'SAB', 6: 'DOM' }

grafico.set_xticklabels([weekday_map[d] for d in
range(0,7)])
```

Para esclarecer um pouco mais esse último comando, uma análise mais detalhada é apresentada. *Range* é uma função intrínseca do *Python* que cria uma lista de valores, cujo tamanho e características dependem dos argumentos aplicados. Nesse caso, a lista terá 7 valores, indo de 0 a 6. Os colchetes com a letra [d] após a variável *weekday_map* indicam que um elemento específico do dicionário é selecionado por meio de um valor numérico. Se o valor for 6, por exemplo, essa variável retornará 'DOM'. Porém, no caso acima, [d] faz referência ao *loop*, que relaciona a letra *d* com a lista de valores na função *range*, de modo que a lista completa seja vinculada com a função *set_xticklabels*, que gera as etiquetas no gráfico.

Finalmente, o comando *plt.show()* força a exibição do gráfico, conforme já mencionado. O resultado final desse código é observado na Figura 18, que, com base em mais de 50 anos de dados, sugere que a temperatura do ar tende a ser maior entre terça-feira e sábado e menor aos domingos e segundas-feiras. Ressalta-se, no entanto, que as variações são pequenas (da ordem de 0.1°C) e podem não ser estatisticamente significativas. De qualquer forma, as possíveis razões para tal comportamento fogem ao escopo do trabalho e não serão analisadas, mas possivelmente vão ao encontro dos diversos estudos sobre o ciclo semanal da temperatura existentes, bem como dos já mencionados no texto ^{10, 21, 22}.

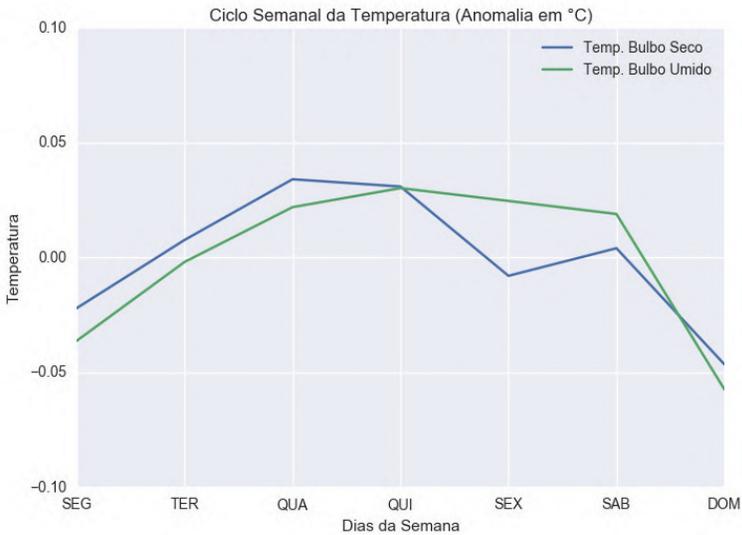


Figura 18 Gráfico do ciclo semanal da temperatura para as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido obtidos para a estação convencional do INMET em São Carlos (dados de 1961 até o presente). *Fonte:* Elaborado pelos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste material, foram apresentados dois exemplos básicos de códigos, utilizando a linguagem *Python*, que podem ser úteis na área de climatologia: uma comparação de dois bancos de dados e uma análise da temperatura sob perspectiva temporal (ciclo semanal). Estes exemplos podem ser executados por conjuntos de comandos, acompanhado o detalhamento ao longo do texto, ou podem ser obtidos através da pasta compartilhada do *Onedrive*, juntamente com os dados de estações meteorológicas utilizados no desenvolvimento deste conteúdo. Basta abrir os códigos no ambiente *Canopy*, instalar as bibliotecas necessárias e realizar as alterações dos caminhos para os arquivos de dados. Feito isso, o código provavelmente retornará os resultados esperados.

Buscou-se aqui explicar de forma detalhada os resultados da aplicação de cada grupo de comandos visando facilitar a compreensão por parte de usuários que possuem interesse na computação científica ou que estão começando a buscar nas linguagens meio para auxiliar no desenvolvimento de seus estudos. O uso do *Python* também vem contribuir nesse sentido por ser uma linguagem simples e objetiva, adotada amplamente e de forma crescente nos estudos científicos.

Embora os exemplos abordados sejam básicos, percebe-se pelo detalhamento, que diversos aspectos precisam ser considerados no código para alcançar os resultados esperados. Qualquer aplicação diferente da abordada neste material vai exigir um aprofundamento no conhecimento da linguagem, que pode ser feito de forma individual sem grandes dificuldades, tendo em vista a grande gama de vídeo-aulas e outros tutoriais disponíveis na *internet*.

Além disso, muitos problemas que se buscam resolver com alguma linguagem já foram levantados/discutidos por outras pessoas e, muitas vezes, soluções prontas ou similares já foram compartilhadas, bastando uma consulta simples e objetiva nos mecanismos de busca presentes na *internet*, e principalmente em fóruns como *Stackoverflow*, utilizando as palavras-chaves adequadas.

Estas talvez possam ser consideradas como a verdadeira chave para encontrar as soluções rapidamente. Dependendo das palavras-chaves adotadas, uma solução pode ser facilmente encontrada ou então levar o pesquisador para longe do seu objetivo.

Ressalta-se, ainda, que o emprego de uma linguagem de programação pode ser extremamente útil para tarefas que envolvam arquivos de dados com uma grande quantidade de informação (*data-mining*), por vezes até impossíveis de serem analisadas em editores de planilhas, sem mencionar os avanços sobre o *Big Data*, cujas aplicações necessariamente envolvem o conhecimento de linguagens de programação. Além disso, as linguagens são essenciais ao desenvolvimento de ferramentas que possam facilitar a interpretação e análise de informações, e pesquisadores com este tipo de conhecimento podem trazer grandes contribuições para a Ciência de um modo geral.

Finalmente, espera-se que este material possa contribuir para que graduandos e pós-graduandos, na climatologia ou qualquer outra área do conhecimento, possam otimizar as suas análises, além de garantir que seus resultados sejam produzidos de forma consistente.

APLICAÇÃO DOS VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS (VANT) NAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS

A utilização dos Veículos Aéreos não Tripulados (VANT) não é nova, mas recentemente ganhou amplitude em função de sua aplicação. Os primeiros VANTs foram registrados há muito tempo e, segundo Longhitano²³, uma das primeiras referências sobre o desenvolvimento de Veículos Aéreos Não-Tripulados no mundo é atribuída ao padre Bartolomeu de Gusmão.

De acordo com Medeiros²⁴, o padre Bartolomeu de Gusmão desenvolveu um balão de ar quente e demonstrou, em 1709, a toda Corte Portuguesa.

Mas, o primeiro voo aéreo fotografado da história é datado de 1888, na França. O vôo foi realizado por Arthur Batat, por meio de uma câmera fotográfica embarcada em uma pipa²⁵.

Sobre a atividade de rádio controle da aeronave, o primeiro VANT foi desenvolvido em 1935, por Reginald Denny²⁵.

Em 2002, o "Predator" tornou-se conhecido e ficou sendo conhecido como o Veículo Aéreo Não Tripulado americano, sendo utilizado para fins militares e uma de suas primeiras aplicações foi durante a guerra do Afeganistão.

Já, no Brasil, a utilização dos VANTs é mais recente e teve seu início na década de 1980, quando o Centro Técnico Aeroespacial (CTA) desenvolveu o projeto Acauã²⁵.

A aplicação dos Vants tem trazido para o meio tecnológico uma gama muito grande de possibilidades e estudos, desde o monitoramento de ambientes, animais, dimensionamento e estudo de crescimento populacional em apoio ao desenvolvimento de planos diretores que norteiam o crescimento das cidades, até o controle de ilhas de calor existentes nas cidades.

Juntamente com o Sensoriamento Remoto, essa tecnologia tem ganhado visibilidade e tem trazido uma gama muito grande de aplicações ligadas às áreas de Engenharia Ambiental e, à Climatologia e Ambiência.

O Sensoriamento Remoto nada mais é do que uma técnica de obtenção de imagens de objetos da superfície terrestre sem a necessidade de contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objetivo em análise. O processo ocorre por meio da radiação eletromagnética emitida pela superfície de um objeto. A Figura 19 ilustra o processo de emissão de luz, mediante a exposição de um objeto.

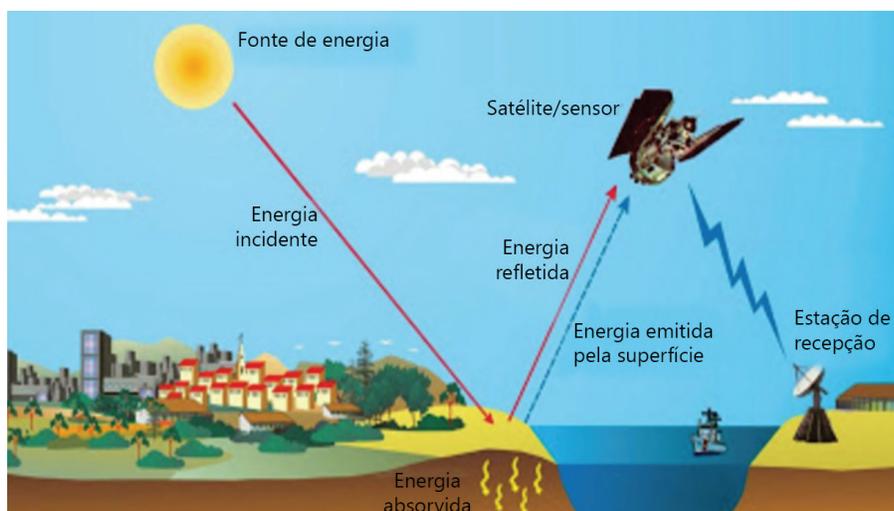


Figura 19 Interação Sol x Terra x Satélite. *Fonte:* Parquedaciencia²⁶ (2017).

O Sol representa a fonte de energia e a superfície da Terra funciona como um meio por onde a energia é transmitida e refletida ou reemitida até o satélite, gerando, assim, os dados necessários para futuro processamento e interpretação.

A interação entre as técnicas de sensoriamento remoto, conjuntamente com o Vant tem trazido grandes possibilidades de aplicação, uma vez que é possível embarcar nos Vants os sensores necessários para a coleta de dados e informações que se façam necessárias para as mais diversas áreas do conhecimento.

Os sensores são responsáveis por coletarem os dados do meio e enviarem para uma central de processamento, onde são processados e analisados. A Figura 20 mostra a interação que ocorre nesse processo todo.

A Figura 20 permite melhor visualizar o processo de emissão, recepção e processamento dos dados obtidos pelos sensores. O Sol representa a fonte de energia ou iluminação (A) por onde é conduzida até a superfície terrestre (B), que em contato com o objeto em estudo (C) reflete parte da energia não absorvida por ele e que é armazenada em um sensor embarcado em um Satélite ou Vant (D), que por sua vez transmite os dados capturados para uma central de processamento de dados (E), onde os dados são processados, analisados e interpretados (F) e são enviados para os mais diversos aplicativos de processamento de imagens para utilização e aplicação de seus gestores (G)²⁷.

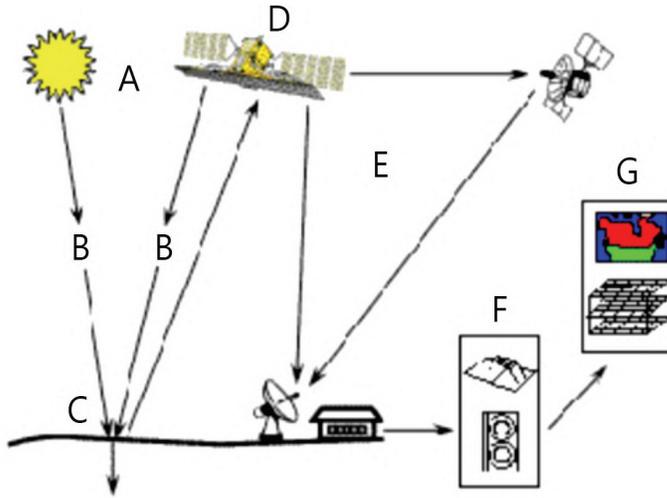


Figura 20 Processo de coleta de dados. Fonte: Souza²⁷ (2017).

A maioria dos sensores utilizados para capturar a energia refletida pelos objetos trabalham no espectro eletromagnético da luz visível e do infravermelho. Em função disso, pode-se entender a diferença dos satélites quando comparados com as câmeras normais, uma vez que essas somente enxergam dentro da luz visível. A forma com que os objetos refletem a energia está relacionada com a sua natureza e se dá por meio de comprimentos de ondas (Figura 21). Cada objeto de acordo com a sua estrutura reflete ou emite um comprimento de onda que é captada pelo sensor em monitoramento. Esses comprimentos de onda são conhecidos como Bandas (Figura 22) ²⁶.

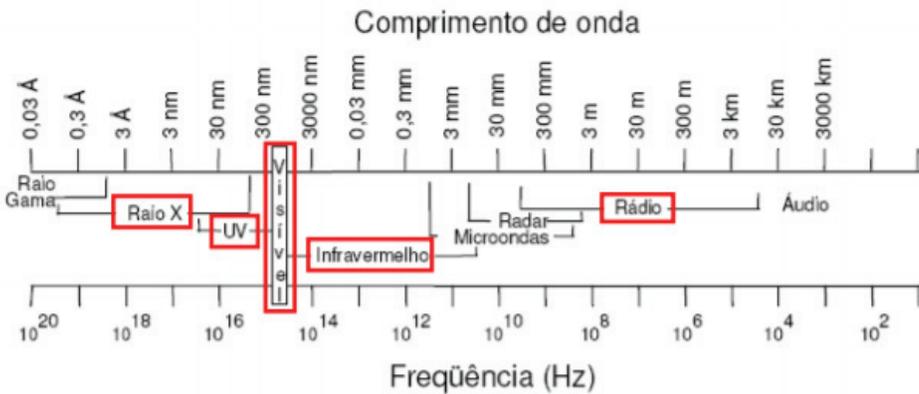


Figura 21 Espectro eletromagnético. Fonte: Souza²⁷ (2017).

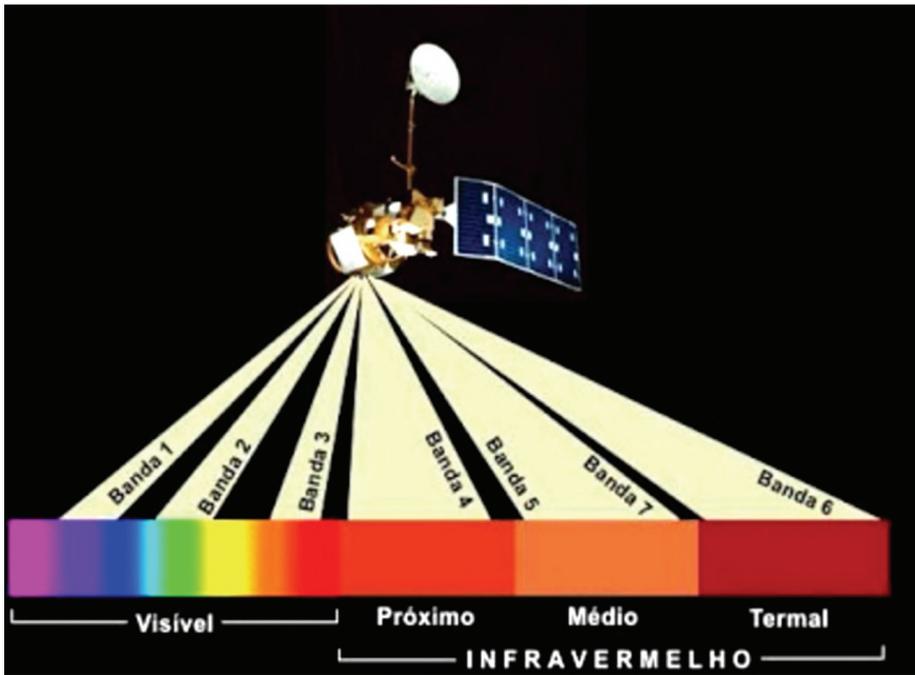


Figura 22 Bandas correspondentes nos Satélites. *Fonte:* Parquedaciencia²⁶ (2017).

As imagens aéreas possuem várias aplicabilidades e, dentre elas, estão: estudos de urbanização, agricultura, meteorologia, climatologia, ambiência, monitoramento, estudos ambientais (geologia, solos, vegetação, bacias hidrográficas, climatologia, oceanografia) e etc.

Como exemplo, é possível visualizar a sua aplicação na agricultura, onde segundo Bernardi²⁸, "as propriedades da refletância em cada faixa do espectro eletromagnético podem ser melhor avaliadas através de combinações matemáticas de diferentes bandas espectrais. Essas transformações são medidas da atividade da vegetação e utilizam em especial as faixas do visível e infravermelho próximo (NIR) e são denominados de Índices de Vegetação (IVs)".

A Figura 23 mostra a refletância típica de uma planta em diferentes comprimentos de onda.

No mercado, existem várias câmeras que podem ser utilizadas com Vants. As câmeras convencionais podem ser utilizadas, desde que, tenham o seu filtro substituído por um filtro Infravermelho diretamente no sensor, com o objetivo de captar a banda espectral NIR. Isso acaba gerando um certo ruído na imagem se não realizada de forma correta. Para evitar esse problema, foram desenvolvidas as câmeras multiespectrais, que já são preparadas para

captarem diferentes bandas com largura de banda estreita. Elas realizam as medições com muito mais qualidade. Dentre as câmeras utilizadas em Vants podemos citar as *Tetracam*, a *Airinov* e a *Micasense*. Cada uma com uma especificidade, mas com o mesmo objetivo ¹¹.

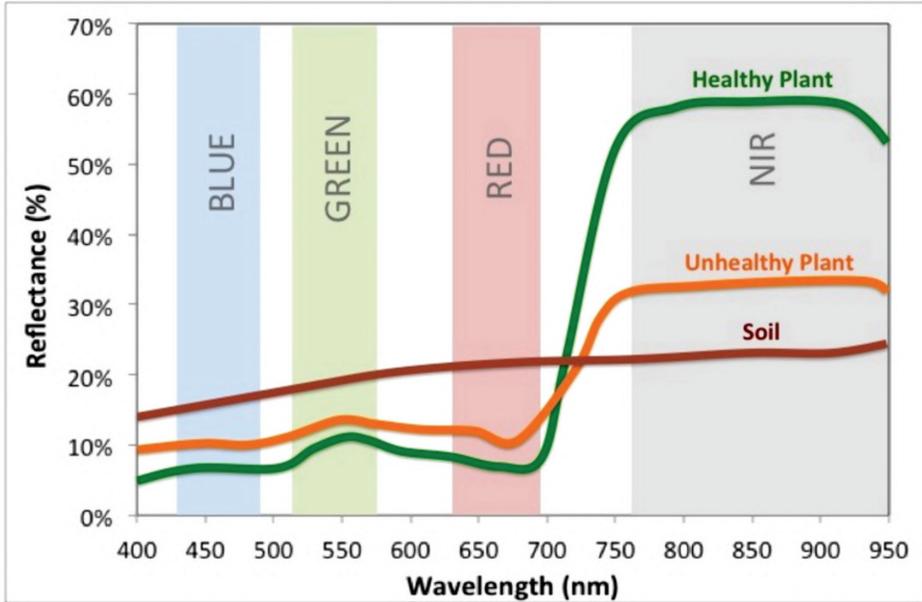


Figura 23 Refletância de uma planta típica. Fonte: Droneng_B¹¹ (2017).

Uma outra banda muito utilizada em análise climatológica para estudo de ilhas de calor, é a banda 10 do Landsat 8, que trata do espectro relacionado com o Termal. As informações referentes à temperatura superficial também podem ser obtidas por meio do sensoriamento remoto, onde a banda termal possibilita a visualização do calor interno dos objetos, ou seja, esse calor é convertido em energia radiante e, portanto, perceptível para sensores que trabalhem nessa faixa do espectro eletromagnético ²⁹.

Segundo os mesmos autores, “a temperatura de superfície diz respeito ao fluxo de calor dado em função da energia que chega e sai do alvo, sendo de suma importância para o entendimento das interações entre a superfície terrestre e a atmosfera”, sendo a faixa do espectro correspondente ao intervalo de 8,0 a 14,0 μm ²⁹.

Assim, pode-se visualizar uma aplicação do Vant embarcado com uma câmera termal, onde torna-se possível identificar ilhas de calor em áreas urbanas e suburbanas.

Com o crescimento desordenado da população e, conseqüentemente, das cidades, várias trazem consigo desarranjos de ordem ambiental, as quais podem ser verificadas por meio da degradação da vegetação e pelo aumento das construções e malhas asfálticas criadas para permitirem o fluxo de pessoas, serviços e processos. Essas componentes possuem em suas estruturas forte potencial de armazenamento de radiação solar, gerando um desconforto térmico que pode ser ocasionado por um fenômeno estudado como ilhas de calor ³⁰.

Esse fenômeno é proveniente da interação do homem com o meio ambiente, o qual ele altera para poder existir mais confortavelmente, alterando assim, as características básicas dos locais onde atua. As aplicações dos Vants com câmeras termais acopladas podem auxiliar os gestores na melhor identificação dessas áreas e, conseqüentemente, auxiliarem na resolução ou na diminuição das sensações térmicas percebidas por todos que próximos a ela passem ³⁰.

Assim, com a utilização dos conteúdos trabalhados até o momento, torna-se possível desenvolver sistemas, implementar hardware e utilizá-los no monitoramento de ambientes embarcados em um Vant.

As Figuras 24 até 29 mostram a visualização de um ambiente monitorado com Vant, quando embarcado com tecnologia que permita aos profissionais das mais variadas áreas coletarem e monitorarem os seus ambientes de trabalho, seja ele qual for.



Figura 24 Mapeamento Térmico área urbana (estradas e pontes). *Fonte:* Droneng³² (2017).



Figura 25 Monitoramento de área cultivada. *Fonte:* Chiacchio³¹ (2016).



Figura 26 Monitoramento de plantio (detecção de falhas). *Fonte:* Chiacchio³¹ (2016).



Figura 27 Monitoramento Ambiental. *Fonte:* Chiacchio³¹ (2016).

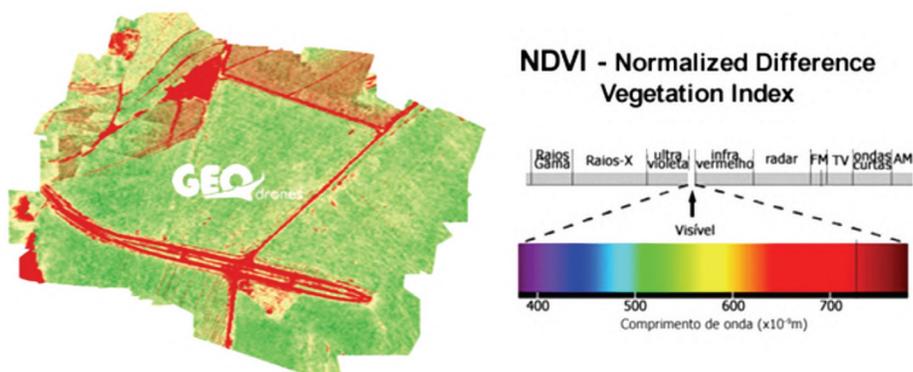


Figura 28 Mapeamento para determinação do índice de vegetação (NDVI). *Fonte:* Droneng_A³³ (2017).

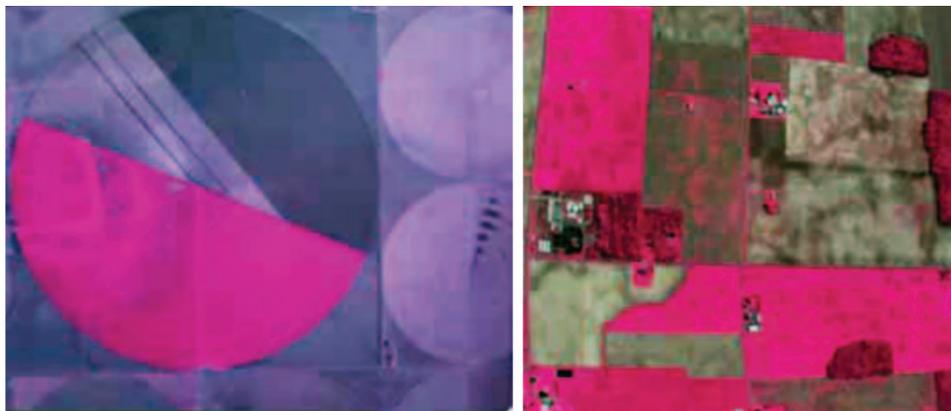


Figura 29 Imagem de Vant com câmera NIR. *Fonte:* Droneng_A³³ (2017).

CONSIDERAÇÕES FINAIS E POTENCIALIDADES DE APLICAÇÃO

Este capítulo teve como objetivo a introdução aos conceitos básicos da TI e SI, bem como de sua utilização no apoio as atividades didáticas voltadas para a área de Climatologia e Ambiente.

Os conceitos abordados e as aplicações apresentadas possibilitarão aos que tenham interesse em dar continuidade aos estudos um embasamento básico, que facilitará os estudos subsequentes.

RECOMENDAÇÕES PARA LEITURA COMPLEMENTAR

BIELSKI, C.; GRAZZINI, J.; SOILLE, P. Automated morphological image composition for mosaicing large image data sets. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING - IGARSS, 2007, Barcelona. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p. 4068-4071. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423743>

BLACKBURN, G. A. Relationships between spectral reflectance and pigment concentrations in stacks of deciduous broadleaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 2, p. 224-237, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00048-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00048-6)

DU, Q.; RAKSUNTORN, N.; ORDUYILMAZ, A.; BRUCE, L. M. Automatic registration and mosaicking for airborne multispectral image sequences. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 74, n. 2, p. 169-181, 2008. <http://dx.doi.org/10.14358/PERS.74.2.169>

KUMAR, L. Modeling forest resources using geographical information systems and hyperspectral remote sensing. 1998. 246 f. **Tese** (Doutorado). University of New South Wales, Sydney, 1998.

USTIN, S. L.; ZARCO-TEJADA, P. J.; ASNER, G. P. The role of hyperspectral data in understanding the global carbon cycle. In: JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, 10., 2001, Pasadena. **Proceedings...** p. 397-410.

VARSHNEY, P. K.; ARORA, M. K. **Advanced image processing techniques for remotely sensed hyperspectral data**. New York: Springer, 2004. 322 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-05605-9>

QUESTÕES DE REVISÃO

- O que são sensores e como podemos classificá-los?
- O que é Arduíno? Quais suas principais aplicações?
- Qual a função do sensor DHT11?
- O que significa a sigla VANT?
- O que é Sensoriamento Remoto?
- Qual a aplicabilidade das imagens aéreas coletadas por um VANT?

BIBLIOGRAFIA

[1] DUARTE, L. et al. Assessing Groundwater Vulnerability to Pollution through the DRASTIC Method. In: MURGANTE, B. et al. (Eds.). **Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014: 14th International Conference, Guimarães, Portugal, June 30 2014, Proceedings, Part IV**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 386-400.

[2] REZENDE, Denis Alcides. **Tecnologia da Informação aplicada a Sistemas de Informação**. Editora Atlas, 311 p. 2000.

[3] PATSKO, Luís Fernando. **Tutorial aplicações, funcionamento e utilização de sensores**. Disponível em: http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf. Acesso em: 22 mar. 2017.

[4] FERREIRA, Fabio. **Microcontroladores PIC Programação em C**. 6ª ed. São Paulo: Editora Érica. 358 p., 2008.

- [5] VIDADESILICIO. **Robótica e Sistemas Digitais**. Disponível em: <http://promo.vidadesilicio.com.br/apostila-arduino-basico-vol-1>. Acesso em: 22 mar 2017.
- [6] WIKIPÉDIA. **A Enciclopédia Livre. Sensor**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Sensor>. Acesso em: 22 mar 2017.
- [7] MULLER, C. L.; KIDD, C. Debugging geographers: teaching programming to non-computer scientists. **Journal of Geography in Higher Education**, v. 38, n. 2, p. 175–192, 3 abr. 2014.
- [8] JUNG, M. LecoS – A python plugin for automated landscape ecology analysis. **Ecological Informatics**, v. 31, p. 18–21, 2016.
- [9] TAVARES, J. N. Computação científica no ensino. **Revista Ciência Elementar**, v. 2, n. 3, p. 1–3, 2014.
- [10] COAKLEY, K. J. The warmest day of any week tends to occur on the first or last day of that week. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 81, n. 2, p. 273–283, fev. 2000.
- [11] DRONENG_B. **Uso de Vant na Agricultura**. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/sensoriamento-remoto-com-vant-e-cameras-multiespectrais/>. Acesso em: 01 abr. 2017.
- [12] DUARTE, L. et al. Assessing Groundwater Vulnerability to Pollution through the DRASTIC Method. In: MURGANTE, B. et al. (Eds.). **Computational Science and Its Applications - ICCSA 2014: 14th International Conference, Guimarães, Portugal, June 30 2014, Proceedings, Part IV**. Cham: Springer International Publishing, 2014. p. 386–400.
- [13] GUPTA, P. K. USER FRIENDLY OPEN GIS TOOL FOR LARGE SCALE DATA ASSIMILATION; A CASE STUDY OF HYDROLOGICAL MODELLING. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXIX-B4, n. September, p. 427–430, 1 ago. 2012.
- [14] LEE, W.-S.; CHUN, J. A.; KANG, K. Development and application of GIS-based PRISM integration through a plugin approach. **Journal of Hydrology**, v. 513, p. 58–67, 2014.
- [15] MULLER, C. L.; KIDD, C. Debugging geographers: teaching programming to non-computer scientists. **Journal of Geography in Higher Education**, v. 38, n. 2, p. 175–192, 3 abr. 2014.
- [16] PHILIP GUO. **Python is Now the Most Popular Introductory Teaching Language at Top U.S. Universities | blog@CACM | Communications of the ACM**. Disponível em: <<http://cacm.acm.org/blogs/blog-cacm/176450-python-is-now-the-most-popular-introductory-teaching-language-at-top-u-s-universities/fulltext>>. Acesso em: 12 fev. 2017.
- [17] COELHO, F. C. **Computação Científica com Python**. Petrópolis-RJ: Edição do Autor, 2007.
- [18] STRASSBURGER, A. S. et al. Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 273–278, 2011.
- [19] TAVARES, J. N. Computação científica no ensino. **Revista Ciência Elementar**, v. 2, n. 3, p. 1–3, 2014.
- [20] HOLDER, C. et al. Comparison of collocated automated (NCECONet) and manual (COOP) climate observations in North Carolina. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 23, n. 5, p. 671–682, 2006.
- [21] GORDON, A. H. Weekdays warmer than weekends? **Nature**, v. 367, n. 6461, p. 325–326, 27 jan. 1994.

[22] EARL, N.; SIMMONDS, I.; NIGEL, T. Weekly cycles in peak time temperatures and urban heat island intensity. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 7, p. 74003, 2016.

[23] ALVES NETO, Armando. **Geração de trajetórias para veículos aéreos autônomos não-tripulados**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

[24] LONGHITANO, George Alfredo. **VANTS para sensoriamento remoto: Aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 2010. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

[25] MEDEIROS, Fabricio Ardais. **Desenvolvimento de um Veículo Aéreo Não Tripulado para Aplicação em Agricultura de Precisão**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

[26] PARQUEDACIÊNCIA. **Como funciona e para quê seve o sensoriamento remoto**. Disponível em: <http://parquedaciencia.blogspot.co.nz/2013/07/como-funciona-e-para-que-serve-o.html>. Acesso em 01 mai 2017.

[27] SOUZA, Ronald Buss de; **Sensoriamento Remoto: Conceitos fundamentais e plataformas**. Disponível em: <http://www.inpe.br/crs/crectecal/pdf/ronald_ceos.pdf>. Acesso em 01 mai 2017.

[28] BERNARDI, Alberto Carlos de Campos. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. [et al.]**, Editores Técnicos. – Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113993/1/Agricultura-de-precisao-2014.pdf>. Acesso em: 21 mar 2017.

[29] PIRES, Érika Gonçalves; FERREIRA JR, Laerte Guimarães. **Mapeamento da temperatura de superfície a partir de imagens termais dos satélites Landsat 7 e Landsat 8**. Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

[30] MONTEIRO, Diego Leandro; COELHO, André Luiz Nascentes Coelho. **Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento Termal: Uma análise espaço-temporal do Município de Serra (ES)**. Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

[31] CHIACCHIO, Simon Skarabone Rodrigues; TEIXEIRA, Bruno Eduardo; TECH, Adriano Rogério Bruno. Vant: Um Estudo Sobre a Utilização de Veículo Aéreo Não Tripulado na Agricultura de Precisão. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 1. Vol. 12. Pp 79-89, dezembro de 2016. ISSN: 2448-0959

[32] DRONENG. **Mapeamento térmico com Vant**. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/mapeamento-termico-com-vant/>. Acesso em: 01 abr. 2017.

[33] DRONENG_A. **Uso de Vant na Agricultura**. Disponível em: <http://geodrones.com.br/blog/os-indices-de-vegetacao-ndvi/>. Acesso em: 01 abr. 2017.

ambiente e de rebanhos, desenvolvimento de sistemas de gestão ERP, além de tecnologias e sistemas de informação e instrumentação de precisão. Na área de Gestão, coordena o curso Stricto Sensu Mestrado Profissional da FZEA /USP, na área de administração, com concentração em gestão e inovação na indústria animal. É Coordenador da sala pró-aluno da FZEA /USP, bem como membro titular da COC da Engenharia de Biossistemas, Cultura e Extensão, membro do Conselho Departamental do Departamento de Ciências Básicas; além de Coordenador de Estágios e Atividades Complementares do Departamento de Ciências Básicas. Em 2019 foi contemplado como Bolsista Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora - Nível II, pelo CNPq. Atualmente é Presidente da Comissão de Cultura e Extensão Universitária da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo (USP).

Gustavo Zen de Figueiredo Neves

Bacharel e Licenciado em Geografia pela UTPR (2009). Mestre em Ciências pela USP (2014), com estudo sobre clima urbano na cidade de São Carlos-SP. Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo (2018), cuja pesquisa versou sobre a atuação dos sistemas atmosféricos e a distribuição pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. É professor colaborador da Universidade Estadual de Goiás. É Professor colaborador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Universidade de São Paulo, oferecendo disciplinas na linha de pesquisa Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente (CRHEA-USP São Carlos). É membro da Associação Brasileira de Climatologia (ABCLima) exercendo a função de Diretor-Secretário (Gestão 2018-2020) e membro do Conselho Deliberativo (Gestão 2016-2018 e 2014-2016). Pesquisador colaborador do Grupo de Estudos da Localidade (USP Ribeirão Preto/CNPq). Tem experiência docente e profissional na área de Geociências, atuando principalmente nos temas de Geografia Física, Climatologia, Sistemas atmosféricos da América do Sul, Clima Urbano, entre outros. É revisor de periódicos científicos como a Revista Brasileira de Climatologia e Atmosphere-MDPI.

Em diferentes escalas geográficas, a climatologia tomou papel central na sociedade pelo contexto de sua grande variabilidade natural e antropogênica. Esta obra é dedicada aos discentes de graduação na esfera das Geociências e da Geografia, assim como da Engenharia Ambiental, das Ciências Ambientais, Agronomia, Arquitetura e outras áreas correlatas.

Climatologia Dinâmica: Conceitos, Técnicas e Aplicações é uma coletânea de estudos e ensaios organizados em capítulos. O livro que o leitor tem em mãos é revestido de conceitos largamente consolidados no âmbito da Climatologia Dinâmica. As técnicas são inovadoras e expressam a preocupação dos autores em transmitir, de maneira didática, as aplicações e estudos de caso.

O primeiro capítulo, intitulado “Climatologia: Contribuições à Dinâmica Climática”, apresenta as bases conceituais da climatologia em escala planetária e as relações entre a superfície terrestre e a atmosfera no contexto de teleconexões. Ilustram por meio de ferramenta computacional os procedimentos para aquisição, tratamento, análise e interpretação de dados de índices pluviométricos e geração de mapas e gráficos.

No segundo capítulo “Processos e Sistemas Atmosféricos: Contribuições Teóricas e Aplicadas em Climatologia Dinâmica”, os pesquisadores apresentam uma síntese da climatologia da América do Sul, trazendo a discussão sobre a Climatologia Clássica e a Climatologia Dinâmica, tendo como alicerce teórico a Escola Brasileira de Climatologia.

Em seguida, o capítulo “Clima Urbano: Contribuições Teóricas e Aplicadas em Cidades de Pequeno e Médio Porte”, traz uma reflexão sobre duas Escolas de Climatologia Urbana, sendo a primeira com investigações do professor canadense Timothe Oke, e a segunda, com proposições teórico-metodológicas do professor brasileiro Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, além de estudos de caso para cidades de porte médio e pequeno do Brasil.

O quarto capítulo, “Conforto e Desempenho Térmico: Conceitos e Aplicações em Bioclimatologia e Desempenho Térmico” é fruto dos primeiros estudos da Linha de Pesquisa em Climatologia Aplicada, apresentando um olhar metucioso sobre a influência dos estados da atmosfera nos organismos vivos e no ambiente construído. Revela os conceitos teóricos dos elementos climáticos de base genética e como ocorrem os processos fisiológicos de conforto térmico nos seres humanos.

O último capítulo desta obra, “Tecnologias e Sistemas de Informação: Monitoramento de Ambientes e Aplicações em Climatologia”, ilustra uma visão ampla da aquisição de informações ambientais através de programas e ferramentas de computação e suas aplicações voltadas para o monitoramento autônomo de ambientes.

Boa leitura.

