

MAGDA ADELAIDE LOMBARDO



**ILHA DE CALOR
NAS METRÓPOLES**

O Exemplo de São Paulo

HUCITEC

MAGDA ADELAIDE LOMBARDO

Ilha de Calor nas Metr6poles

O EXEMPLO DE S6O PAULO

Pref6cio de M6lton Santos

SBD-FFLCH-USP



250383

EDITORA HUCITEC
com apoio de
LALEKLA S.A. Com6rcio e Ind6stria
S6o Paulo, 1985

Apresentação

A LALEKLA S.A. tem a grata satisfação de poder, de alguma forma, contribuir para a divulgação deste trabalho. Trata-se de trabalho pioneiro, pelo uso de imagens de satélite, infravermelhas, no estudo da degradação ambiental nas metrópoles, problemas que, dadas as proporções alcançadas, não pode mais ser ignorado ou descurado por qualquer dos segmentos da população. Este trabalho, embora tenha um cunho técnico e científico, não deixa de abordar outros aspectos, inclusive o social, devendo tornar-se leitura obrigatória para intelectuais, técnicos, governantes, legisladores, urbanistas e, também, para os cidadãos interessados pelas condições de vida nas cidades brasileiras.

É preciso agir enquanto há tempo!

LALEKLA S.A. Comércio e Indústria

O Conselho de Administração
A Diretoria

Prefácio

Milton Santos

Com o uso das imagens de satélites foi possível um conhecimento mais extenso e profundo da superfície da terra, beneficiando a pesquisa pura e aplicada em vários ramos do saber humano. A Geografia incorporou esses progressos, enriquecendo-se com uma documentação cada vez mais precisa, a possibilidade de uma descrição mais rica dos fenômenos integrados e a busca de um entendimento mais abrangente.

Este livro não poderia, assim, ser escrito há alguns decênios atrás. O que nele importa, entretanto, não é apenas a novidade do assunto, mas o próprio método utilizado para uma aproximação maior da realidade, permitindo interpretá-la de forma mais precisa e sugerir formas de ação eficazes.

Originalmente escrita como tese de doutorado sustentada na Universidade de São Paulo, a pesquisa de Magda Adelaide Lombardo não apenas constitui um esforço bem medido de aplicação de uma nova técnica de investigação, como, a partir do exemplo de São Paulo, permite verificar como se dá, hoje, a ação do homem sobre a natureza preexistente, no quadro das grandes aglomerações.

O grande problema dos estudos urbanos, hoje que as grandes cidades, sobretudo as do Terceiro Mundo, ocu-

pam superfícies desmesuradas, é a possibilidade, tornada cada vez mais difícil, de se obter uma visão de conjunto que permita um enfoque totalizador e o reconhecimento da hierarquia dos fatores. O método utilizado no presente livro não é, certamente, habilitado a dar conta de todos os fenômenos que se dão nas metrópoles. Mas ele retrata uma das mais graves questões que, hoje, preocupam a humanidade, a questão do meio ambiente. Esse problema é ainda mais grave no Terceiro Mundo e assume feições dramáticas em países, como o Brasil, onde o desenvolvimento material se deu sem as limitações de caráter social e humanístico que conheceu na Europa e, mesmo, na América do Norte.

Os danos ao meio ambiente causados pelo uso especulativo do espaço urbano atingem de forma mais perversa as populações pobres, jogadas para as áreas mais poluídas e menos equipadas, onde ficam ainda mais expostas aos agravos à saúde física e emocional provocados por um entorno doentio. Pode-se dizer que o quadro assim delineado se reproduz, através do próprio funcionamento da sociedade e da economia urbanas, comparecendo como um fenômeno durável de atenuação claramente difícil nas condições econômicas e políticas atuais.

O livro de Magda Adelaide Lombardo mostra, porém, que é possível dominar o conhecimento das causas do fenômeno e este é, sem dúvida, o primeiro passo e, certamente, o mais importante, para todo e qualquer esforço para lhe dar solução. Só nos cabe esperar que, como um dos resultados positivos da publicação desta obra, condições políticas sejam criadas para que um novo planejamento metropolitano e um novo paisagismo passem a fazer parte dos projetos governamentais e venham a beneficiar milhões de pessoas, vivendo nas cidades em condições dramáticas.

O livro de Magda Adelaide Lombardo, resultado de pacientes anos de pesquisa, é, pois, um marco importante no caminho que agora estamos percorrendo para uma renovação da Geografia e das ciências sociais em geral.

Sumário

<i>Apresentação, Lalekla S.A. Comércio e Indústria</i>	9
<i>Prefácio, Milton Santos</i>	11
1 Qualidade ambiental nas metrópoles	15
2 Critérios adotados neste trabalho	43
3 A Metrópole Paulistana: desafio ao estudo do ambiente	55
4 Urbanização e ilha de calor	77
5 A Ilha de calor da Metrópole Paulistana: dinâmica temporal e espacial	111
6 A ilha de calor e suas relações com as condições naturais e sociais	209
7 A ilha de calor: realidade permanente?	217
Bibliografia	223
<i>Apêndice</i> Algoritmo para análise de imagens de satélites termais	239

1

QUALIDADE AMBIENTAL NAS METRÓPOLES

No contexto do território brasileiro, em que a degradação ambiental ocorre de maneira diversa e em vários níveis temporal e espacial é nas áreas metropolitanas que se notam as maiores alterações. Em contrapartida a natureza, aí, reage violentamente às manipulações do homem e, nessa contradição de forças, provoca desastres ambientais que podem ocasionar elevados custos sociais, na medida em que interferem diretamente na qualidade de vida dos habitantes.

Fenômenos inter-relacionados, como ilha de calor, poluição do ar, chuvas intensas, inundações, desabamentos passam a fazer parte do cotidiano urbano, sobrepondo mais um fenômeno aos demais, fazendo com que a população se defronte com essa natureza alterada e conviva diariamente com os problemas dela decorrentes.

Esse trabalho pode induzir a expectativas sociais extremamente importantes para encontrar os referenciais de valores e atitudes do homem urbano no seu contato com a natureza, a fim de estabelecer novas metas e ações.

Aflora daí um problema de educação e de conscientização em todos os níveis e, em última análise, na formação e na utilização de pessoal adequado à preservação e ao manejo dos recursos naturais renováveis nas áreas urbanas brasileiras.

Essa pesquisa, ao lado de outros trabalhos ligados à compreensão da análise ambiental nos espaços urbanos, pode oferecer subsídios, sob forma de soluções alternativas apresentadas ao poder público, a quem compete as decisões para as futuras mudanças. O trato dos problemas ambientais, além dos necessários fundamentos científicos, exige a tomada de medidas reparadoras de natureza administrativa, envolvendo estrutura e instituições de nossa sociedade.

Uma dessas instituições é a econômica, pois algumas medidas necessárias para reduzir a intensidade de degradação do meio ambiente são onerosas ou resvalam, constantemente, em interesses econômicos de uma minoria da população que detém grande parcela do território urbano.

Atualmente, a natureza sofre um processo de degradação, principalmente em áreas densamente urbanizadas.

É necessário uma dimensão social desses fenômenos, a fim de que os recursos naturais de propriedade comum sejam mais preservados. A consequência da degradação ambiental é configurada socialmente na distribuição tanto equitativa como desigual dos problemas deles decorrentes, dos quais a ilha de calor e a poluição do ar destacam-se como os mais notáveis.

A complexidade dos problemas do ambiente, principalmente em áreas urbanizadas com crescimento anormal, exige métodos radicalmente novos para se rediscutir a questão urbana. Toda busca ecológica supõe uma reflexão prévia sobre a sociedade, o que permitirá melhor redimensionamento da qualidade de vida do homem.

A qualidade da vida humana está diretamente relacionada com a interferência da obra do homem no meio natural urbano. O homem urbano defronta-se com a impessoalidade da grande aglomeração e com a má qualidade do meio ambiente, geradas pela rápida transição da vida urbana metropolitana.

A urbanização desordenada causa problemas ecológi-

cos: o desequilíbrio crescente entre a população e os meios materiais e, em contrapartida, a contaminação em todas as suas manifestações. A natureza humanizada, através das modificações do ambiente, alcança maior expressão nos espaços ocupados pelas cidades, criando um ambiente artificial.

A cidade é a maior expressão social do espaço produzido e sua realidade mais complexa e transformada. Cabe aqui discutir o espaço urbano numa perspectiva do ambiente, a questão da natureza alterada pela interferência das relações de produção, a segunda natureza.

"O conceito *natura naturata* representa uma realidade que não se pode conceber na idéia, nem realizar-se de fato, sem as condições oferecidas pela outra realidade que o conceito de *natura naturans* representa. Essa validade que, geneticamente, é a primeira, não é imóvel e se destina inexoravelmente a transformar-se em '*natura naturata*'. Enfim, há sempre uma primeira natureza prestes a se transformar em seguida; uma depende da outra, porque a natureza segunda não se realiza com as condições da natureza primeira e a natureza primeira é sempre incompleta e não se refaz sem que a natureza segunda se realize" (Santos, M., 1980).

A natureza deve ser encarada no momento historicamente determinado da produção social. O homem reage na natureza, a modifica, constrói novas condições de vida. A natureza é dinâmica, o que se deve, também, à atividade humana. Não existem mais ecossistemas naturais que não estejam, de algum modo, modificados pelo homem. É importante não ver a natureza isolada das variações produzidas pela ação humana.

A dominação da natureza pelo homem encontra-se ligada à apropriação dessa natureza. Assim, "a natureza destruída como tal, terá que ser reconstruída e reconstrói-se já num outro plano, o outro nível, o de uma natureza segunda: a cidade e o urbano" (Lefevre, 1969).

É no espaço urbano que os problemas ambientais atin-

gem maior amplitude, notando-se maior concentração de poluentes do ar e da água e degradação do solo e subsolo, em consequência do uso intensivo do território pelas atividades urbanas.

O descontrole processual em que se dá o uso do solo produz dificuldades técnicas de implantação de infra-estrutura, altos custos de urbanização e desconforto ambiental de várias ordens (térmico, acústico, visual, de circulação). E a contaminação ambiental resultante implica um lugar desagradável para viver e trabalhar.

Durante as últimas décadas, as cidades dos países menos desenvolvidos que se encontram na franja de clima tropical têm-se convertido numa espécie de atração para a população rural. A numerosa migração rural e as elevadas taxas de reprodução têm provocado uma explosão do crescimento urbano.

Nos países dependentes o crescimento acelerado das grandes aglomerações se deve, principalmente, ao aumento da taxa de crescimento vegetativo, tanto urbano como rural, e às migrações internas rural-urbanas.

A afluência de população para cidades tem uma velocidade que o planejamento urbano, a ampliação da administração e o estabelecimento de um controle sanitário adequado não conseguem alcançar. As pessoas se tornam vulneráveis às enfermidades cardiovasculares, principalmente as de idade avançada. O próprio tamanho cada vez maior das cidades passa a ser inconveniente à população. Nos núcleos de grande edificação e acumulação de calor produz-se stress térmico (ilha de calor) que em clima tropical pode ser persistente, causando desconforto térmico que ultrapassa os limites de tolerância dos habitantes.

A porcentagem de população total que vive em zonas urbanas aumenta constantemente, mas sua distinção e variação é ampla nas diferentes regiões do mundo. Em 1980, 41% da população mundial residia na zona urbana, 1.008.000.000 nas cidades localizadas nas regiões menos

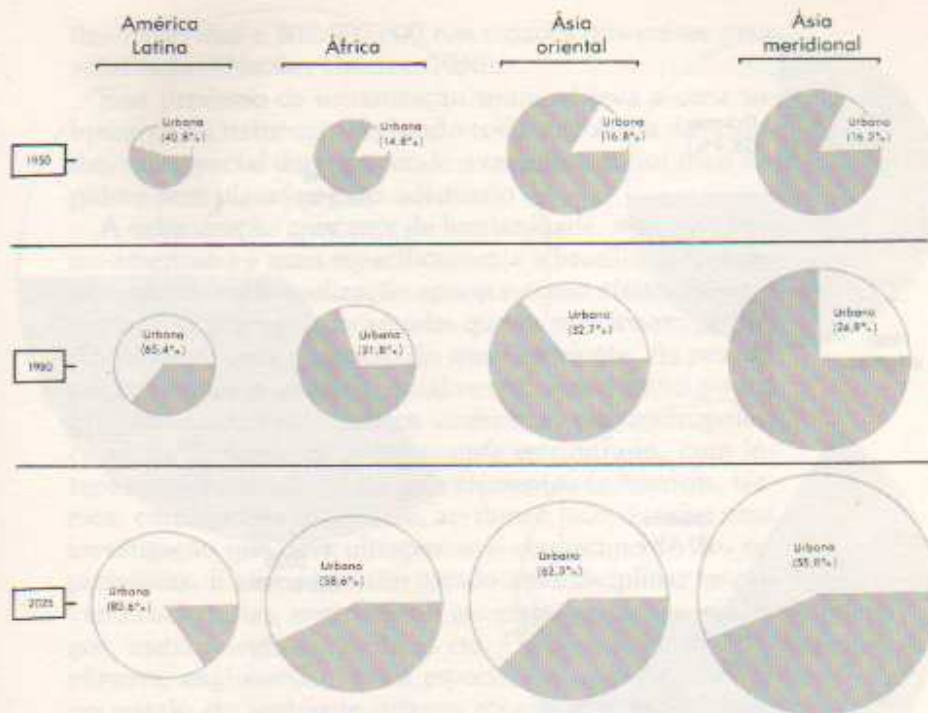


Figura 1. Porcentagem da população urbana por região, variante média, 1950, 1980 e 2025 (Nações Unidas, 1982a).

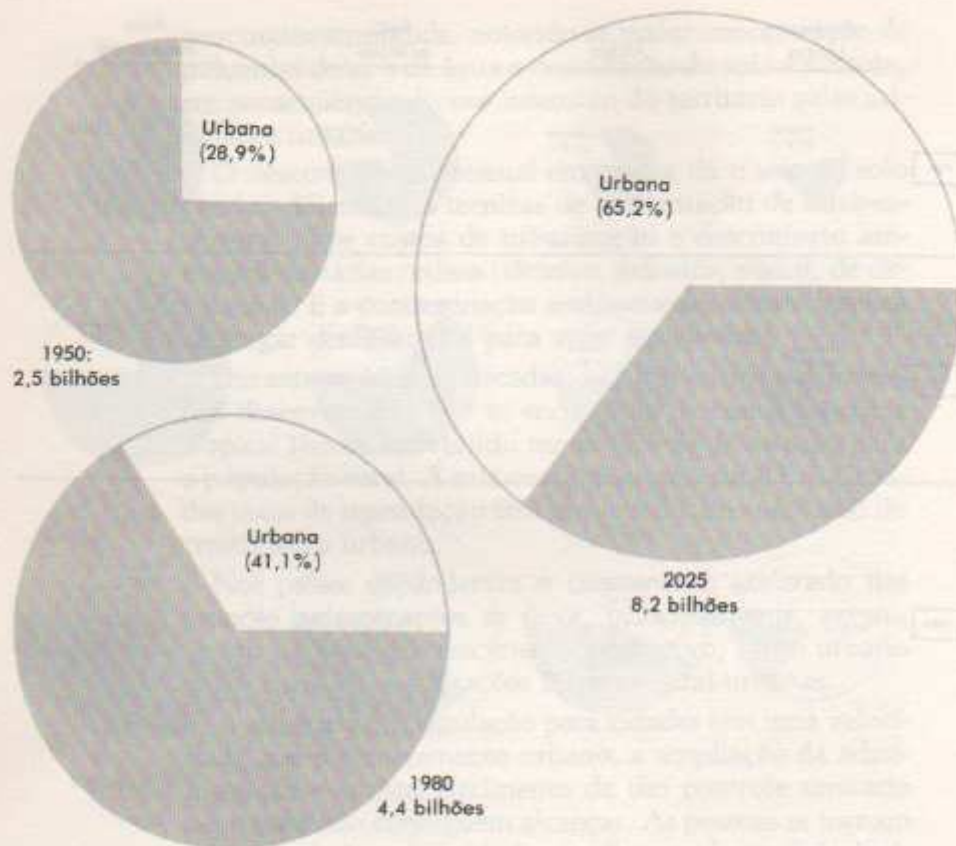


Figura 2. Porcentagem da população mundial que vive em zonas urbanas, variante média, 1950, 1980 e 2025 (Nações Unidas, 1982a).

desenvolvidas e 802.000.000 nas cidades dos países mais adiantados (Nações Unidas, 1980).

Esse processo de urbanização mundial leva a uma sobrecarga da natureza, alterando toda a ecologia das cidades, em especial daquelas onde o crescimento foi mais rápido e sem planejamento adequado.

A urbanização crescente da humanidade, mesmo a latino-americana e mais especificamente a brasileira, cujo fenômeno de metropolização aparece como efeito mais intenso, tem preocupado aqueles que se relacionam profissionalmente com a questão do meio ambiente. As pesquisas em ecologia urbana, atualmente, ainda estão pouco integradas. A problemática ambiental nas metrópoles, com um ecossistema diversamente estruturado, com inter-relações complexas de seus elementos (o homem, técnica, construções, solo, água, ar, flora e fauna), exige uma investigação que deve ultrapassar o conhecimento dos especialistas. É necessário um estudo interdisciplinar envolvendo urbanistas, engenheiros, geógrafos, biólogos, ecólogos, meteorologistas, médicos etc. Os projetos interdisciplinares, englobando vários especialistas, podem auxiliar no estudo do ambiente urbano através das análises dos processos e funcionamento, das variações tempo-espaciais, no contexto de uma análise dinâmica e globalizante.

Uma metrópole sem planejamento adequado do uso do solo, com ausência de parâmetros adequados de verticalização e ocupação, sobretudo onde ela cresce a uma velocidade rápida e com poucos recursos técnicos, pode colocar em risco a qualidade de vida dos seus habitantes.

No caso das metrópoles brasileiras, destacando-se principalmente São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, o crescimento ocorre com tamanha intensidade que afeta o ambiente não só do espaço ocupado pela cidade mas também extrapola o nível regional. Tornam-se necessários estudos básicos para uma posterior intervenção a nível do planejamento e dos projetos urbanos.

Em países dependentes, como é o caso do Brasil, em

que a maior parte da população urbana é carente de recursos básicos, tais como habitação, serviços (água, energia e esgoto) e transporte, a intervenção a nível tecnológico na correção do espaço urbano torna-se economicamente inviável. Daí a necessidade de estudos que dêem subsídios para um controle de ocupação do espaço urbano, fixando parâmetros físicos para um ambiente urbano mais compatível com a qualidade de vida humana.

Na análise ambiental urbana é necessário, ainda, considerar o espaço tridimensional — planos horizontais e verticais (incluindo o espaço aéreo, o solo da cidade e o espaço subterrâneo) — e as características de amenidades do meio natural. É importante, também, estudar o meio ambiente urbano na sua dinâmica tempo-espacial, aí compreendidos os elementos produzidos pelo homem, em distintas combinações.

No caso específico das condições atmosféricas, a cidade apresenta alterações climáticas muito diferenciadas das áreas circunvizinhas. A intensidade de urbanização, expressa em termos de espaço físico construído, altera significativamente o clima. Landsberg (1965) mostra algumas diferenças significativas dos dados climáticos no ambiente urbano e rural, permitindo uma visualização das alterações dos parâmetros físicos produzidos pela ação humana. É evidente que essas alterações variam de cidade para cidade em virtude da intensidade de uso do solo, do processo de crescimento urbano e das características geoecológicas do lugar.

O clima urbano é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização. É um mesoclima que está incluído no macroclima e que sofre, na proximidade do solo, influências microclimáticas derivadas dos espaços urbanos. Por outro lado, a cidade deve ser considerada parte integral do espaço regional, assim como suas contradições internas. Deve-se analisar as variações do ambiente urbano, nos vários níveis, tais como nos bairros, ruas, casas, ambientes internos. A ação eco-

lógica natural, associada aos fenômenos urbanos, constitui o conjunto complexo de inter-relações que produzem o clima urbano.

Os valores extremos dos parâmetros climáticos nas cidades podem levar à situação de pressão bioclimática para o homem que aí vive e com conseqüências ecológicas prejudiciais, também, à flora e à fauna. O homem, em sua jornada diária, sofre estímulos contraditórios de uso inadequado do solo e contaminação ambiental em todos os níveis.

Uma das mais significativas expressões da alteração climática na cidade diz respeito aos valores de temperatura e concentração de poluentes. Esses fenômenos podem ser usados como indicadores da degradação ambiental que freqüentemente ocorre nos espaços urbanizados.

As cidades contribuem para a alteração do balanço de energia, gerando bolsões sobre as áreas urbanas, denominadas ilhas de calor. Este fenômeno reflete a interferência do homem na dinâmica dos sistemas ambientais. Constitui-se num referencial de que nos espaços urbanos ocorre o máximo de atuação humana sobre a organização da superfície terrestre.

O processo de urbanização alcançou proporções significativas de expressão espacial a partir dos meados do século XIX. Com a expansão das cidades, modifica-se substancialmente a paisagem natural. A grande concentração de áreas construídas, parques industriais, adensamento populacional, pavimentação asfáltica, associados à concentração de poluentes, criam condições para alterar o comportamento da baixa troposfera (camada limite), em ambientes urbanos.

No caso específico da ilha de calor, que constitui parte do estudo do clima urbano, o fenômeno é o resultado das modificações dos parâmetros da superfície e da atmosfera pela urbanização (Oke, 1972). A distribuição das isotermas nas cidades mostra uma tendência para o aumento da temperatura da periferia em direção ao centro.

Estudo pioneiro foi realizado por Luke Howard, sobre o clima de Londres, em 1818. No centro das cidades, os edifícios funcionam como "labirinto de refletores" (Lowry, 1967). Nesse sentido, a rugosidade urbana, associada à grande condutibilidade térmica dos materiais, como o concreto, causam efeitos de reflexões da radiação muito complexos. Essas superfícies aquecidas, interagindo com o ar, proporcionam um sistema altamente eficiente para aquecer grandes volumes de ar. Por outro lado, a geometria dos prédios funciona como obstáculo para o vento, modificando o seu fluxo natural e dificultando também a dispersão do calor.

A ilha de calor urbana corresponde a uma área na qual a temperatura da superfície é mais elevada que as áreas circunvizinhas, o que propicia o surgimento de circulação local. O efeito da ilha de calor sobre as cidades ocorre devido à redução da evaporação, ao aumento da rugosidade e às propriedades térmicas dos edifícios e dos materiais pavimentados. Bornstein (1968) verificou que o alto aquecimento urbano é o principal fator a caracterizar a ilha de calor em Nova York durante o inverno. A poluição pode influir na absorção e reemissão da radiação na área ocupada pela cidade, ocasionando, também, um excedente de temperatura. A concentração de poluentes é a "maior aberração climática das condições naturais trazidas pela urbanização" (Landsberg, 1956) e coincide, em geral, com o maior índice térmico no interior das cidades. Como o ar tende a circular em direção à parte mais quente, as partículas de poluentes tendem a convergir para o centro das cidades (Lowry, 1967).

A camada de poluentes, que a princípio pode apresentar certa tendência a refletir a luz solar (reduzindo a radiação direta que atinge a superfície) dificulta, por outro lado, o escoamento e a dispersão do calor (Lowry, 1967). Parte da radiação absorvida pelos aerossóis será emitida para baixo, aquecendo, assim, as camadas inferiores. Uma parcela do calor será absorvida e reemitida pela su-

perfície. Assim, a concentração do ar poluído não só contribui na formação da ilha térmica como também "altera a estrutura vertical das temperaturas de forma a retardar a sua dispersão" (Peterson, 1969).

A radiação solar que entra na cidade é menor, como já foi elucidado, devido à grande quantidade de aerossóis. No entanto, ocorre um aumento da radiação emitida pela cidade, no espectro de ondas longas, causada por temperaturas de superfície mais elevadas, como concreto, tijolos, asfalto e outros materiais de construção. Em condições principalmente de calmaria, em que há poucas trocas turbulentas, grande parte da energia irradiada volta à construção urbana através da reemissão radiativa de onda longa pela atmosfera.

A formação da ilha de calor urbana pode ser atribuída, segundo Eriksen (1978), aos seguintes fatos:

- efeitos da transformação de energia no interior da cidade, com formas específicas (estruturas verticais artificialmente criadas), cores (albedo) e materiais de construção (condutibilidade);
- redução do resfriamento causado pela diminuição da evaporação (poucas áreas verdes, transporte de água da chuva através de canalização);
- produção de energia antropogênica através da emissão de calor pelas indústrias, trânsito e habitações.

A produção de energia antropogênica aumenta a temperatura, uma vez que o calor emitido pela ação humana nas grandes cidades ultrapassa o balanço médio de radiação.

É no centro das áreas urbanas, em lugares pobres em vegetação, que as temperaturas alcançam valores máximos. Por outro lado, os valores mínimos são registrados em áreas verdes e reservatórios d'água.

Com o aumento da temperatura nas cidades, ocorre uma diminuição da umidade relativa. Em dias extremamente quentes, o desconforto térmico associado à umidade relativa baixa provoca um "clima de deserto artificial", terminologia descrita por Eriksen (1978). A elevação das

temperaturas pode aumentar a capacidade de absorção do vapor d'água. No verão, principalmente em áreas próximas de corpos d'água, altos valores de pressão de vapor, conjuntamente com aumento da radiação de ondas longas, produzem a sensação desconfortável de ar aquecido e úmido.

A ilha de calor pode modificar as correntes de vento na cidade, mas essa implicação deve ser analisada também com o tipo de tempo, a posição orográfica, a estrutura das construções e o sítio urbano. As cidades, em época de calmaria, recebem ventos da periferia em direção ao centro, aumentando, assim, a possibilidade de concentração de poluentes no ar.

A ilha de calor pode, também, causar um aumento de precipitação nas áreas urbanas. O efeito da rugosidade das construções, o ar quente ascendente e o aumento dos núcleos de condensação devido à concentração de aerossóis, podem provocar um aumento da quantidade de precipitação de 5 a 10%, registrando-se também a elevação da incidência de granizos. O efeito da geada é reduzido em torno de 25%. Por outro lado, a flora e a fauna tendem a adaptar-se ao calor dos centros urbanos.

O excesso de calor associado à qualidade do ar nas cidades pode também prejudicar a saúde do homem, causando-lhe distúrbios de coração, de circulação e respiração, segundo Eriksen (1978); este estudo se insere, portanto, como componente básico ligado à questão do conforto térmico.

Muitos trabalhos de pesquisa foram realizados em áreas metropolitanas localizadas em latitudes médias. Entretanto, nem sempre os modelos estabelecidos para climas temperados são necessariamente adequados para se estudar o comportamento climático urbano em latitudes baixas. No Brasil há escassez de trabalhos teóricos e empíricos sobre clima urbano; assim, este estudo é proposto como contribuição para a análise da interferência do ambiente urbano nas alterações do clima local, o que, por

sua vez, poderá contribuir para o estudo do conforto térmico nas metrópoles localizadas nos trópicos.

Para a realização do trabalho foi escolhida a área ocupada pela Metrópole Paulistana, uma vez que ela se apresenta como de grande complexidade de uso do solo e com acentuado crescimento vertical e horizontal. São Paulo é a maior metrópole brasileira, tanto em população, como em área construída. A elevada densidade demográfica, a concentração de área construída, a pavimentação asfáltica e as áreas industriais podem interferir nas alterações do clima local, notadamente nos valores da temperatura do ar. Qualquer modificação brusca de temperatura (sendo ela um parâmetro significativo nas alterações dos estudos atmosféricos) afeta todo o equilíbrio climático local. Portanto, é de fundamental importância o estudo da ilha de calor da Grande São Paulo, a fim de fornecer subsídios à melhor compreensão do comportamento atmosférico, quando em contato com áreas altamente urbanizadas do trópico brasileiro.

O estudo da ilha de calor deve estar condicionado aos atributos ligados à ação antrópica sobre o ambiente urbano, aos condicionantes geoecológicos, e exige um arcabouço teórico capaz de enquadrar, no tempo e no espaço, fatos complexos e simples da realidade urbana.

Basicamente, houve a preocupação em se desenvolver essa pesquisa apoiada no referencial teórico-metodológico e também em trabalhos empíricos.

De acordo com essa orientação, foram marcados os seguintes passos para o tratamento do problema:

1. análise da dinâmica da ilha de calor de São Paulo, através de dados empíricos;
2. teste de algoritmos e utilização de imagens de satélites, na faixa do infravermelho, para o estudo da ilha de calor;
3. avaliação da dinâmica da ilha de calor e sua interação com as condições sinóticas;

4. relação do gradiente térmico com os diferentes usos do solo urbano;
5. trabalho de campo para testar os resultados obtidos através das imagens de satélites meteorológicos;
6. análise da ilha de calor no contexto de degradação ambiental do espaço metropolitano de São Paulo;
7. estudo da relação entre ilha de calor, concentração de poluentes e alteração no campo de precipitação.

Revisão bibliográfica

O fenômeno ilha de calor da metrópole enquadra-se no contexto da ecologia urbana, e, mais especificamente, na climatologia urbana.

Na avaliação da ação antrópica sobre as condições climáticas é imprescindível uma observação meteorológica ajustada às escalas inferiores de abordagem. Nesse sentido, a pesquisa nos níveis micro, topo e mesoclimáticos pode revelar o grau de interferência da ação do homem nas condições ambientais, projetada em espaços sub-regionais; a par disso, a incorporação da tecnologia de satélite serve de grande auxílio na análise temporal e espacial do fenômeno.

Fenômenos inter-relacionados, como ilha de calor, poluição do ar, chuvas intensas e inundações, passam a fazer parte do cotidiano urbano, fazendo com que a população se defronte com essa natureza alterada e conviva diariamente com os problemas dela decorrentes.

Os primeiros estudos realizados sobre o clima urbano foram pautados na cidade de Londres, por Evelyn (1661) e Howard (1833). Entretanto, os trabalhos de Landsberg e Chandler (1965) são considerados clássicos. Tanto no estudo de Landsberg como de Chandler, a abordagem é mais meteorológica do que geográfica, numa análise separatista, faltando assim uma correlação dos fenômenos meteorológicos e urbanos.

Landsberg (1956) analisa as alterações que ocorrem com os elementos temperatura, umidade relativa, precipitação, nevoeiro, vento, quando em contato com a área urbanizada.

Chandler (1965) conclui que a cidade modifica o clima através das alterações em superfície, produzindo aumento de calor e da precipitação, assim como modificações na ventilação e umidade. Destaca, também, que há alteração na composição da atmosfera e aborda o problema da concentração de poluentes em cidades industrializadas.

No estudo específico da ilha de calor urbana muitos trabalhos foram realizados na Europa, Estados Unidos e, mais recentemente, no Japão. Pela análise dos autores, nota-se maior quantidade de trabalhos empíricos. O desenvolvimento de modelos matemáticos estão sendo implementados.

Lowry (1967) destaca também as alterações do clima causadas pela urbanização, principalmente nas grandes cidades.

Clarke e Peterson (1973) usaram análise de regressão simples e regressão linear múltipla para relacionar as observações de temperatura, do uso do solo e variáveis meteorológicas. Os dados usados neste estudo consistem de observações de temperaturas de superfícies noturnas sobre a cidade de St. Louis em dezessete pontos-padrão durante o inverno, primavera e verão de 1952-1953. A configuração espacial da ilha de calor está associada ao uso do solo e às variáveis meteorológicas (especialmente à direção do vento). As componentes espaciais são associadas às temporais, através da análise de regressão. As equações de regressão derivadas são usadas como base do modelo empírico da ilha de calor.

Endlicher (1981) diz que, numa escala sub-regional ou local, a modificação do clima pelo homem exerce uma influência mais qualitativa que quantitativa. Por exemplo, a insolação, a temperatura do ar e as precipitações são mais acentuadas nas cidades do que nos campos adjacen-

tes. Medidas itinerárias foram feitas em Annecy, com duração de uma a duas horas, em diferentes tipos de tempo. Seis medidas foram efetuadas a pé, com ajuda de um termistor, de um radiômetro e de um anemômetro ambulantes para a situação de tempo bom e calmo, no verão de 1979, através de um perfil sul-norte. Foram analisados os perfis térmicos matinais, ao meio-dia e à noite.

Norwine (1972) teve como objetivo analisar o padrão de temperatura da superfície em um complexo de lojas no subúrbio de Schaumburg, 25 milhas a noroeste de Chicago. O estudo estendeu-se pelo período do inverno, entre 1 de janeiro e 31 de março de 1972, num total de 84 amostras. Fez-se transecto com automóvel equipado com termômetro de mercúrio. Os dados de temperatura foram mapeados de diferentes maneiras, tais como: mapas de médias de temperatura em janeiro, fevereiro e março; mapas térmicos noturnos com condições meteorológicas favoráveis (céu claro e calma) e mapas com condições meteorológicas desfavoráveis (vento e nebulosidade).

Fukui (1964) tece considerações sobre as condições climáticas das áreas urbanas que são diferentes dos seus arredores. Tais condições são produzidas, principalmente, pelo calor artificial e fumaça contínua em uma área densamente concentrada de construções e população, edifícios de concreto, cimento e pavimentação asfáltica. Diante disto, numa seqüência secular do clima, a temperatura pode aumentar com a expansão das áreas construídas. Outros elementos, como umidade relativa, velocidade do vento, quantidade de precipitação, visibilidade etc. têm também mostrado uma distinta variação. Foram selecionadas catorze estações meteorológicas urbanas no Japão, para estudar as alterações ocorridas na temperatura, ao longo do período de 1900-1940. O autor relaciona o aumento da população, com a variação da temperatura, nas cidades.

Matson et alii (1978) utilizam-se de dados digitais e imagens do satélite NOAA-5, do dia 28 de junho de 1977,

no infravermelho, para detectar mais de cinquenta ilhas de calor urbanas no oeste e nordeste dos E.U.A. Através dos dados digitalizados do satélite foram selecionadas as cidades que apresentavam variações de temperatura rural-urbana de 2,6°C a 6,5°C. Após uma breve discussão sobre as condições atmosféricas locais foram analisadas as ilhas de calor de St. Louis, Baltimore e Washington, DC. Discutiu-se a possibilidade de estudos regionais sobre o efeito da ilha de calor, incorporando a magnitude da entrada da energia associada com corredores urbanos, em modelos de tempo regional. Os autores propõem a possibilidade de se usar, futuramente, imagens e dados digitais dos satélites meteorológicos TIROS-N e LANDSAT-3, com melhores resoluções, para estudos sazonais da ilha de calor, bem como para o seu monitoramento.

Shitara (1957) mostra os padrões de temperatura de Hiroshima a 1,5 metro do solo. Foram usados termômetros de aspiração instalados em carros. Verificou-se os efeitos das áreas construídas sobre a atmosfera, no inverno. Na noite de 21 de dezembro de 1955, constatou-se que as temperaturas nas margens do rio, e no rio, convergiam para um valor definido. À medida que se afastava da margem, na direção leste, as temperaturas se elevavam, nas áreas habitadas. Em lugares abertos, a temperatura declinava até atingir a mínima na margem do rio. As maiores temperaturas foram verificadas no centro urbano construído com concreto enquanto que no subcentro, em áreas construídas com madeira, a temperatura foi semelhante àquela do rio. Fez-se novamente outra medida no dia 22 de dezembro, com resultados semelhantes. No dia 21 do mesmo mês, durante o dia, as temperaturas no centro urbano foram semelhantes àquelas do subcentro, podendo concluir-se que o mecanismo de elevação da temperatura durante o dia é diferente do noturno.

Shitara (1959) usou termistor para medir a temperatura do ar nas cidades. O autor desenhou uma curva destas flutuações e verificou que estas curvas eram compostas

de ondas grandes e pequenas. O resultado de várias observações mostrou que as mudanças substanciais da temperatura do ar estão numa altura aproximada de 15 metros. Isto é devido às altas frequências das massas de ar quente na baixa atmosfera, que podem ser explicadas pela influência dos edifícios e pela estrutura vertical dos ventos de superfície.

Shitara (1955) analisou a distribuição da temperatura do ar, em abril, na costa, principalmente entre Hiroshima e Kure. A temperatura mínima de Hiroshima é mais baixa que de Kure, principalmente em noites claras. Isto pode ser explicado pelo declínio descontínuo da temperatura em Hiroshima, enquanto o declínio da temperatura de Kure é contínuo. Em Hiroshima, há a influência da topografia e da posição geográfica. O vale do rio Ota favorece a penetração do ar frio. Kure, cercada de montanha, raramente sofre queda de temperatura brusca.

Kayane (1964) selecionou cinco estações meteorológicas em Tóquio, para verificar mudanças históricas de temperatura. Baseou-se em trinta anos de dados climáticos, com início em 1926. Calculou a tendência da temperatura máxima e mínima mensais. A média anual da temperatura derivada do aumento de temperatura mensal foi expressa numa tabela. As diferenças de temperaturas mensais de Tóquio com as estações da redondeza foram calculadas para cada ano. As diferenças de temperatura de Tóquio e Kumagaya parecem indicar a influência da expansão de Tóquio. Geralmente, Tóquio é mais quente que Kumagaya tanto em relação às temperaturas máximas ($0,2-0,4^{\circ}\text{C}$) como às mínimas ($1,6-2,4^{\circ}\text{C}$). Entretanto, há uma tendência do módulo da diferença de temperatura máxima tornar-se maior nos anos recentes. Isso pode ser explicado devido à rápida expansão de Tóquio após a Segunda Guerra Mundial. As mesmas diferenças são vistas entre Tóquio e o centro suburbano Kichijorji. Dentro da Grande Tóquio não houve mudança histórica significativa entre a diferença de temperatura máxima e

mínima de Tóquio e Nishigahara. Por volta de 1930, durante parte do verão, as temperaturas eram mais elevadas em Kichijorji do que em Tóquio. Nos anos 50, Tóquio tornou-se em média 1 a 2°C mais quente que o centro suburbano, e a frequência de distribuição de temperatura tornou-se anormal.

Myrup (1969), fazendo estudos para uma cidade hipotética da Califórnia, indicou que os parâmetros mais importantes que determinavam a intensidade da ilha de calor eram:

— a redução da evaporação (pela ausência de vegetação e água disponível): a radiação solar que não é usada na evaporação é carregada para o aquecimento das ruas, edifícios e do ar da cidade;

— o aumento da rugosidade (pela presença de edifícios), aumentando a turbulência, que age para transferir calor para cima, ao mesmo tempo que diminui o escoamento zonal;

— as propriedades térmicas dos edifícios e dos materiais de pavimentação absorvem energia durante o dia, e à noite emitem radiação de onda longa, o que ocasiona excesso de temperatura durante a noite, maior que durante o dia.

Kratzer (1956) atribuía a ilha de calor primariamente ao efeito da poluição atmosférica urbana. A nuvem de poluição à noite devia absorver e reemitir radiação térmica para a cidade, ocasionando o excesso de temperatura noturna observada.

Bornstein (1968) notou que o auto-aquecimento deveria dar a contribuição dominante para a ilha de calor em Nova York durante o inverno. Representou esquematicamente o balanço de energia na região rural e urbana e verificou que, na região urbana, o termo Q_F (calor conduzido pelos edifícios) é maior à noite.

Shepard (1958) notou que a perda noturna de radiação de onda longa, por uma camada de neblina, era capaz de resfriar o ar acima da camada por vários graus centígra-

dos, assim produzindo uma camada de inversão superior, quando a inversão se situa a uma certa altura da superfície. Várias horas depois do nascer do sol, as camadas de neblina são destruídas pela insolação.

Cech et alii (1976) investigaram a ilha de calor em Houston, Texas, em dois anos consecutivos. Foram obtidas informações de temperatura e de umidade e relacionadas com o uso do solo urbano. Através de mapas utilizou-se a técnica de computador para detectar as trocas antropogênicas nas características microclimáticas da área. Como metodologia de trabalho, realizou-se o monitoramento de um transecto sobre a área de estudo e o uso intensivo de estações fixas. Dessa forma, confeccionou-se vários mapas através do uso do computador (SYMAP), que ilustram a distribuição da temperatura do ar em diferentes condições de tempo, comparando-se diferenças diurnas e noturnas. Em muitos casos, as diferenças de temperaturas registradas em agosto variaram de 3 a 6°C. O maior gradiente apareceu associado a céu claro e à noite. Evidenciou-se uma correspondência rígida entre as áreas de elevada temperatura e os padrões de uso do solo. As áreas comerciais e as de concentração das indústrias pesadas apareceram com as temperaturas mais elevadas. As temperaturas altas foram também associadas às localidades de maior concentração populacional e de área construída. O contraste térmico entre as zonas comerciais e industriais e as zonas suburbanas é muito grande, especialmente nas horas mais frias da manhã. Essas diferenças podem ser explicadas pela ação antropogênica.

Yonetani (1983), através de experimentos matemáticos, comprova que a ilha de calor promove o desenvolvimento de cúmulus. O início e o desenvolvimento de cúmulus estão diretamente afetados pela anomalia térmica que ocorre nos centros das cidades. Foi investigado numericamente como a ilha de calor afeta a dinâmica e a estabilidade do desenvolvimento dos cúmulus, isto é, o calor artificial da superfície pode acelerar a formação dos cúmu-

lus. Foram consideradas as seguintes hipóteses: *a)* a atmosfera é instável e o efeito do vento não foi incluído; *b)* a ilha de calor está incluída, mas não foram examinados os processos físicos que a produzem; *c)* a ilha de calor é circular; *d)* a temperatura na superfície da ilha de calor é constante no tempo; *e)* todos os coeficientes adicionais de difusão são iguais e constantes no tempo e no espaço (50 m³/s na maioria dos casos); *f)* os movimentos são rígidos; *g)* o processo físico das nuvens é parametrizado segundo Kessler (1969); *h)* todas as condensações de vapor d'água supersaturados e água das nuvens das regiões não-saturadas evaporam-se instantaneamente. Os autores concluíram que, em condições de estabilidade, a ilha de calor modifica de tal forma a atmosfera que pode provocar a formação de cúmulus. A ilha de calor com mais de 2°C de diferença na temperatura pode ser acompanhada por chuvas. A formação de cúmulus é variável sobre a ilha de calor, dependendo da diferença na escala horizontal e da variação na distribuição de temperatura no solo. Demonstrou-se que é o movimento ascendente da camada inferior que provoca diretamente a atividade dos cúmulus sobre a ilha de calor. Em muitos casos, esse efeito pode explicar as anomalias de precipitação em áreas urbanas.

Eriksen (1978) estudou a ilha de calor em Hanôver no dia 13/8/1979 e fez a associação com os diferentes usos do solo. Na região central da cidade, onde a concentração de prédios é expressiva, a temperatura variou entre 25 e 26°C, enquanto que nas áreas verdes, parques e jardins, oscilou entre 20 e 21°C.

Vukovich et al. (1978) observaram e simularam as variações diurnas da circulação da ilha de calor urbana e aquelas associadas com a distribuição de ozona. A temperatura de superfície observada e a temperatura da atmosfera superior, bem como os padrões de campos de ventos no dia 8/6/1976 em St. Louis, foram analisados e comparados com resultados de simulação para um modelo hi-

drodinâmico tridimensional. Uma ilha de calor urbana (1 a 2°C de diferença entre as regiões urbana e rural) persistiu durante o dia. O diferencial de temperatura durante o dia foi baixo, quando comparado com o da noite (cerca de 5°C de diferença). Por outro lado, a circulação na ilha de calor foi maior durante o dia. Pela manhã, a circulação na ilha de calor dissipou-se devido ao desenvolvimento de uma inversão superficial na camada limite. Ainda nessa investigação, a maior concentração de O₃ na superfície foi encontrada na zona de convergência associada com a circulação da ilha de calor urbana imediatamente a sotavento, no centro da cidade. Como a circulação da ilha de calor foi dissipada pela manhã, a área de alta concentração de O₃ se deslocou para as correntes inferiores.

Vukovich (1983) extraiu dados de temperatura do solo e padrões de refletividade em áreas da cidade de St. Louis e arredores, utilizando dados do HCMM. A análise mostra diferenças sazonais e diurnas. No verão, e durante o dia, a distribuição de temperatura do solo é influenciada por características de pequena escala na variação do uso do solo. O contraste térmico entre a zona urbana e a rural é de 4,3°C. No inverno, e durante o dia, o padrão é similar ao encontrado na estação quente, mas o contraste não é grande, ficando por volta de 2,4°C. À noite, a temperatura não mostra dependência de características de pequena escala. O contraste entre as zonas rural e urbana é cerca de 2,5°C, similar ao valor encontrado na estação fria durante o dia. A diferença de refletividade entre o centro de St. Louis e a sua zona rural é de 2 a 4 pontos percentuais, semelhante à diferença de albedo observada por White et alii (1978) e Dablerdt and Davis (1974).

Bergstron (1973) estudou os efeitos de poluentes gasosos e particulados na atmosfera urbana em relação à distribuição da temperatura da camada limite urbana. Isso foi conseguido através da construção de um módulo para relacionar a transferência de radiação na atmosfera, transporte de massa, momento e energia na camada limi-

te. A atmosfera com seus gases e partículas foi considerada como absorvendo, espalhando e emitindo energia radiante, anisotropicamente. Uma série de simulações numéricas da estrutura térmica na atmosfera urbana foi realizada para o inverno e verão, com ou sem inversão elevada. As simulações numéricas mostraram que poluentes aerossóis reduzem o fluxo radiante na superfície, assim como a temperatura diurna. A edição do calor solar devido aos poluentes faz com que a atmosfera seja um pouco mais quente em altitudes elevadas. A simulação numérica também mostrou que a temperatura superficial, durante o dia, era menor para aerossóis absorventes em relação aos não-absorventes. Sob as condições investigadas, a maior redução na temperatura de superfície foi de 2°C e a maior elevação foi de 1°C, após dois dias. Os poluentes gasosos aumentaram o fluxo de radiação térmica descendente e, por isso, elevaram a temperatura à noite. O maior aumento de temperatura superficial foi de 3°C depois de dois dias de simulação.

Fujibe and Asai (1980) dedicaram atenção à relação entre o excesso de temperatura urbana e a intensidade do fluxo de vento. Esses dois autores analisam os ventos superficiais na área metropolitana de Tóquio (10 milhões de habitantes). O fluxo ciclônico convergente foi observado numa noite calma (Kawamura, 1977). Foram utilizados dados de vento superficial durante três horas em 1974 e 1975. Analisou-se o padrão de fluxo médio, incluindo todas as diferentes condições de tempo. O fluxo convergente ciclonicamente, com velocidade do vento de 0,2 m/s é visto ao redor da área urbana por $\Delta T = 1,3^\circ\text{C}$ (ΔT é estimada subtraindo-se a média de temperatura das estações suburbanas daquelas dadas pela estação urbana). A distribuição da divergência horizontal e da componente vertical da vorticidade do fluxo sobre a cidade foi de magnitude $5 \times 10^{-5} \text{S}^{-1}$.

Qualitativamente, o mesmo resultado foi obtido para duas condições de tempo diferentes e em todos os horários.

Os autores analisaram ΔT , convergência e vorticidade na situação chuvosa. Assim, em situações chuvosas com estabilidade estática, as diferenças entre as situações não são tão grandes a ponto de afetar o fluxo de modo significativo. Há correlação positiva entre ΔT , convergência e vorticidade, com significância estática ao nível de 5%, sugerindo a importância de ΔT no controle do fluxo. A análise similar com situações sem nuvens, contudo, não mostrou correlação significativa entre ΔT e a intensidade do fluxo diurno e noturno. Isso pode ser explicado como o resultado da influência de outros ventos locais, tais como brisas terrestres e marítimas. O padrão de fluxo em dias sem nuvens sugere, assim, a existência de ventos locais.

Os autores concluem que a média da velocidade de vento para Tóquio é de 0.2 ms^{-1} . O fluxo é intensificado quando aumenta a temperatura da superfície urbana. Por outro lado, o fluxo pode também ser afetado pela estabilidade estática e por ventos locais, quando ocorre um forte influxo em dias sem nuvens.

Sanderson et alii (1973) investigaram o efeito da área urbana no clima de Detroit-Windsor. Para esse estudo sazonal e diurno em relação às diferenças de temperatura urbano-rural, utilizaram-se dados coletados durante dez anos, a cada três horas nos aeroportos City, Metropolitan e Windsor. As diferenças máximas foram encontradas nas primeiras horas da manhã e as mínimas ao meio-dia. Sazonalmente, as diferenças máximas foram observadas de agosto a setembro e as mínimas de janeiro a março. As diferenças entre as transmissividades urbanas e rurais foram estudadas em dias claros de inverno utilizando-se parâmetros de Kipp e Zonen e um modelo para prever a radiação que chega ao topo da atmosfera. As transmissividades foram em média 9% menores do que nas áreas rurais, e, em condições de calma, foram até 25% menores. Quanto à precipitação, concluiu-se através da análise dos dados que, no outono e inverno, Detroit recebe

menor quantidade de chuvas em comparação aos seus arredores; no verão, entretanto, ocorre 20% a mais de precipitação.

Jáuregui (1979) determina os contrastes térmicos cidade-campo, em uma cidade de tamanho médio — Toluca, México. O autor discute que as diferenças térmicas cidade/campo acentuam-se nas noites inverniais. O manto de impureza que cobre a cidade absorve a radiação de onda longa da área urbana e a radiação até o solo. Quanto maior é a cidade, mais acentuado será o efeito do contraste térmico entre cidade e campo. Com o objetivo de determinar o padrão horizontal de temperatura, fizeram-se medidas, com um automóvel dotado de psicrômetro e anemômetro, em condições de céu claro e de ventos fracos; como resultado, constatou-se que as temperaturas mais elevadas encontram-se em áreas de maior concentração de edifícios e as mais baixas nos subúrbios, ao sul da cidade. A magnitude dos contrastes cidade/campo está relacionada com o seu tamanho. Quanto maior a quantidade de fontes de calor e de contaminação, mais acentuada será a ilha de calor.

Os maiores contrastes de temperatura ocorrem no inverno e vão de 4 a 5°C, em média. Nessa época, verificam-se as maiores inversões e a maior concentração de poluentes contribui para aumentar o contraste térmico cidade/campo. Quanto à umidade relativa, os valores menores foram registrados na área de máxima temperatura da ilha de calor.

Entre muitos outros, devem ser destacados os estudos de Oke sobre clima urbano. Discutindo a base energética da ilha de calor urbana, Oke (1982) mostra que os estudos estão no estágio inicial e se desenvolvem de maneira desigual. Nos últimos 150 anos, os estudos permaneceram nos níveis de reconhecimento e de descrição do fenômeno ou, então, em análises estatísticas de uma cidade. Com poucas exceções, a pesquisa de processos e modelos físico-matemáticos estão restritos à última década.

As dificuldades para o estado insatisfatório desse campo de estudo incluem:

1. a complexidade inerente do sistema cidade-atmosfera. O estado da atmosfera é uma resposta às trocas de energia, massa e movimento que cobre um grande intervalo de escalas espaciais e temporais. Em áreas urbanas, as fontes e sorvedouros dessas trocas são distribuídos heterogeneamente e envolvem fatores antrópicos e naturais;

2. a falta de esquemas conceituais e teóricos para a pesquisa;

3. o custo e as dificuldades de observações urbanas. Considera-se a variabilidade espacial e temporal do fenômeno que cria problemas de amostragem. Além disso, há restrições ao uso de sistemas de observação (torres, aviões, balões, radiossondagens). O autor ressalta que a ilha de calor é especialmente notável na fronteira cidade-campo, a sotavento, e segue o contorno da cidade. O interior da área urbana é caracterizado por menor gradiente horizontal de temperatura, com variação devida à densidade de área construída. Um parque ou lago pode ser relativamente frio, enquanto que áreas industriais, conjuntos residenciais, áreas comerciais ou centrais podem ter temperaturas mais altas. O calor da cidade pode ser levado pelo vento e a fronteira a sotavento torna-se, então, menos distinta. A ilha de calor sofre variações diurnas marcantes. A velocidade divergente de resfriamento entre ambientes urbanos e rurais ao pôr-do-sol produzem um aumento da intensidade da ilha, até atingir o máximo poucas horas mais tarde. O maior resfriamento urbano reduz a intensidade da ilha, até desaparecer com o aquecimento rural matinal. A influência da ilha de calor ao nível dos prédios estende-se atmosfera acima, na forma de um domo.

O autor destaca, também, a importância da localização geográfica, da topografia, do solo, da vegetação e do uso do solo. O tamanho da cidade também afeta a formação da ilha. Devem ser ressaltados, ainda, os parâmetros

meteorológicos como o vento e a cobertura de nuvens. Em cidades de clima temperado, ocorrem variações sazonais da ilha, sendo que a maior frequência incide no outono e verão. O fato de a ilha ser mais forte no verão, enquanto que o maior aquecimento das residências ocorre no inverno, parece indicar que o calor antropogênico não é muito importante. A ilha de calor deve surgir de diferenças do balanço de energia rural-urbano, embora não haja provas observacionais.

Após discutir as prováveis causas da sua ocorrência, abordando as diferentes escalas de análise e, ao nível dos prédios e ao nível da camada limite urbana, o autor conclui que o fenômeno é muito descrito e pouco compreendido. Tais estudos nas cidades tropicais podem ter alguma importância na compreensão da análise e atenção aos processos: o maior desafio consiste em explicar os processos relevantes e as escalas de atividade na atmosfera urbana e fornecer generalizações e síntese para o desenvolvimento de modelos numéricos.

No Brasil, merecem referência os trabalhos de Monteiro (1976), Tarifa (1977), Danni (1980) e Sampaio (1981).

Monteiro (1976) destaca a importância do estudo de climatologia urbana e propõe uma análise dinâmica, baseando-se nas inter-relações espaço e tempo.

Tarifa (1977) estabelece correlação entre tamanho e temperatura da cidade de São José dos Campos.

Danni (1980) estuda os aspectos da temperatura do ar da cidade de Porto Alegre no outono e início do inverno.

Sampaio (1981) procura correlacionar uso do solo e elevação da temperatura interna no ambiente urbano, analisando o caso de Salvador.

Na atualidade existe uma extensa bibliografia referente aos estudos de ilha de calor das cidades médias e grandes das latitudes temperadas. O estudo de climatologia urbana é recente na faixa tropical (Tabela 1).

As grandes áreas urbanas dos trópicos se localizam em países subdesenvolvidos com poucos recursos financeiros

Tabela 1. Comparação entre estudos de clima urbano em áreas tropicais e em cidades de clima temperado (Oke, 1974, 1979, 1980).

Período	Estudos de clima urbano		
	Latitudes médias	Latitudes baixas	%
1968-1973	368	8	2,17
1974-1976	475	5	1,05
1977-1980	554	13	2,35

para a pesquisa, insuficiência de postos meteorológicos, dificuldades de aquisição de instrumentos sofisticados e de pessoal técnico especializado. Os trabalhos de climatologia urbana, centrados nas cidades tropicais, utilizam-se dos dados das estações meteorológicas e também de medidas móveis, obtidas por equipamentos acoplados a veículos automotores.

As dificuldades econômicas associadas à deficiência de instrumentos sofisticados (sondas, torres, aviões etc.) podem explicar em parte o lento avanço da climatologia urbana nos trópicos.

Com o objetivo de contribuir para o estudo do clima urbano nas baixas latitudes é que tentamos desenvolver o trabalho de ilha de calor na Metrópole Paulistana, tentando incorporar as tecnologias de ponta, através do uso de imagens de satélite, combinadas com medidas fixas e móveis. Esse trabalho, ao lado de outros, poderá auxiliar outras investigações nas cidades localizadas na faixa intertropical.

2

CRITÉRIOS ADOTADOS NESTE TRABALHO

Este trabalho de pesquisa foi permeado de reflexão ao nível metodológico e de adequação das técnicas à análise da complexidade do fenômeno estudado, o que envolve as várias escalas da organização climática, desde a regional até microclimas como também a organização sócio-econômica do espaço metropolitano.

Os parâmetros naturais e os referentes ao uso do solo urbano foram analisados e compatibilizados através do uso de imagens de satélites. O desenvolvimento de uma metodologia para o uso de imagens de satélite bem como para o trabalho de campo foram fundamentais para a realização deste trabalho, conforme está sintetizado no roteiro metodológico.

Os satélites meteorológicos fazem parte do grupo de satélites de sensoriamento remoto e monitoramento do meio ambiente. Entre estes satélites podem citar-se como principais os seguintes: NIMBUS-G, SEASAT, LANDSAT, SMS/GOES e TIROS-N.

Dentre estes satélites, os meteorológicos são considerados operacionais e têm um programa de ação bastante definido (SMS/GOES e TIROS-N).

Os satélites meteorológicos TIROS-N são de órbita polar e baixa (840 km) e coletam dados atmosféricos globais, especialmente sobre as regiões polares. Estes satéli-

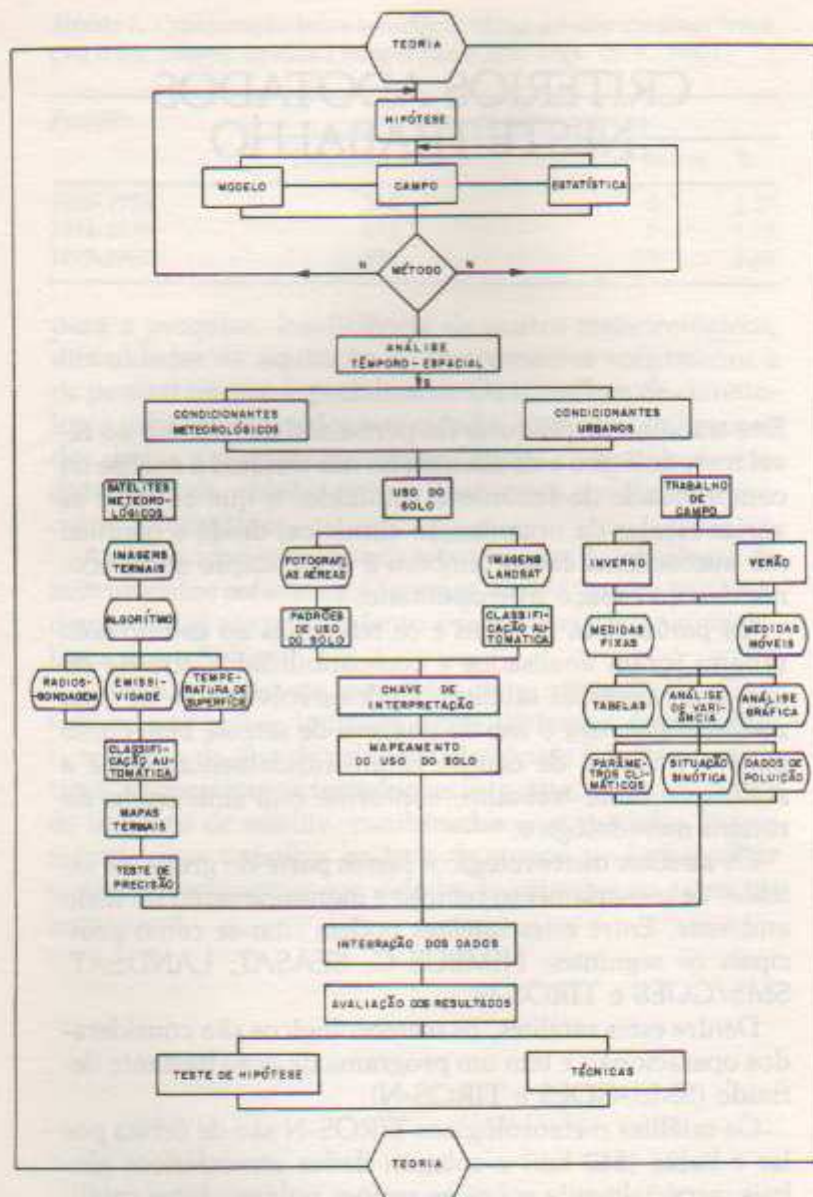


Figura 3. Roteiro metodológico.

tes são também chamados de heliossíncronos, por manterem constante a sua posição angular relativa ao Sol. Eles são colocados em órbita circular, com período em torno de 102 minutos, podendo ter passagens diurnas ascendentes ou descendentes (N-S/S-N).

A série TIROS-N está planejada para operar até 1985, quando deverá ser substituída. O NOAA-6, da série TIROS-N, foi lançado às 17:27 G.M.T., no dia 27 de junho de 1979 e o NOAA-7 foi lançado em 22 de junho de 1981. A vida útil destes satélites é planejada para dois anos.

A observação da terra a partir destes satélites é feita sobre uma mesma região, em passagens que se repetem a cada seis horas, alternadamente, pelos dois satélites operacionais do sistema.

Os principais instrumentos e sistemas a bordo são:

- * Radiômetro Avançado de Resolução Muito Alta (AUHRR) — Mapeamento noturno e diurno de nuvens, de temperatura da superfície;

- * Sondador Vertical Operacional TIROS (TOUS) — Dados para o cálculo de perfis de temperatura, conteúdo de vapor d'água da atmosfera, e conteúdo total de azônio;

- * Monitor de Ambiente Espacial (SEM) — Mede raio-X solar e partículas energéticas — Sistema Argos de coleta de dados (DSC) — localização das plataformas em bóias flutuantes livres e em balões, e aquisição de dados de plataforma em qualquer parte do mundo.

O AUHRR é sensível em cinco canais espectrais. Os canais 1 (0,58 a 0,68 μm) e 2 (0,725 a 1,0 μm) são usados para discernir nuvens, separação terra/água, extensão das coberturas de neve e gelo, indicação do começo da fusão do gelo e da neve, e sedimentos em suspensão. O canal 1 auxiliou na localização da cidade de São Paulo. O canal 5 (11,5 a 12,5 μm) foi importante no estudo das temperaturas de superfície, essenciais para caracterizar a ilha de calor.

Foi necessário desenvolver um algoritmo para se estabelecer relações entre níveis de cinza das imagens do satélite meteorológico no infravermelho e temperatura. O proce-

dimento para o estudo da ilha de calor com imagens termiais foi apresentado no VII Simpósio Internacional de Sensoriamento Remoto e Meio Ambiente realizado em Ann Arbor, E.U.A. por Lombardo et alii (1983).

Tendo como referência estudos realizados por Chahine (1980) para os oceanos, implementou-se um programa de computador destinado a construir imagens termográficas da Metrópole Paulistana a partir de imagens radiométricas.

A classificação automática foi feita através de imagens gravadas em fitas digitalizadas, ampliadas, na escala . . . 1:100.000 no vídeo do Image-100 (Tabela 2).

Tabela 2. Relação das imagens termiais dos satélites meteorológicos.

<i>Data</i>	<i>Hora local</i>	<i>Tipo de satélite</i>
21/8/80	15:32	TIROS-N
24/2/81	7:00	NOAA-6
26/6/81	7:20	NOAA-6
16/7/81	14:47	NOAA-7
13/8/82	15:27	NOAA-7
16/9/82	15:02	NOAA-7
18/9/82	14:56	NOAA-7
23/9/82	15:29	NOAA-7

A dificuldade na seleção de imagens apropriadas para a implementação do algoritmo consiste na necessidade de se encontrar condições de estabilidade atmosférica favoráveis: céu claro, ausência de nebulosidade, baixo teor de vapor d'água. Na área de estudo estas condições são encontradas quando ocorre o predomínio do Anticiclone Polar Tropicalizado ou o Anticiclone Tropical Atlântico permitindo ao sensor captar a temperatura da superfície.

O trabalho de campo

O trabalho de campo serviu como verdade terrestre, apoio aos dados obtidos por satélite, e à compreensão da

dinâmica do fenômeno ilha de calor (diurna e sazonal) e suas relações com os diferentes usos do solo e topografia.

Os episódios, medidos em superfície, através do trabalho de campo, refletem as variações do clima urbano nos diferentes ambientes da Metrópole Paulistana, sob determinadas condições de tempo. Essas variações térmicas estão associadas às escalas meso, topo e microclimáticas do espaço interno urbano.

Desenvolveu-se uma metodologia para o estudo de campo em uma realidade urbana complexa, com usos do solo diferenciados.

Foram instalados 45 postos fixos de medidas de temperatura em diferentes locais, tendo como referência as agências bancárias* (Fig. 4). As medidas foram registradas às 9:00, 15:00 e 21:00 horas locais, em diferentes situações de tempo meteorológico, com o objetivo de explicar o comportamento da cidade frente às variações climáticas, tentando caracterizar o fenômeno ilha de calor, numa visão processual e dinâmica.

As medidas foram efetuadas nos dias 29 a 31 de julho e 1 a 18 de agosto de 1982 — situação de inverno e 6 a 18 de dezembro de 1982 — situação de verão.

Os termômetros da marca R. FUESS foram padronizados no 7º Distrito Meteorológico e distribuídos pelas agências bancárias. As medidas foram feitas a 1,50 m do solo, na sombra, com a orientação norte, evitando-se o efeito de contato direto com os raios solares ou com paredes.

Esses dados associados com as medidas padrões das estações meteorológicas, registros de intensidade e direção dos ventos, poluição, foram plotados no mapa base do uso do solo de São Paulo, na escala 1:50.000.

Foram desenhadas as isotermas de todo o período analisado, considerando-se para o traçado os padrões de uso do solo e as variações topográficas.

*Essas medidas foram obtidas com a colaboração das agências do Banco do Estado de São Paulo — BANESPA.

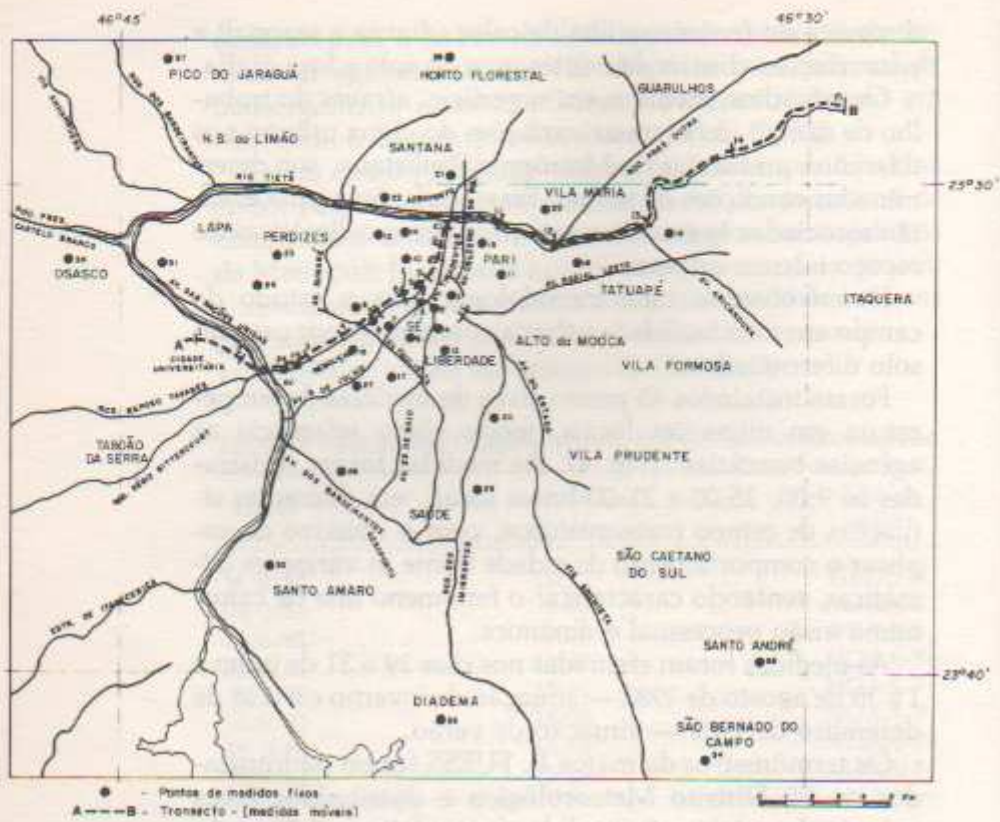


Figura 4. Localização dos postos fixos e móveis de medidas de temperatura.

Complementou-se a análise com dados de radiossondagem (diurno e noturno) da Metrópole Paulistana e cartas sinóticas, fornecidas pela CETESB.

Em seguida, traçou-se isotermas médias para os três horários, nos dois episódios analisados — verão e inverno.

Concomitantemente, foi feito um transecto no sentido O-L, com 15 pontos fixos, com aproximadamente 28 km, saindo da Cidade Universitária em direção ao centro de São Paulo e, depois, estendendo-se para o leste, até alcançar a Rodovia dos Trabalhadores, cobrindo uma faixa bem diversificada de uso do solo (Fig. 4).

Esse transecto foi feito às 9:00, 15:00 e 21:00 horas. Os parâmetros de temperatura do ar, temperatura radiométrica, umidade relativa e velocidade do vento foram medidas através dos seguintes instrumentos: psicrômetro de funda marca LOTA Keiki Seisakushoco, anemômetro transmissor Wilh LAMBRECHT e radiômetro PRT5.

As medidas de temperaturas radiométricas tiveram uma orientação em quadrantes, nos quinze pontos fixos estipulados nos transectos (Fig. 4). Através dessas medidas foram feitos gráficos, contendo os parâmetros medidos e o perfil de urbanização. Os dados das estações meteorológicas bem como aquelas das estações de poluição do ar foram importantes como auxílio à pesquisa. Foram confeccionados vários gráficos contendo os elementos climáticos nos horários das 9:00, 15:00 e 21:00 horas, bem como análise dos dados de poluição, no período considerado pela pesquisa.

As técnicas para análise do uso do solo

Os vários sensores utilizados, desde o nível de fotografias aéreas até imagens orbitais foram importantes para o desenvolvimento da metodologia para a classificação dos diferentes tipos de uso do solo, condizentes com a abordagem do fenômeno ilha de calor. Assim, a preocupação principal foi analisar a distribuição espacial dos diferentes

usos do solo e sua contribuição nas variações de temperatura na Metrópole Paulistana.

Utilizou-se fotografias aéreas na escala 1:8.000, terra-foto 1977, e imagens de satélite LANDSAT-3, com classificação automática de dados, na escala aproximada de ... 1:100.000, na tela do sistema I-100. A imagem LANDSAT sob o formato de fita compatível com computador (órbita 164; ponto 28 de 11/8/81) foi utilizada para que esses dados fossem correlacionados com as temperaturas obtidas com a classificação automática de imagens termais dos satélites meteorológicos.

Foram selecionadas dezoito áreas amostrais de 1 km², em diferentes áreas da Metrópole Paulistana, com o objetivo de estudar a disposição espacial das várias classes de uso do solo (Fig. 5) e a emissividade.

As amostras, segundo a área analisada, tiveram a seguinte chave de interpretação:

- Edifícios
- Área construída
- Ruas pavimentadas
- Estacionamento
- Indústria
- Gramma
- Vegetação arbórea e semi-arbórea
- Corpos d'água.

Essas amostras foram importantes por terem permitido avaliar os prováveis padrões de uso do solo existentes. Esse primeiro nível de abordagem na escala 1:8.000 contribuiu para a elaboração do mapa de uso do solo na escala 1:50.000 e posteriormente reduzido para 1:100.000. Nesse mapa, a chave de interpretação de uso do solo foi dirigida para a definição e caracterização da ilha de calor. Sendo assim, foram identificadas as seguintes classes:

1 - Ocupação vertical

1.1 - Área densamente ocupada por edifícios (altura média de 30 metros), com cobertura vegetal quase ausente (menos de 3%), algumas praças e vias de circulação.

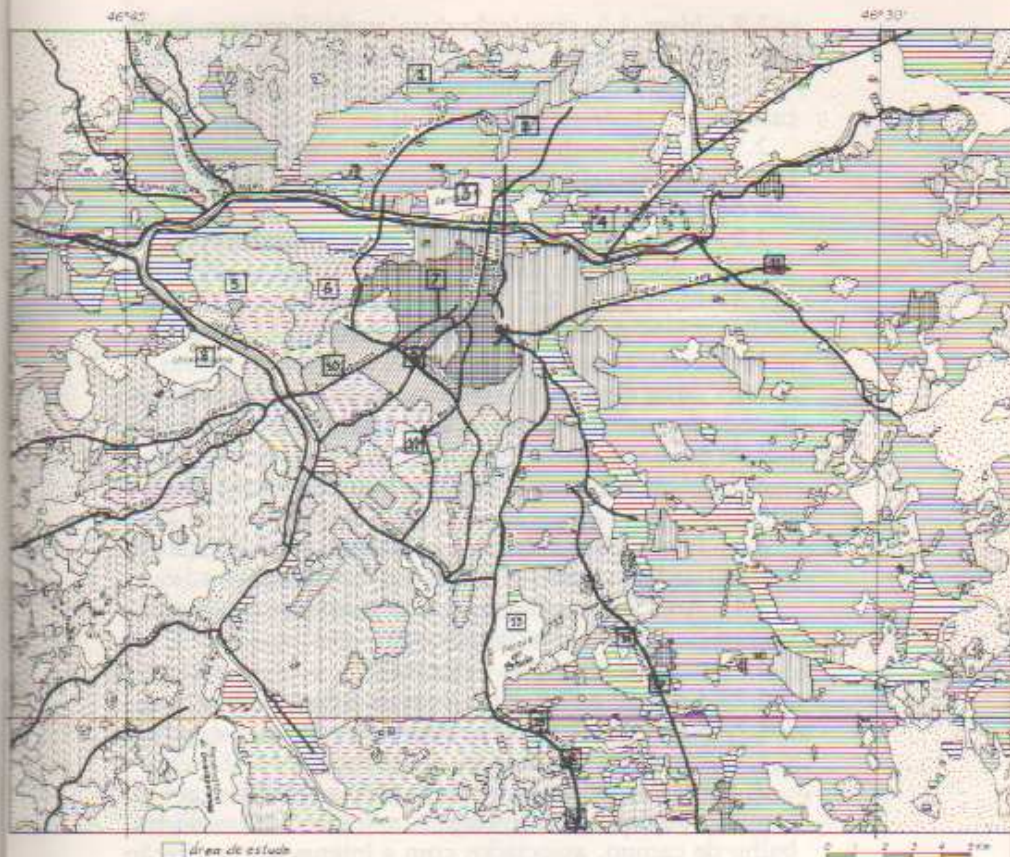


Figura 5. Localização das amostras de uso do solo urbano.

1.2 - Idem 1.1, com cobertura vegetal escassa (entre 3% a 10%) correspondente a praças e vias de circulação.

2 - Ocupação horizontal com ocupação vertical intercalada

2.1 - Área densamente construída (altura média 8 metros), com ausência quase total de cobertura vegetal (menos de 3%).

2.2 - Idem 2.1, com cobertura vegetal escassa, praças, jardins e vias de circulação (de 3% a 10%).

2.3 - Idem 2.1 e 2.2, com cobertura vegetal, praças, jardins e vias de circulação (de 10 a 20%).

3 - Ocupação horizontal

3.1 - Área densamente construída (altura média 6 metros), com ausência quase total de cobertura vegetal (menos de 3%).

3.2 - Idem 3.1, com cobertura vegetal escassa (de 3 a 10%).

3.3 - Idem 3.1 e 3.2, com cobertura vegetal esparsa, praças, jardins e vias de circulação (de 10 a 20%).

3.4 - Área esparsamente construída, com cobertura vegetal nos vazios intersticiais (até 50%).

4 - Áreas desocupadas e parques

4.1 - Com 50 a 70% de cobertura vegetal.

4.2 - Com 70 a 100% de cobertura vegetal.

5 - Grandes concentrações industriais.

A partir de confecção do mapa com a referida legenda, foram plotados os parâmetros climáticos obtidos no trabalho de campo, associados com a intensidade e direção do vento. Em seguida, foram traçadas as isotermas, subsídio à delimitação da ilha de calor.

A outra etapa do trabalho foi estabelecer uma legenda compatível para a escala orbital do satélite LANDSAT-3. Esse mapa temático foi importante na identificação de tipos de uso do solo, comparáveis à escala dos mapas de distribuição de temperatura obtidos ao nível também orbital, com satélites meteorológicos, na escala 1:100.000, no vídeo do IMAGE-100.

Foram analisadas classes amplas de uso do solo, devido às restrições espectrais e espaciais do sistema:

1. Área de ocupação vertical;
2. Área de ocupação horizontal vertical;
3. Área de ocupação horizontal densa;
4. Área de ocupação horizontal rala;
5. Loteamento;
6. Indústrias;
7. Vegetação;
8. Corpos d'água.

Na classificação automática supervisionada, utilizou-se o programa Máxima Verossimilhança (Velasco et alii, 1978), e a resposta espectral nos quatro canais do LANDSAT-3.

Após a classificação automática, foram selecionadas onze amostras de uso do solo, compreendendo 4 km² com a finalidade de quantificar a área de cada classe analisada na quadricula. Essas áreas foram comparadas com os dados de temperatura obtidos das imagens termais do satélite meteorológico a fim de correlacionar os diferentes usos com a variação de temperatura.

Todos esses dados analisados foram inter-relacionados considerando-se a dinâmica do processo. A partir da integração dos resultados num contexto espacial e temporal, procedeu-se a avaliação dos resultados. Essa etapa foi realizada considerando-se os aspectos teórico-metodológicos, as técnicas utilizadas, e a discussão das variáveis empíricas no caso ilha de calor da Metrópole Paulistana.

A METRÓPOLE PAULISTANA: DESAFIO AO ESTUDO DO AMBIENTE

A Grande São Paulo, a maior concentração urbana da América do Sul, possui peculiaridades naturais e sociais que constituem um universo de análise favorável ao estudo da ilha de calor.

A região metropolitana de São Paulo compreende 37 municípios, com uma concentração de população da ordem de 12.588.439 habitantes (censo de 1980) e ocupa uma superfície de 1.563,19 km², o que corresponde a uma densidade demográfica de 8.053 hab/km² (Figuras 6 e 7).

Essa concentração demográfica se distribui de maneira caótica, gerando um ambiente social de contradições que se reflete na organização territorial, somando-se aí as modificações produzidas no ambiente.

Nesse contexto, as peculiaridades do sítio urbano, das condições climáticas e da organização da malha urbana contribuem sobejamente para a estruturação da ilha de calor da Metrópole Paulistana.

Sítio urbano da Metrópole Paulistana

A região em que se localiza São Paulo tem feições geográficas que contribuem para a concentração de poluentes e para a formação da ilha de calor.

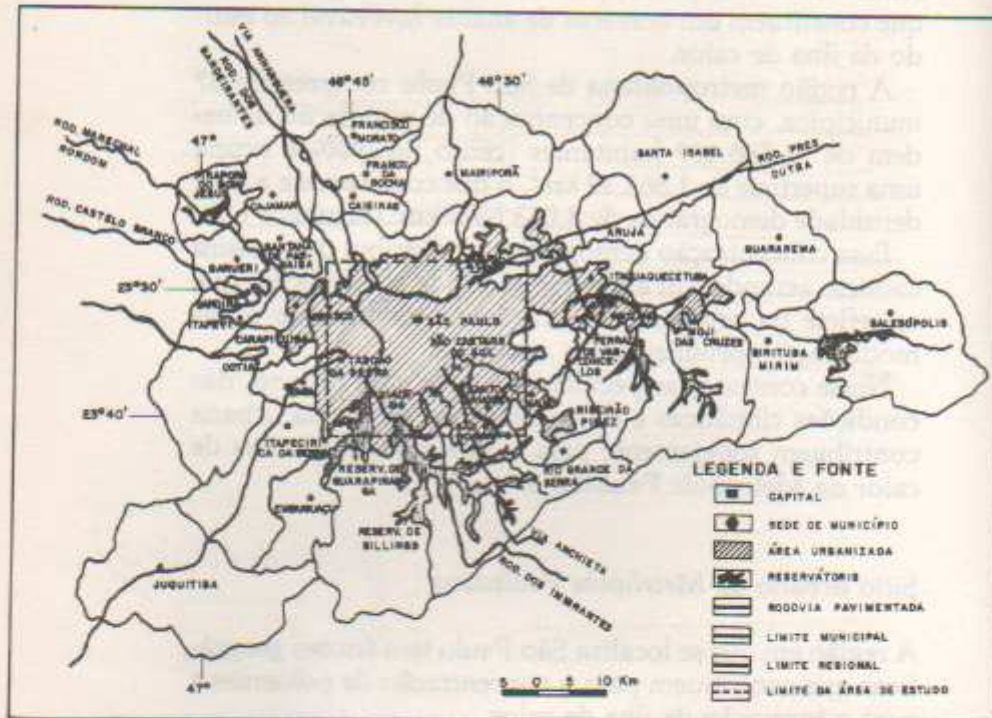


Figura 6. Área de estudo.

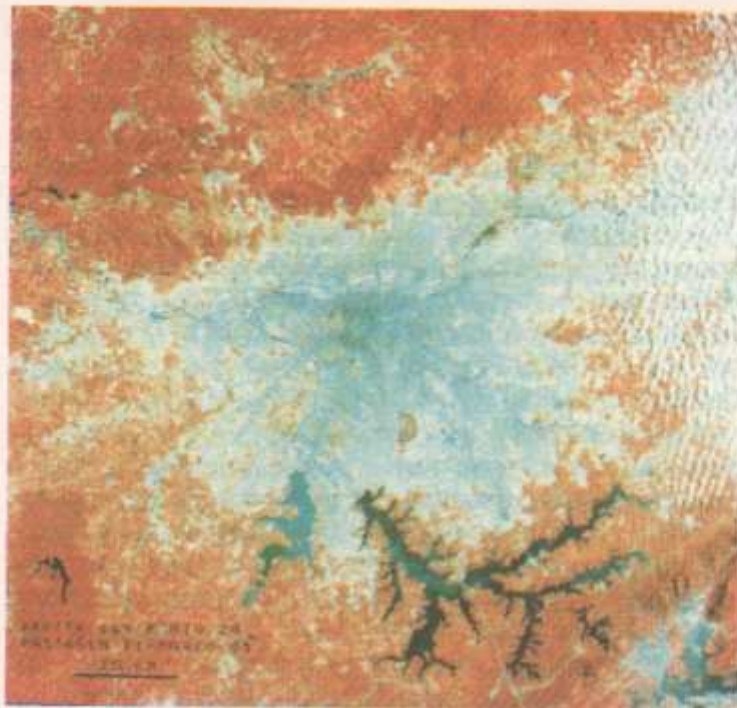


Figura 7. Imagem da área de estudo. Órbita 164/28 de 11/3/1981, LANDSAT/3 (imagem gerada no INPE). Note-se a grande concentração de área construída e a tendência do crescimento urbano em todas as direções, salientando-se maior intensidade na direção leste-oeste.

bacia
A bacia de São Paulo, exaustivamente estudada por Ab'Saber (1957), e posteriormente retomada por outros autores, compreende, em linhas gerais, a área de depósitos terciários do Tietê, na altura do curso superior desse rio e seus limites podem ser encontrados nas vertentes drenadas pela rede de afluentes.

Topografia
A topografia da região, de planícies aluviais e um horizonte irregular de colinas baixas é cercada de áreas amovreadas, que chegam até a ultrapassar 1.000 metros sobre o nível do mar, representadas pela serra da Cantareira (norte), Itapevi (leste), serra do Mar (sul) e maciços elevados de Itapeçerica-São Roque (oeste-sudoeste).

A altimetria e a disposição dos vales do sítio urbano favorecem o crescimento vertical denso no centro da bacia e uma expansão horizontal que, em vários lugares, alcança as regiões cristalinas dos arredores, mais montanhosas.

Essa disposição do relevo contribui para aumentar a intensidade da ilha de calor assim como favorece a concentração de poluentes.

A região metropolitana paulistana, salvo pequenos trechos, enquadra-se na faixa altimétrica de 740-800 m, que corresponde à Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo e à maior parte das bacias dos rios Tietê e Pinheiros. A exceção é feita para alguns municípios periféricos da região, onde predominam as áreas cristalinas, com litologia diversa, principalmente a leste (Santa Isabel, Guararema e Salesópolis), ao norte (Mairiporã, Francisco Morato, Franco da Rocha, Caieiras e Cajamar) e a oeste (Pirapora do Bom Jesus, Santana do Parnaíba, Itapevi, Vargem Grande Paulista e Cotia).

A altitude de 740 m representa o limite mais baixo da área ocupada pelo sítio de São Paulo, correspondendo às áreas de "Colinas Tabulares do Nível Intermediário" (Ab'Saber, 1957). Nesse local, expandiu-se a parte mais antiga da cidade, na primeira fase de crescimento urbano: "Praça da República, Praça da Sé, Santa Ifigênia, Campos Elísios, Belém, Tatuapé e recentemente o Brooklin, India-

nópolis, Jardim Europa, Jardim Paulista, Santo Amaro e outros". Alguns bairros também se expandiram para as cotas inferiores, denominadas de "Baixas Colinas Terraceadas" e os "Terraços fluviais de baixadas relativamente enxutas", com altitudes variando de 724 a 735 m (Ab'Saber, 1957), como é o caso do Bom Retiro, parte da Barra Funda, Brás, Pari, Canindé, Presidente Altino, Itaim, parte da Lapa, Santo Amaro e outros. Acima da cota de 800 m, no relevo esculpido em rochas pré-cambrianas, a urbanização está avançando com menos intensidade, em função dos fortes gradientes das vertentes.

É no intervalo entre as cotas de 740 a 800 m, representado pelas "Altas Colinas dos rebordos dos espigões principais" e nos "Patamares e rampas suaves escalonadas dos flancos do Espigão Central" (Ab'Saber, 1957) que ocorre a maior concentração da urbanização.

A cota de 740 m define o nível das "colinas tabulares de nível intermediário", correspondente ao amplo terraço dos rios Pinheiros e Tietê. Abaixo dessa cota, o relevo vincula-se à dinâmica fluvial mais recente, relacionada à erosão de terraços e sedimentação fluvial. Os sedimentos da Formação São Paulo atingem no máximo a cota de 833 m (Hasui & Carneiro, 1980) e, acima dessa, o relevo está associado às rochas pré-cambrianas, embora haja afloramento dessas rochas em altitudes de 820 m.

No entanto, a mancha urbana ocupa duas extensas áreas sobre terrenos pré-cambrianos, "uma a partir da margem direita do rio Tietê, representando uma longa faixa entre este rio e as bordas sul da serra da Cantareira e outra para oeste, acompanhando principalmente as faixas rodoviárias da Régis Bittencourt, Raposo Tavares, Castelo Branco, Anhangüera e Bandeirantes" (Ross, 1981).

Os sedimentos da bacia de São Paulo têm uma extensão L-W de aproximadamente 85 km, desde Osasco até próximo a Itaquaquecetuba, acompanhando ligeiramente a direção geral do rio Tietê, alcançando a área de Guarulhos e seguindo em direção nordeste até a área de Arujá.

Sua largura média, de norte a sul, na região urbanizada da metrópole, oscila entre 30 e 40 km. Em direção sul acompanha o vale do rio Tamanduateí, chegando até as proximidades de São Bernardo do Campo, Santo André e Mauá. Na bacia do rio Pinheiros, estende-se até a área das represas. Tomando-se o rio como referência, em geral, os sedimentos encontram-se do leito do Tietê para as vertentes da margem esquerda, com exceção do trecho que se inicia na altura do bairro de Santana, estendendo-se por Vila Maria, Guarulhos e Arujá, onde ocorrem também nas vertentes da margem direita deste rio. Considerando-se, no entanto, a área do Campo de Marte para jusante, em direção a Barueri e Osasco, nas vertentes da margem direita do Tietê, praticamente não ocorrem sedimentos da Formação São Paulo, enquanto as vertentes da margem esquerda apresentam-se com esses sedimentos até Osasco.

A espessura dos sedimentos da bacia de São Paulo é da ordem de 319 m (Hasui, Yociteru e Carneiro, C. Dal Re, 1980). Litologicamente, a Formação São Paulo é constituída de sedimentos detríticos areno-argilosos de origem flúvio-lacustrina, inconsolidados, com acamamento horizontal perturbados por falhas normais de pequeno rejeito.

As áreas de colinas em rochas sedimentares de relevo suave foram as que mais atraíram a expansão da urbanização e a plantação industrial. Nas áreas cristalinas, caracterizadas por relevo mais dissecado, os loteamentos foram pontuais, com ocupação de espaços intersticiais, como é o caso da serra da Cantareira. Essa ocupação periférica está associada à predominância de matas, capoeiras e campos.

No entanto, na década de 60 e mais intensamente depois de 1970, grande parte do sítio urbano ocupado com rochas pré-cambrianas sofre o processo de ocupação urbana. É na década de 70 que a cidade enfrenta os primeiros obstáculos físicos: ao norte, os contrafortes da Mantiqueira; a sudoeste, sudeste, oeste e nordeste estendem-se também as áreas serranas. Ao sul, a expansão urbana

atinge e se expande além das represas aí localizadas. Apenas no sentido noroeste, em direção a Campinas e a leste, no sentido do vale do Paraíba, a fragmentação do relevo favorece a penetração urbana.

No setor norte-noroeste a urbanização estende-se pelos bairros de Santana até Pirituba, passando pelos bairros do Limão, Tremembé, Mandaqui, Casa Verde e Tucuruvi. Na parte sul-sudeste, extravasa-se por Diadema, Mauá, Ribeirão Pires, parte de São Bernardo do Campo e na área correspondente entre as represas Billings e Guarapiranga. Para o leste, ocupa a parte alta da Penha enquanto para oeste a área construída avança em direção a Cotia, Itapevi e às partes altas de Osasco. Essas áreas, com predominância de rochas pré-cambrianas caracterizadas por declives acentuados, exigem uma planificação própria de ocupação do espaço, com uma infra-estrutura rigorosa dadas as possibilidades de deslizamentos e erosões.

A maior tendência da expansão urbana ocorre no sentido leste-oeste, ocupando terrenos terciários. A leste, o sítio urbano é favorável, principalmente na área compreendida entre Moji das Cruzes, Susano e Arujá.

A configuração do sítio urbano da Metrópole Paulistana, aliada à posição geográfica, favorece a penetração de massas de ar polares que se dirigem em direção à área urbanizada oriundas do sudeste. A própria dinâmica da circulação atmosférica regional, aliada às condições do sítio urbano, favorece a concentração de poluentes na área ocupada pela cidade. Os ventos de sudeste carregam, através da calha do Tamanduateí, a poluição da área industrial em direção ao centro da cidade. A serra da Cantareira constitui-se num obstáculo para a dispersão dos poluentes. A própria conformação do relevo acentua o fenômeno da ilha de calor.

Integrando-se a essa complexidade, a mancha urbana de São Paulo e a organização do espaço, assim como a dinâmica dos tipos de tempo e suas inter-relações com as peculiaridades espaciais, constituem-se nos elementos

fundamentais para definir e caracterizar a ilha de calor urbana.

O clima local da bacia paulistana

O fenômeno ilha de calor de São Paulo é embutido no seio das variações determinadas pelas condições de tempo, que se reportam às escalas meso, topo e microclimáticas. É necessária a compreensão do comportamento climático da cidade frente às variações climáticas sazonais e até mesmo diárias que, interagindo com as características geográficas específicas da Grande São Paulo, definem temporal e espacialmente a ilha de calor. A ação antrópica nela contida pode ser medida com observações meteorológicas ajustadas às escalas inferiores, o que implica uma reflexão metodológica e adequação técnica de análise às novas exigências de trabalho.

A propósito dos estudos climáticos realizados em São Paulo, Belfort de Matos (1925) efetuou as primeiras análises, onde mostra uma série de médias climatológicas da região de São Paulo, abrangendo o período de 1902 a 1921. Na década de 40, Junot (1942-1943) estuda as chuvas e temperatura na cidade de São Paulo. França (1946), no estudo sobre o clima da bacia de São Paulo, incorpora e aplica os conhecimentos sobre a evolução dos sistemas meteorológicos publicados por Serra (1938, 1939 e 1942), melhorando o nível explicativo de sua análise, cita a ocorrência de alterações de temperaturas face ao processo de urbanização.

Deve-se considerar, entretanto, que a característica peculiar do clima da região metropolitana de São Paulo, com localização geográfica especificamente no planalto, foi descrita pelos europeus como de clima favorável para a ocupação humana.

França (1946) cita que Fernão Cardim (XIII) achou a Piratininga do fim do século XVI "um novo Portugal", en-

contrando-a "[...] muito sadia, há nella grandes rios e geadas e boas calmas". Gabriel Soares (*Notícia do Brasil*, LVIII) observou: "São os ares frios e temperados como em Hespanha". Anchieta fez as melhores observações nesse período inicial da Metrópole Paulistana e transmitiu em algumas de suas *Epístolas*, notícias de detalhes sobre o clima de Piratininga, onde "nec frigore horret hyems, nec calore infestatur aestas" (*Epístolas*, cit. Saint-Hilaire — XLIII). Muitos outros, destacando-se Mawe, Kidder e Saint-Hilaire, fazem também referências às condições excepcionais da região de São Paulo em contraste com as condições tropicais das regiões vizinhas, do interior e do litoral.

No trabalho sobre o clima de São Paulo, França (1946) considera que a posição geográfica da região de estudo reflete-se no comportamento dos fenômenos climáticos. Destaca que "as condições locais da bacia de São Paulo criaram, nesta cidade do trópico de Capricórnio um clima temperado, cuja designação melhor seria: tropical temperado pela altitude, em contraste com o hinterland quente e com o litoral tropical do Estado".

O autor também salienta a importância das brisas marítimas em São Paulo, pela sua própria localização geográfica, e complementa: "Apesar da altitude e do paredão que limita as terras altas, é justamente pelo lado marítimo que a passagem das correntes atmosféricas é mais livre não impedindo o relevo as invasões das massas de ar formadas sobre o oceano" (França, 1946).

Concomitantemente ao avanço da área construída sobre a bacia de São Paulo, há indícios de que a temperatura média aumentou em geral, na região metropolitana. França (1946) cita que "de acordo com Setzer ao comentar a sua tabela nº 65 (v.L.V.), a ascensão verificada processou-se quase uniformemente em todas as estações do ano, devendo ser atribuída ao aumento da área edificada."

A dinâmica da ilha de calor contém, no seu bojo, o comportamento da atmosfera, na evolução dos estados

de tempo, gerados com a participação dos avanços de fluxos de ar frio da massa Polar Atlântica para o norte, ao atingir a área metropolitana, com intensidade variada pode provocar queda de temperatura e chuvas, diminuindo a intensidade da ilha de calor. De acordo com Monteiro (1969), os sistemas atmosféricos resultantes dependem, direta ou indiretamente, da coordenação que exerce sobre eles o Anticiclone Polar Atlântico. Os fluxos são controlados pelos centros de ação, enquanto o ritmo determina seqüências de pluviosidade de maior ou menor intensidade.

A natureza do ritmo da evolução dos estados de tempo no Brasil de sudeste, no qual São Paulo se localiza, é função de uma rica série de combinações. As diferenças de canalização de massa fria pelas rotas do interior e do litoral têm a ver com as ondulações que se produzem ao longo do eixo da Frente Polar em deslocamento e são estas ondulações ou ciclogêneses que explicam os contrastes térmicos gerados pela participação conflitante dos sistemas intertropicais e extratropicais.

Teoricamente, seria de se esperar que, de modo geral, os tipos de tempo que favoreceriam o maior gradiente de temperatura entre o centro e a periferia da metrópole e também a concentração de poluentes, estariam relacionados aos anticiclones estacionários e aqueles que provocam inversões de subsidência (Tropical Atlântica e Polar Atlântica). Os tipos de tempo associados às frentes, caracterizados pela instabilidade atmosférica influem num menor gradiente de temperatura entre o centro e a periferia da área urbanizada como também favorecem a dispersão de poluentes.

As condições de tempo mutáveis, relacionadas às invasões polares e à dinamização frontal, resultante dos seus encontros com os sistemas intertropicais interferem na diminuição intensiva da ilha de calor em São Paulo. Em contrapartida, os tipos de tempo que estão associados ao domínio do Anticiclone Tropical Marítimo, com maior ocorrência de inversão térmica, ventos fracos e baixo teor

pluviométrico, propiciam condições favoráveis para a maior definição e caracterização da ilha de calor de São Paulo e concentração de poluentes. A dinâmica atmosférica associada à ilha de calor será examinada nos próximos capítulos, com a análise dos parâmetros da atmosfera e os elementos intrínsecos à espacialidade da Metrópole Paulistana.

Na análise do clima local, deve-se ressaltar a posição geográfica da Bacia Sedimentar de São Paulo, deprimida topograficamente em relação ao entorno, o que contribui para a formação de ventos locais, catabáticos, com movimentos convergentes, possibilitando um aumento de temperatura. Associando-se ao fato de São Paulo ser rodeada de anfiteatro montanhoso, a rugosidade urbana tende a modificar o fluxo de vento nos baixos níveis (Fig. 8).

Os ventos predominantes em São Paulo são de direção SE, SSE e S, devido à ação do Anticiclone Polar e Tropical na área. Os ventos locais, provenientes do litoral, também acompanham a mesma direção. A velocidade desses ventos é, de modo geral, baixa e eles são mais frequentes na primavera e verão.

Os ventos nas direções NE, N, NNW, NW são menos frequentes, mas com forte intensidade, o que prenuncia a penetração das frentes frias. Ocorrem com maior significância no outono e no inverno.

A brisa marítima, com ventos úmidos, ocorre frequentemente sobre São Paulo. Os ventos são conduzidos pelo vale do Tamanduateí e Pinheiros, principalmente durante o final da tarde e à noite, contribuindo para o aumento do teor de umidade do ar na parte meridional da mancha urbana. A brisa marítima parece contribuir, desse modo, para amenizar o efeito da ilha de calor na parte sul e sudeste da área urbana.

Na análise do fluxo de vento na região da Grande São Paulo, no período de maio a agosto, Oliveira et alii (1983), verificaram que "em todas as estações observou-se que, em média, o fluxo se desloca ao longo das direções

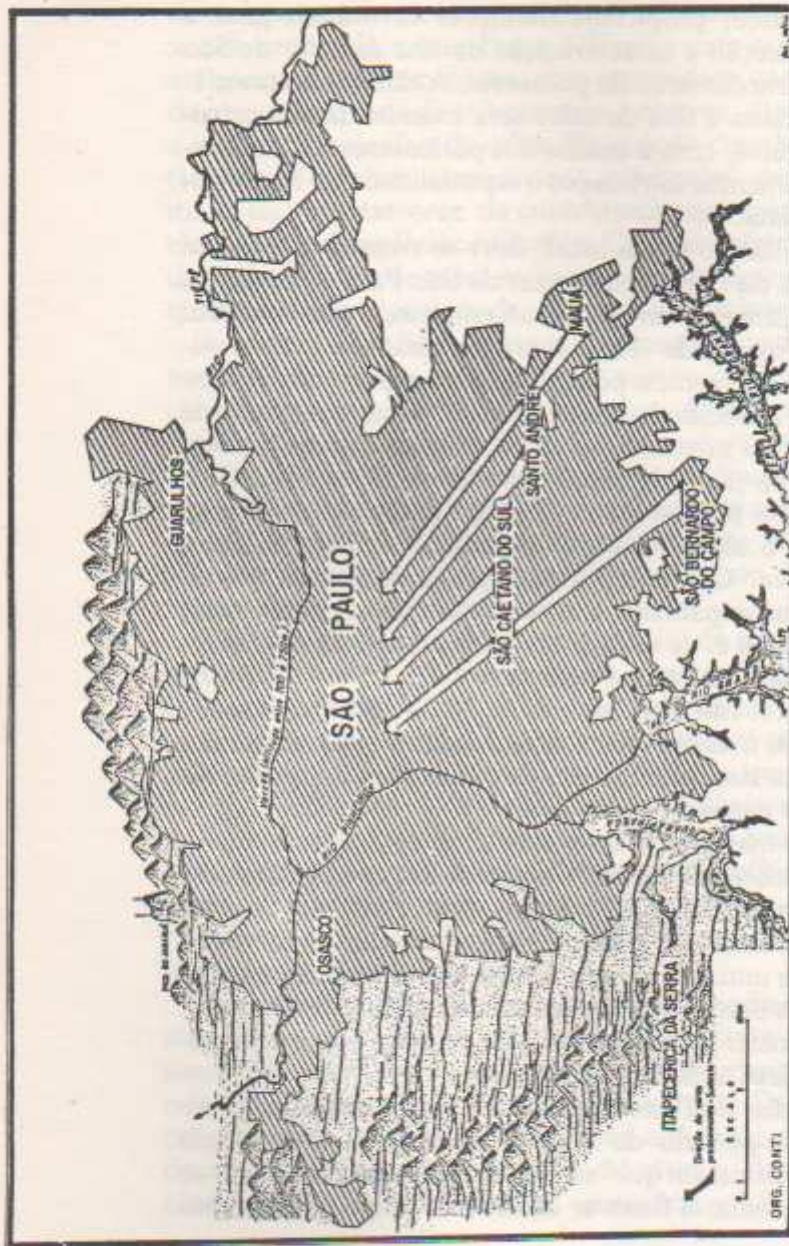


Figura 8. Esboço esquemático da bacia Paulistana. Os ventos predominantes de SE carregam os poluentes da área industrial do ABCD para a bacia de São Paulo, favorecendo a concentração de poluentes no centro da cidade.

sul-sudeste a norte-noroeste. O vento do quadrante norte-noroeste predomina à tarde, com uma velocidade bastante intensa e com pouca persistência, enquanto o vento dos quadrantes sudoeste a sudeste predomina entre o anoitecer e ao amanhecer, com velocidade fraca, porém, com maior persistência".

Esse fluxo de vento, de origem marítima, sopra diariamente ao anoitecer e, dependendo das condições sinóticas predominantes, sua intensidade é variável.

Com o resfriamento noturno, a circulação local tende a estabilizar-se. Parece haver, também, uma relação entre a velocidade e orientação dos ventos e a intensidade da ilha de calor, principalmente no período da tarde e à noite. Os ventos de superfície sofrem os efeitos da rugosidade da cidade interferindo na diminuição de sua intensidade, bem como na sua direção. A concentração de edifícios provoca uma desaceleração do vento, devido à perda por atrito, e favorece, também, sua canalização.

Essas características citadas contribuem para o maior gradiente horizontal de temperatura, como também dificultam o transporte e dispersão dos poluentes na região da Grande São Paulo.

A anomalia térmica, associada ao crescimento da cidade, possivelmente exerce influência negativa na formação de nevoeiros. No centro da cidade de São Paulo, diminui a formação de nevoeiros em virtude do maior distanciamento do ponto de orvalho. Do mesmo modo, pode-se ter a mesma explicação para a diminuição da garoa.

Em contrapartida, com o crescimento da área construída, os episódios de névoa seca, resultantes em grande parte da poluição industrial e de veículos, vem aumentando em São Paulo (Conti, 1979). Nessa configuração, a luminosidade tende a diminuir e a área urbana assume aspecto cinzento, evidência de uma paisagem degradada.

Todas essas transformações que estão ocorrendo no espaço ocupado com a Metrópole Paulistana, associadas à dinâmica da atmosfera, configuram um caráter de com-

prometimento do ambiente, do qual a ilha de calor se constitui num referencial que pode contribuir para explicar o grau de degradação da paisagem urbana.

Expansão da mancha urbana da área metropolitana de São Paulo

Até o início do século XIX, a cidade ocupou alguns vales e várzeas inundáveis e expandiu-se normalmente na plataforma intermediária de 740 m, compreendida pelo ângulo interno da confluência do Tamandateí com o Anhangabaú.

O desenvolvimento urbano e o crescimento demográfico de São Paulo podem ser compreendidos no contexto da evolução da economia brasileira, tendo como referência a expansão da cafeicultura e, posteriormente, a partir de 1930, o processo de industrialização do Sudoeste do Brasil.

A mancha urbana é a expressão espacial do processo de metropolização, resultante do crescimento demográfico que a cidade de São Paulo sofreu desde o final do século XIX até a Segunda Guerra Mundial. A partir da década de 40, ocorreu um processo de hipertrofia da área metropolitana, com expansão horizontal e vertical.

Do final do século XIX ao início do atual, o crescimento de São Paulo acha-se diretamente relacionado à imigração européia e calcada na economia cafeeira. A expansão da cafeicultura para o interior de São Paulo acarretou a necessidade de implantação de ferrovias. A rede ferroviária drenou para a Capital os benefícios da economia cafeeira, acelerando o processo de urbanização.

A cidade cresceu em torno de seu centro histórico, compreendido pelo triângulo formado pela Rua Direita, 15 de Novembro e São Bento, Praça da Sé, do Patriarca, concentrando atividades comerciais e financeiras. Os loteamentos residenciais dispunham-se ao redor do centro,

de forma difusa, muitas vezes isolados entre si. Ao longo das ferrovias surgiam bairros suburbanos e a concentração de indústrias.

No período de 1930/1945, a oligarquia cafeeira foi gradualmente cedendo o poder político que mantinha, seguindo-se uma ampla política da industrialização emergente. A partir da Segunda Guerra Mundial, a concentração de capital e mão-de-obra em São Paulo refletiu-se no processo de metropolização e no desencadeamento de uma ocupação do solo articulada aos interesses econômicos. Nessa fase, as investidas americanas em busca de novos mercados provocaram, em São Paulo, uma urbanização dependente por dominação imperialista industrial e financeira (Castells, 1974).

A partir de 1950, desenvolveu-se a expansão metropolitana, com ocupação de extensas áreas suburbanas, adensamento de áreas já urbanizadas e crescimento vertical intenso. A mancha urbana vai incorporando Santo André, São Bernardo, São Caetano do Sul, Osasco, Santo Amaro, consubstanciando-se, assim, as primeiras conurbações. Na década de 50, as rodovias passam a contribuir com as ferrovias no papel de eixos por onde se expande a urbanização.

É nessa década que, tomando-se como base do processo de metropolização não apenas o crescimento industrial, mas principalmente o setor de serviços, São Paulo entra num extraordinário ritmo de crescimento. A rapidez da expansão da mancha urbana, desde quando começou o processo de expansão da cidade (1930) até 1980, pode ser percebida na Figura 9.

Com o extraordinário crescimento que assume, São Paulo não poderia deixar de enfrentar, já na década de 70, os primeiros obstáculos físicos, expandindo-se além da bacia sedimentar e alcançando as regiões de rochas cristalinas, pré-cambrianas. Estende-se até encontrar áreas serranas a sudoeste, sudeste, oeste e nordeste e ao sul expande-se até os reservatórios d'água. No sentido

noroeste e leste, a mancha urbana tem maior penetração em direção a Campinas e ao vale do Paraíba, respectivamente.

Existem, também, restrições físicas à expansão urbana, controladas através de fiscalização pública, tais como:

a) as declividades de terreno superiores a 30% que, de acordo com a Lei federal 6.766, de 19/12/1979 (Lei Lehman), cerceiam o parcelamento do solo para uso urbano, que só será admitido quando "atendidas exigências específicas das autoridades competentes";

b) área de preservação ecológica, tais como as reservas florestais de Caucaia, Jaraguá, serra do Mar, serra da Cantareira, serra do Itapeti etc., de parcelamento urbano taxativamente proibido, pela mesma Lei 6.766;

c) áreas comprometidas com outros usos, como as que correspondem ao Parque Ecológico do Tietê;

d) áreas sob jurisdição da Lei estadual nº 898, de 18/12/1975 (Lei de proteção aos mananciais), em que as áreas de expansão urbana são disciplinadas por normas específicas.

Além dessas restrições, deve-se ainda levar em consideração outros obstáculos à expansão urbana, tais como os enumerados pela Emplasa (1984):

a) nascentes, olhos d'água e topos de morros, de acordo com as alíneas (c) e (d) do art. 2º da Lei federal nº 4.771, de 15/11/1965 (Código Florestal);

b) terrenos aterrados com material nocivo à saúde pública (lixões), sem que tenham sido tomadas providências para o escoamento das águas. Os dois casos são previstos nas alíneas I e II do parágrafo único do art. 19 da Lei 6.766;

c) terrenos com condições geológicas que não aconselham a edificação, restrição também prevista pela Lei 6.766 (alínea V do parágrafo único do art. 19), o que deverá acarretar novas exigências legais quanto às características geotécnicas dos loteamentos;

d) as chamadas "áreas de interesse especial" (corres-

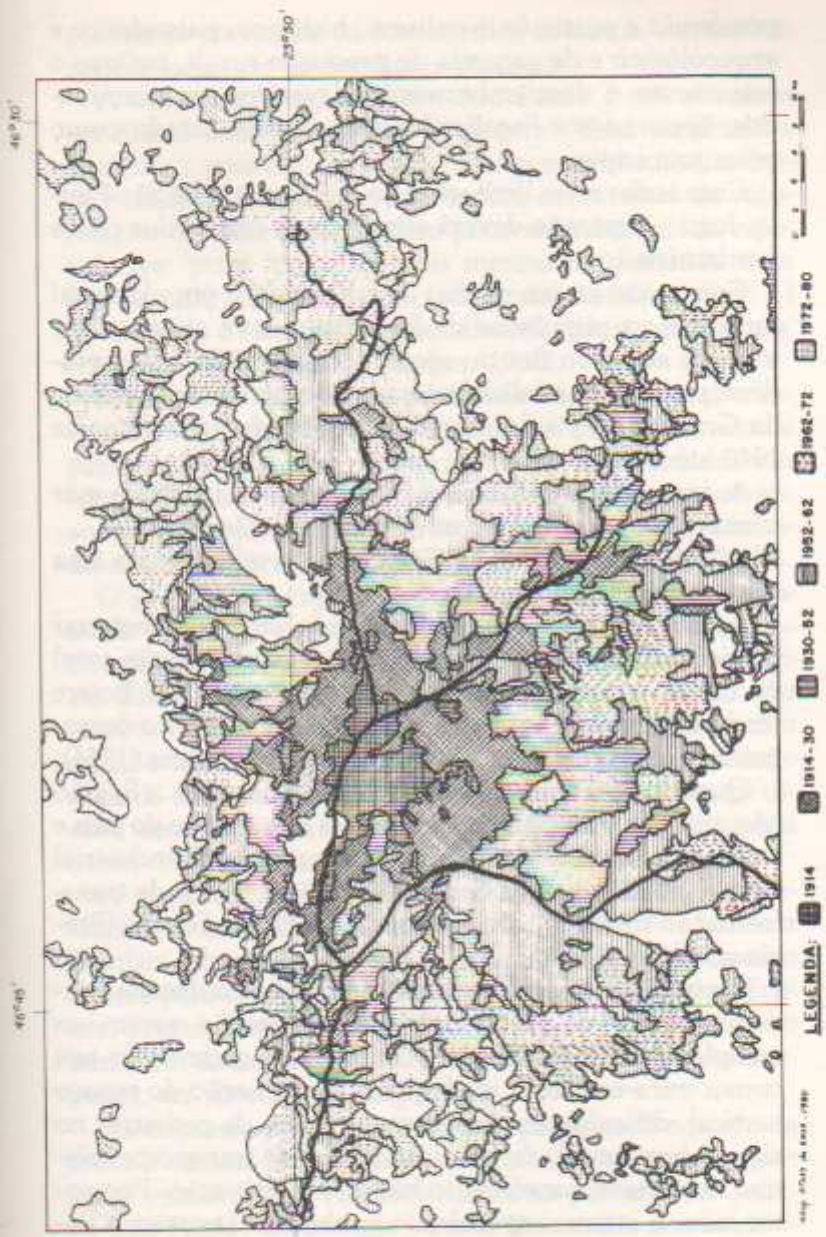


Figura 9. Expansão da mancha urbana de São Paulo (1914 a 1980).

pondendo a patrimônio cultural, histórico, paisagístico e arqueológico e de garantia de produção rural), em que o loteamento e desmembramento deveriam ser examinados, aprovados e fiscalizados não só pelo Estado como pelos municípios.

Com todas estas limitações ao crescimento de São Paulo, logo a expansão deverá atingir áreas com sérios riscos à urbanização.

Com taxas anuais médias de crescimento populacional de 5,56%, a população de São Paulo deve atingir vinte milhões antes do fim do século (Singer, 1975). Essa evidência pode ser analisada através do perfil demográfico da Grande São Paulo, tendo como referência os anos de 1940 até 1980.

A área metropolitana de São Paulo, constituída por trinta e sete municípios, com uma população de 12.588.439 habitantes (1980), ocupa um milésimo da área total do território brasileiro.

Apesar da Região Metropolitana de São Paulo registrar participação sempre crescente, tanto na população total do Estado quanto na do Brasil, entre 1950 a 1980 houve tendência geral à diminuição do ritmo de aumento demográfico, conforme dados divulgados pela Emplasa (1984).

Quando se considera o número de habitantes, a Região Metropolitana de São Paulo é a mais importante do país e representa 43,51% dos salários pagos no setor industrial do País, 74,38% do Estado e 37,91% do valor de transformação industrial do Brasil e 69,24% do Estado (Emplasa, 1984).

O crescimento acelerado da Metrópole Paulistana ligado à expansão do processo de industrialização, geram um complexo de problemas no contexto do gigantismo tais como: infra-estrutura inadequada à ampliação do espaço vertical, dificuldades de acesso da massa de pedestres no espaço horizontal, deficiência viária e de transporte coletivo de massas, saneamento básico e iluminação. Por outro lado, a intensa especulação imobiliária favorece a im-

plantação constante de loteamentos urbanos, muitas vezes inadequados às condições naturais.

A valorização do solo em São Paulo é um processo contínuo, com intensidade crescente. "Esta expectativa determina uma demanda adicional por terra cujo fim único é usufruir dos ganhos diferenciais decorrentes da valorização do solo. Esta procura pode ser considerada especulativa 'pura' da terra, pois mesmo na demanda com fins de utilização (industrial, comercial, residencial etc...) do terreno, o elemento 'expectativa de valorização futura' entra em certa medida" (Singer, 1968).

A expansão da mancha urbana de São Paulo se processa pela ocupação do solo ao longo das principais vias de penetração, ligando o parque industrial aos mercados e às fontes de matéria-prima. "Na medida em que este processo se desenrola, a economia industrial se espraia, lançando novos tentáculos em todas as direções" (Singer, 1968).

O processo de expansão da Metrópole Paulistana se estende para o sul e sudeste, avançando além dos reservatórios d'água e atingindo Itapeverica da Serra. Pelo vale do rio Tamanduateí, uniu-se a São Caetano do Sul, Santo André, Mauá, São Bernardo do Campo e Diadema. No sentido leste-oeste, ao longo do rio Tietê, a urbanização estende-se de Itapevi a Moji das Cruzes. Pela margem direita desse rio, a área construída atinge desde Pirituba a oeste, até Arujá, a nordeste.

A expansão industrial caminha ao longo da via Anchieta, alcançando Cubatão e Piaçagüera. Na baixada Santista, da mesma forma, o avanço industrial também ocorre pelo vale do alto Tietê alcançando Moji das Cruzes, prosseguindo em direção ao vale do Paraíba. Outro tentáculo de expansão verifica-se ao longo da via Anhanguera, em direção a Campinas.

As empresas procuram ocupar espaços onde o preço da terra é menor. Desse modo, as fábricas são expulsas das áreas valorizadas e vão localizar-se na periferia da Grande São Paulo. Os antigos bairros industriais nos interstí-

cios da mancha urbana passam para bairros mistos e estes acabam se transformando em bairros predominantemente residenciais.

Esse processo de expansão horizontal da urbanização da Grande São Paulo ocorre em ritmo contínuo, principalmente nas últimas décadas. "Na medida em que as indústrias se deslocam para a periferia, também a população proletária é obrigada a seguir o seu movimento, pelo mesmo motivo do deslocamento das empresas: a valorização da terra. As residências térreas e de um andar são demolidas, construindo-se prédios de apartamentos, ocupados pela classe média. Também o comércio, que não se pode afastar demasiadamente do centro vai ocupar estas áreas o mesmo fazendo determinados serviços: clínicas médicas e dentárias, escritórios comerciais de engenharia etc." (Singer, 1968).

Na continuidade deste processo é possível que a mancha urbana de São Paulo ultrapasse os obstáculos naturais, terrenos mais movimentados do pré-cambriano, e alcance a área de entorno localizada por Sorocaba, Campinas, São José dos Campos e Santos. Concomitantemente, intensifica-se o adensamento de prédios, expandindo-se em área a ocupação vertical.

Na medida em que as indústrias caminham para a periferia da Grande São Paulo, a metrópole vai-se especializando como fornecedora de serviços, principalmente como centro financeiro do país.

No centro, reflete-se a atividade capitalista através da especulação imobiliária. O centro da cidade é o pólo de valorização do solo. Aí, a tendência à ocupação intensiva vertical do solo urbano é aliada à existência de infraestrutura. Cordeiro (1980) destaca as áreas de maior valorização da metrópole: o centro novo, o centro Paulista, a Augusta, no seu trecho Paulista-Jardins e a Avenida Faria Lima. No centro tradicional de São Paulo, os valores de venda por metro quadrado são altíssimos, sobretudo nos edifícios de escritório de nível internacional.

São Paulo caracteriza-se por um excesso de verticalização no centro e um excesso de dispersão na periferia. Nesse contexto, ocorre um aumento dos custos operacionais.

No conjunto, com o avanço da área construída, a paisagem urbana passa a se ressentir de espaços ocupados com vegetação. Essa situação agrava substancialmente a qualidade ambiental, gerando microclimas favoráveis aos maiores contrastes térmicos, os quais serão discutidos posteriormente.

A falta de planejamento urbano resultou em uma expansão desordenada da cidade, com a ocupação de áreas periféricas e a dispersão das atividades econômicas. A urbanização, contudo, não se restringe ao espaço físico construído, mas também envolve o meio ambiente, especialmente a vegetação, a concentração de poluentes que ocasiona a poluição do ar, a redução da umidade relativa do ar e a formação de neblinas.

A verticalização exacerbada, bem como a dispersão das atividades econômicas, contribuem para a formação de ilhas de calor urbanas, com temperaturas mais elevadas no centro da cidade em comparação com as áreas periféricas, devido à maior densidade de construções e à redução da vegetação.

A redução da vegetação construída de áreas urbanas, bem como a dispersão das atividades econômicas, contribuem para a formação de ilhas de calor urbanas, com temperaturas mais elevadas no centro da cidade em comparação com as áreas periféricas, devido à maior densidade de construções e à redução da vegetação. Isso resulta em maiores contrastes térmicos, o que agrava a qualidade ambiental e a saúde pública.

URBANIZAÇÃO E ILHA DE CALOR

A ilha de calor configura-se como fenômeno que associa os condicionantes derivados das ações antrópicas sobre o meio ambiente urbano, em termos de uso do solo e os condicionantes do meio físico e seus atributos geoecológicos. A urbanização, considerada em termos de espaço físico construído, altera significativamente o clima urbano, considerando-se o aumento das superfícies de absorção térmica, impermeabilização dos solos, alterações na cobertura vegetal, concentração de edifícios que interferem nos efeitos dos ventos, contaminação da atmosfera através da emissão dos gases.

A variação das atividades humanas nos espaços internos diferenciados, como parques, ruas, casas, indústrias e a configuração física da cidade contribuem para as variações climáticas, notando-se alterações mais significativas de temperatura, umidade e vento.

A superfície da cidade constituída de área edificada influi de maneira tridimensional na interação que existe entre a estrutura urbana e a atmosfera. As condições climáticas de uma área urbana extensa e de construção densa são totalmente distintas daquelas dos espaços abertos circundantes, podendo haver diferenças de temperatura, de velocidade do vento, de umidade, de pureza do ar etc. O desenho físico urbano, desde a escala de edifícios até as

áreas metropolitanas, pode ter fortes repercussões nas condições climáticas locais. Nesse sentido, deve-se levar em consideração a configuração geométrica dos edifícios, as propriedades dos materiais de construção, as cores das superfícies exteriores, a extensão e a densidade da área construída, as condições de sombra nas ruas e nos estacionamento, a distribuição das áreas verdes, a relação entre índice de área construída e espaços livres.

A íntima relação entre uso do solo e a elevação das temperaturas internas da cidade impõem uma análise, em diferentes escalas, dos padrões de uso do solo urbano.

No caso específico da Metrópole Paulistana, foram identificados três níveis de escala espacial na identificação dos padrões de uso do solo.

No primeiro momento foram analisadas as amostras de variação de padrões de uso do solo e a emissividade média dos alvos. Essas amostras foram importantes para identificar tipos de ocupação urbana diferenciada. Através dessa análise, construiu-se um mapa na escala 1:100.000 mostrando a correlação entre área construída e índice de área verde. Esse mapa serviu de base para traçar as isotermas da área urbanizada. Finalmente, foram identificados e classificados automaticamente os usos do solo urbano através da imagem do LANDSAT-3, na escala 1:100.000. Compatibilizou-se a classificação automática do satélite LANDSAT-3 com as variações de temperatura da área urbana obtidas com imagens termais de satélite meteorológico. Através dessa combinação, pode-se estabelecer índices de concreto nas onze quadriculas escolhidas no sentido L-O e N-S que foram correlacionados com a temperatura obtida através de imagens de satélite.

Todos esses níveis de interpretação do uso do solo urbano foram fundamentais para o estudo da ilha de calor da Metrópole Paulistana. Esses dados foram combinados em várias escalas de trabalho, desde observação de campo até uso de imagens de satélite.

Padrões de uso do solo urbano e estimativa de emissividade

Através do estudo de algumas áreas amostrais, tentou-se extrair os padrões de uso do solo que foram importantes para a estimativa de emissividade. Utilizando-se das fotografias aéreas na escala 1:8.000 (Terrafoto), foram interpretadas dezoito amostras com padrões diferenciados de uso do solo. Essas amostragens, com a dimensão de 1 km², foram ajustadas à resolução espacial das imagens NOAA-7 e NOAA-8, correspondente ao tamanho do "pixel" ou ponto. As medidas de emissividade foram importantes para o aprimoramento do algoritmo utilizado no estabelecimento das relações entre níveis de cinza das imagens de satélite meteorológico e temperatura.

Após a identificação das classes de uso do solo, a partir dos overlays, procedeu-se à contagem de áreas ocupadas por cada classe através de uma grade milimetrada. Para cada classe mediu-se a emissividade dos materiais através de um termômetro FUESS e radiômetro PRT-5. Considerou-se a média de três medidas para se extrair a emissividade integrada dos diferentes alvos através de

$$\epsilon = \frac{T_c \text{ (temperatura do corpo)}}{T_{cn} \text{ (temperatura do corpo negro)}}.$$

Foram calculadas as emissividades de cada cobertura urbana.

$$\epsilon = \frac{P_1 \epsilon_1 + P_2 \epsilon_2 + P_3 \epsilon_3 + \dots}{100}$$

onde ϵ_1 é a emissividade do material 1, ϵ_2 é a emissividade do material 2 etc.; P_1 é a porcentagem coberta pelo material 1 etc...

As dezoito amostras foram distribuídas em diversos padrões de uso do solo urbano, tentando verificar-se em diferentes localidades a distribuição das áreas verdes e de áreas edificadas.

Com base nessas áreas amostrais, foi possível definir uma legenda de uso do solo urbano, considerando-se a relação entre área construída e porcentagem de área verde. Esses parâmetros foram fundamentais como mapa-base no traçado das isotermas urbanas.

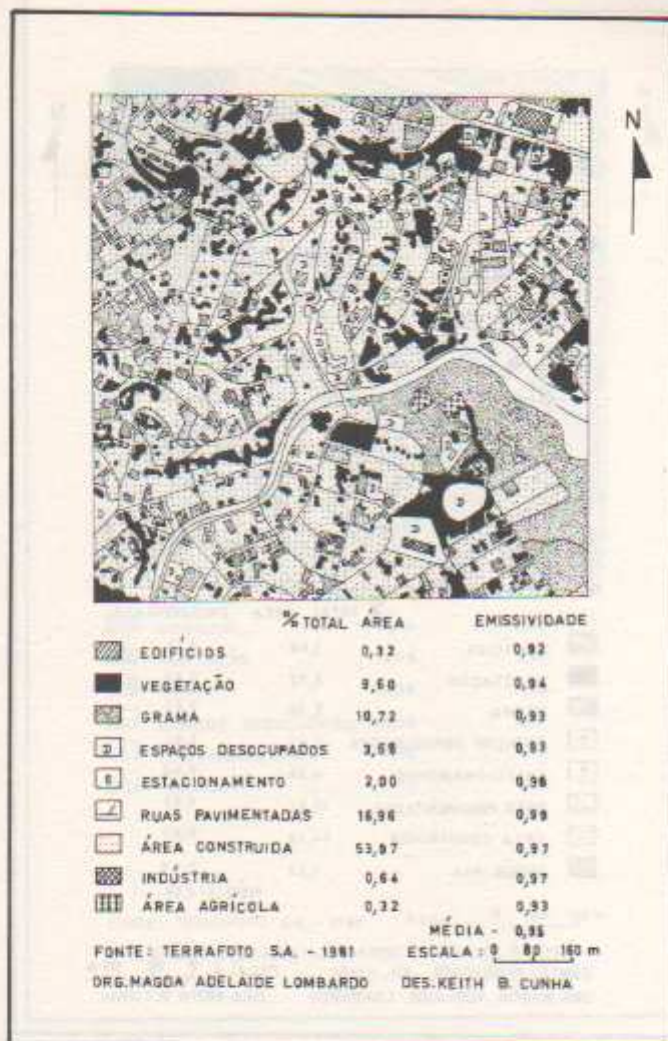


Figura 10. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 1. Área localizada nas proximidades da serra da Cantareira, caracterizada por uma ocupação mista, mas com predomínio (54%) de área construída. A vegetação, ocupando 9,60% da quadrícula, distribuiu-se em terrenos desocupados.



Figura 11. Padrões do uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 2. Área residencial, no bairro de Santana, com 64,42% de área construída e 3,68% de edifícios. A vegetação, ocupando 8,32% da área, concentra-se mais nas proximidades de terrenos desocupados e algumas praças públicas.



Figura 12. Padrões do uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 3. Uma parte da quadricula é ocupada pelo Aeroporto Campo de Marte, com predomínio de edifícios (11,43%) e estacionamento (4,4%). O restante caracteriza-se principalmente por espaços desocupados (43,28%) e vegetação (16,08%).

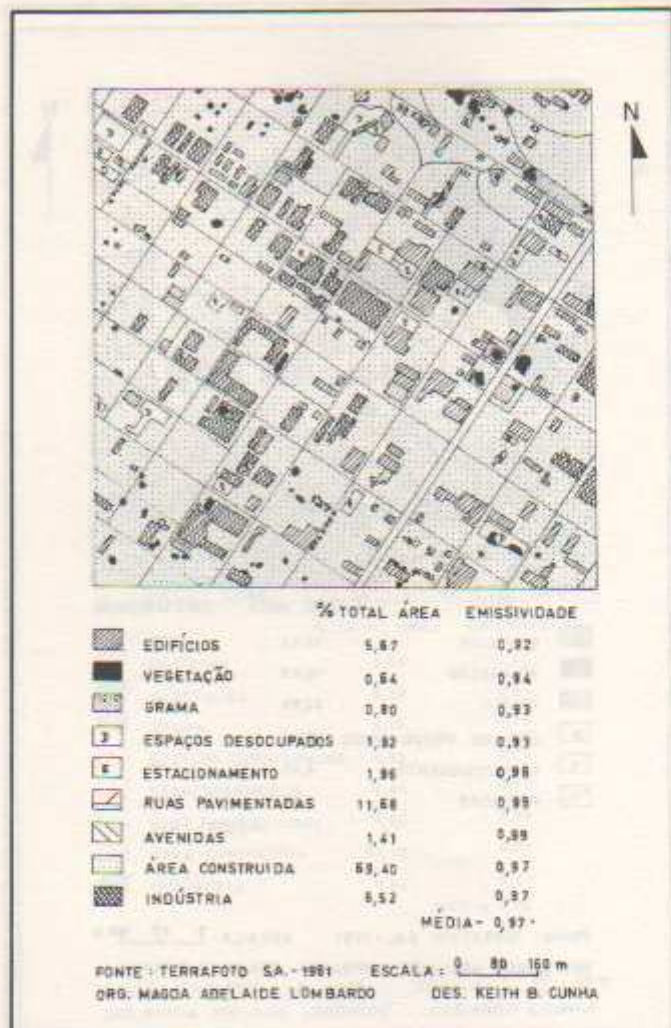


Figura 13. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 4. Bairro de Santana, zona norte da Cidade de São Paulo, com usos do solo diferenciados. Grande concentração de área construída (69,40%), 6,52% de indústrias e 5,69% de edifícios. A vegetação é rarefeita, correspondendo a apenas 0,64% da quadrícula.

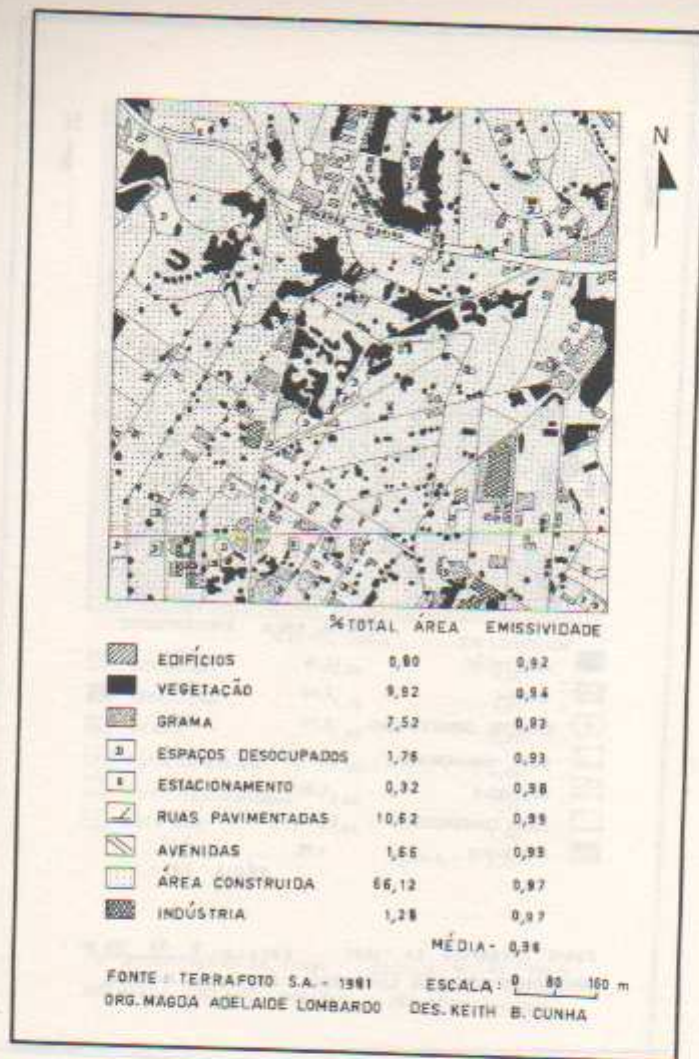


Figura 14. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 5. Bairro de Pinheiros, residencial, com 66,12% de área construída e 9,92% de cobertura vegetal distribuída por praças e avenidas.

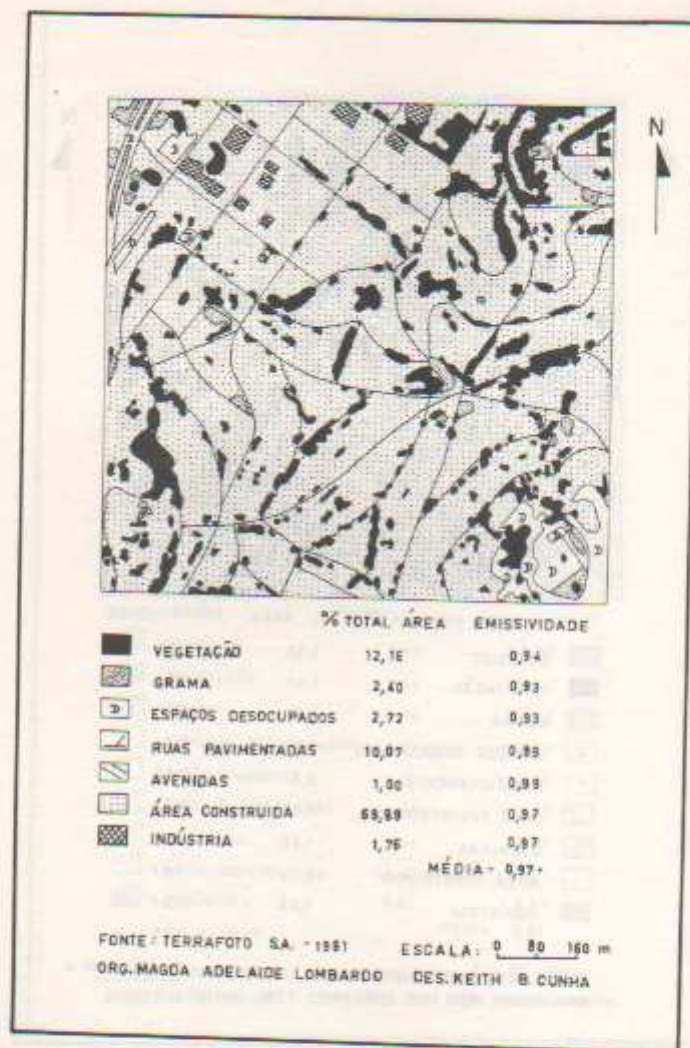


Figura 15. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 6. Bairro do Pacaembu, com 69,89% de área construída, contrapondo com 12,16% de cobertura vegetal distribuída por toda a quadricula.

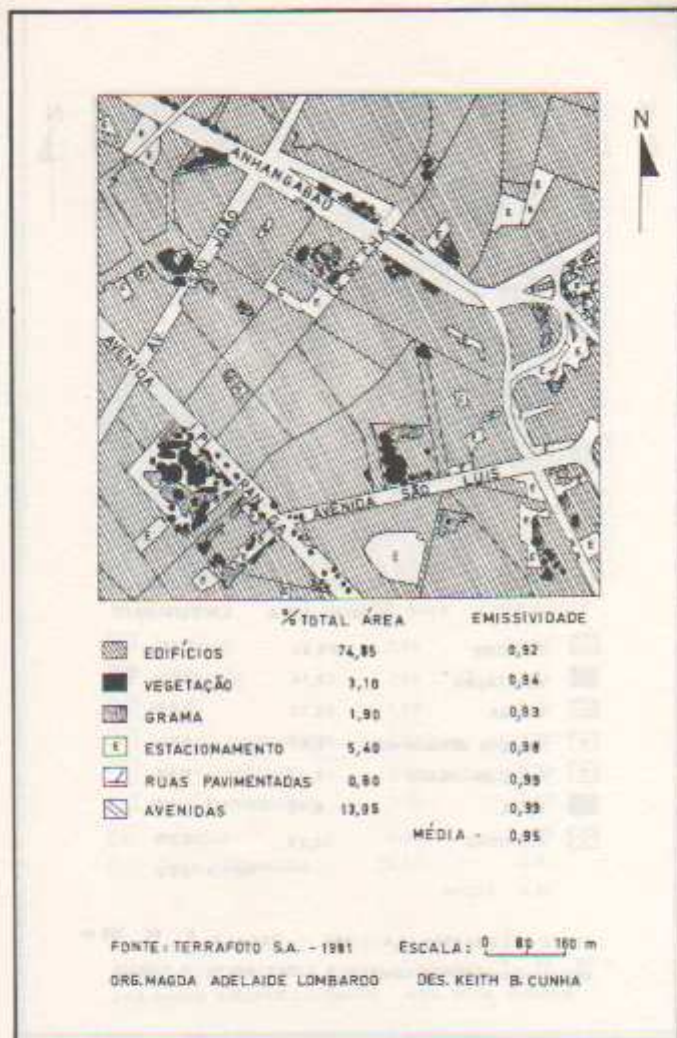


Figura 16. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 7. Área central de São Paulo, onde predomina a concentração de prédios (74,85%) contrapondo com apenas 3,10% de vegetação concentrada principalmente na Praça da República.

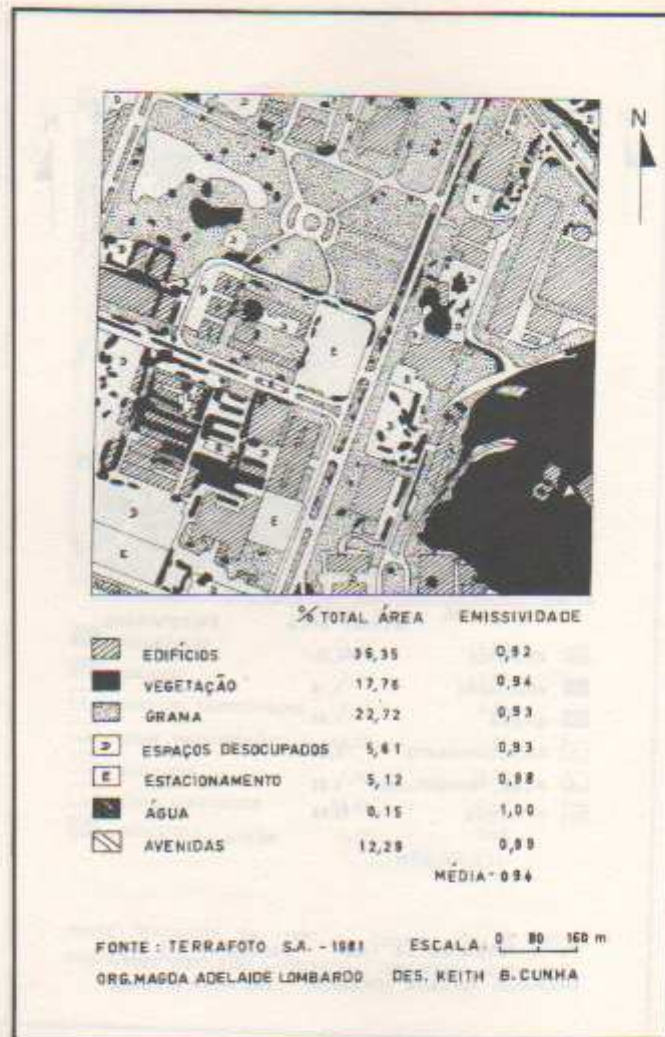


Figura 17. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 8. Parte da Cidade Universitária, com 36,35% de área ocupada por edifícios, contrapondo com 17,76% de vegetação densa e 22,72% de gramíneas.

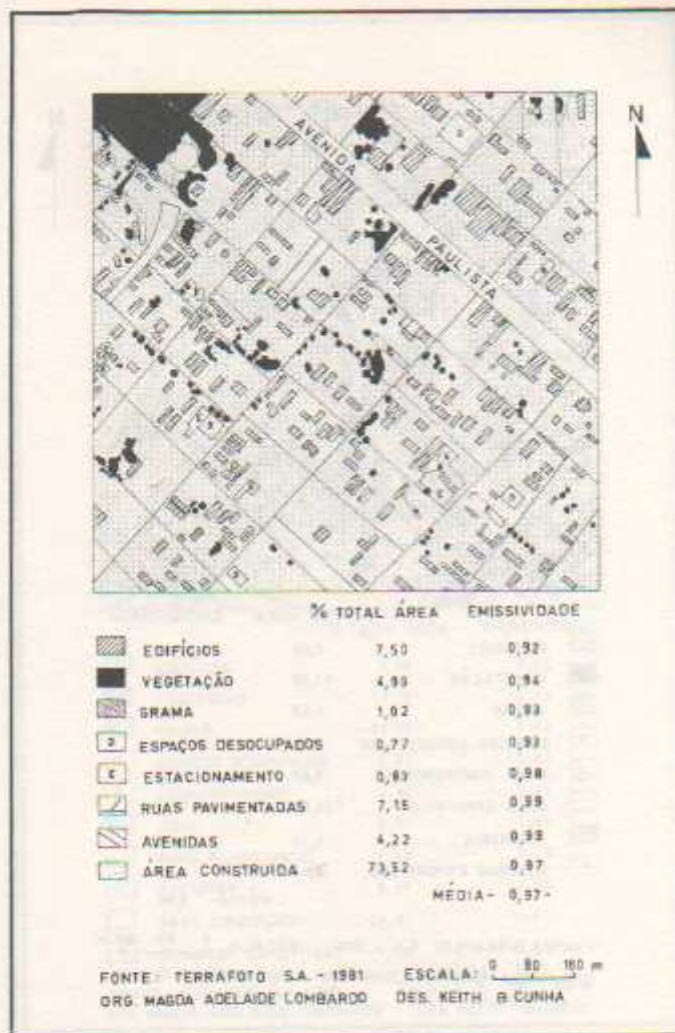


Figura 18. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 9. Área nas proximidades da Avenida Paulista, com predomínio de construções (73,52%). Os edifícios são distribuídos por toda a quadricula ocupando 7,50% da área. A área ocupada com vegetação aparece na periferia da quadricula.



Figura 19. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 10. Área residencial dos Jardins, na parte oeste da cidade, com 72,08% da área ocupada por casas. As ruas são arborizadas e a ocorrência de vegetação é visível distribuindo-se por toda a área da quadricula, perfazendo 11,20% da área.

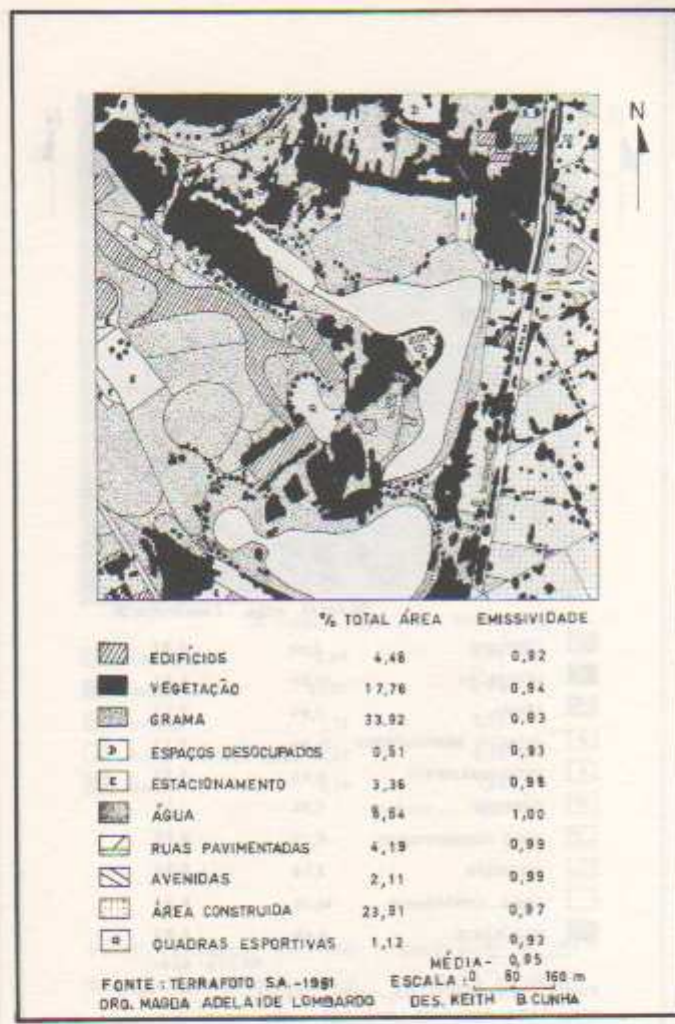


Figura 20. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa da emissividade na amostra 11. Nessa quadricula, observa-se parte do Parque Ibirapuera e área construída à direita (23,91%). A vegetação densa cobre 17,76% enquanto que as gramíneas ocupam 33,92% da área total.

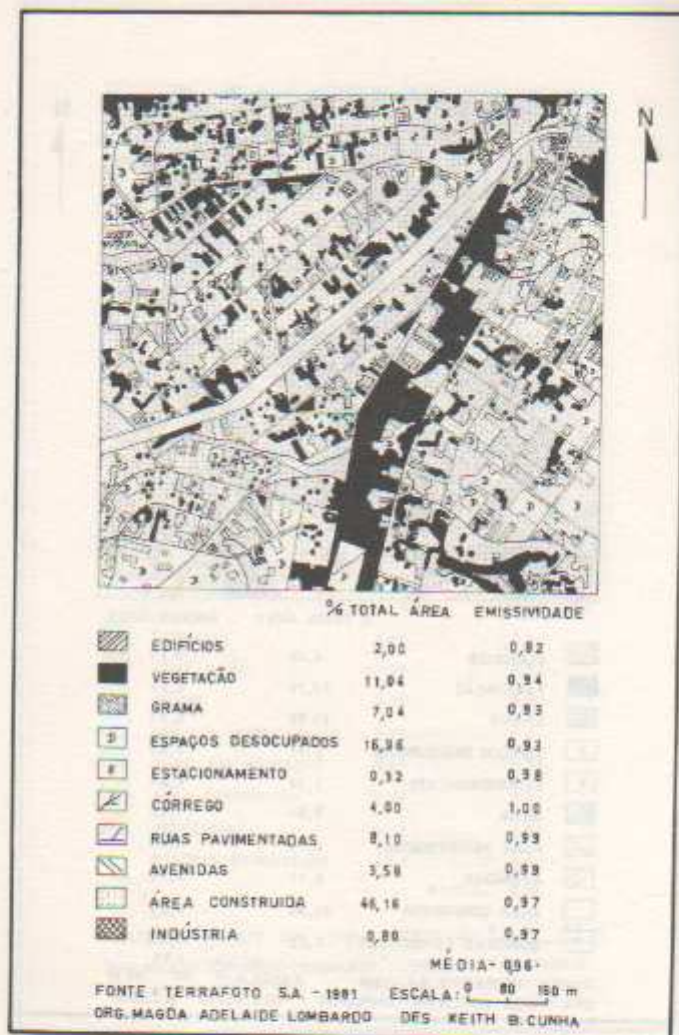


Figura 21. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa da emissividade na amostra 12. Esta quadricula localiza-se a leste da Grande São Paulo, com predomínio de área construída (46,16%). A vegetação é preservada na proximidade dos córregos, na baixada.

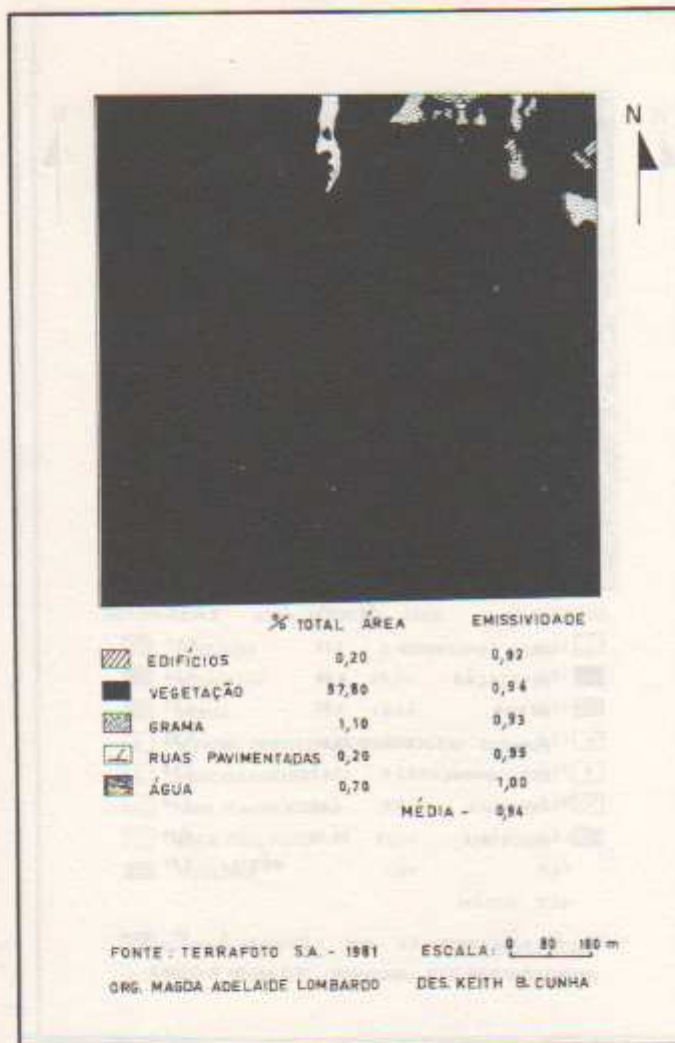


Figura 22. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 13. Parque do Estado. O destaque dessa quadricula é a área verde de 97,80% enquanto que os edifícios ocupam apenas 0,20%.

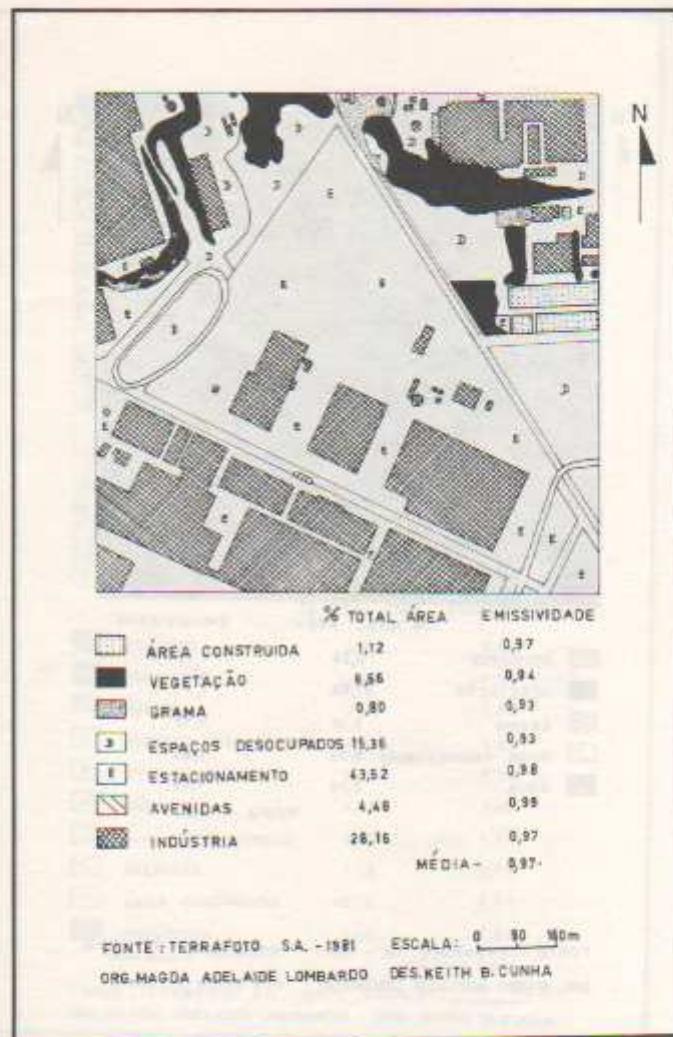


Figura 23. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 14. Área predominantemente industrial, com barracões ocupando 28,16% do total e estacionamento, 43,52%. As manchas de vegetação (6,56%) aparecem em terrenos periféricos às fábricas.

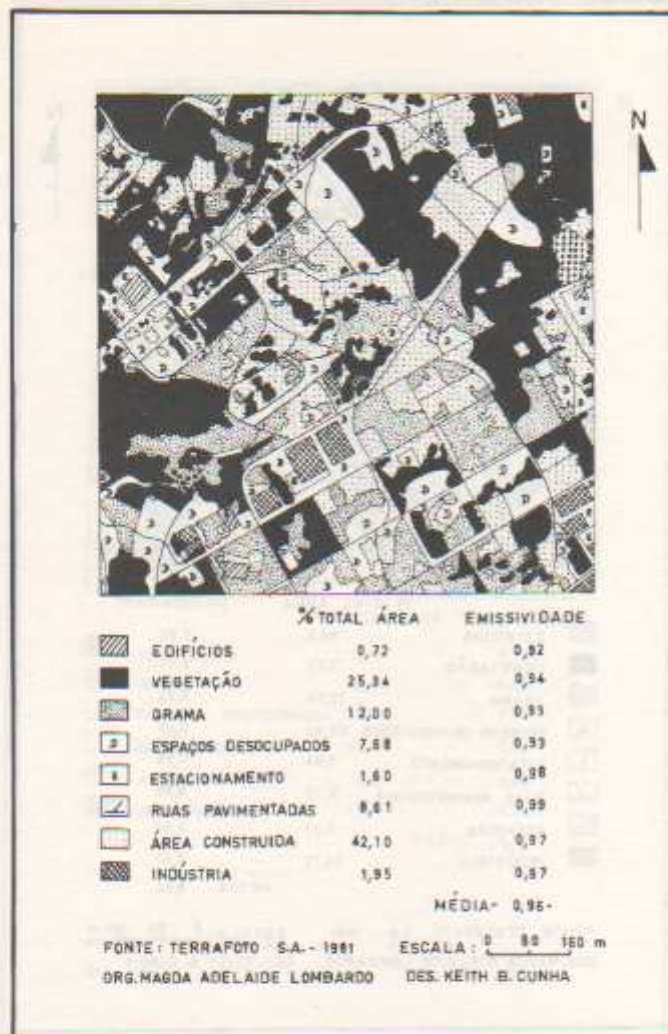


Figura 24. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 15. Predomina área construída (42,10%) caracterizada por casas térreas permeadas de vegetação (25,34%). Note-se que 7,68% da quadricula corresponde a terrenos desocupados.

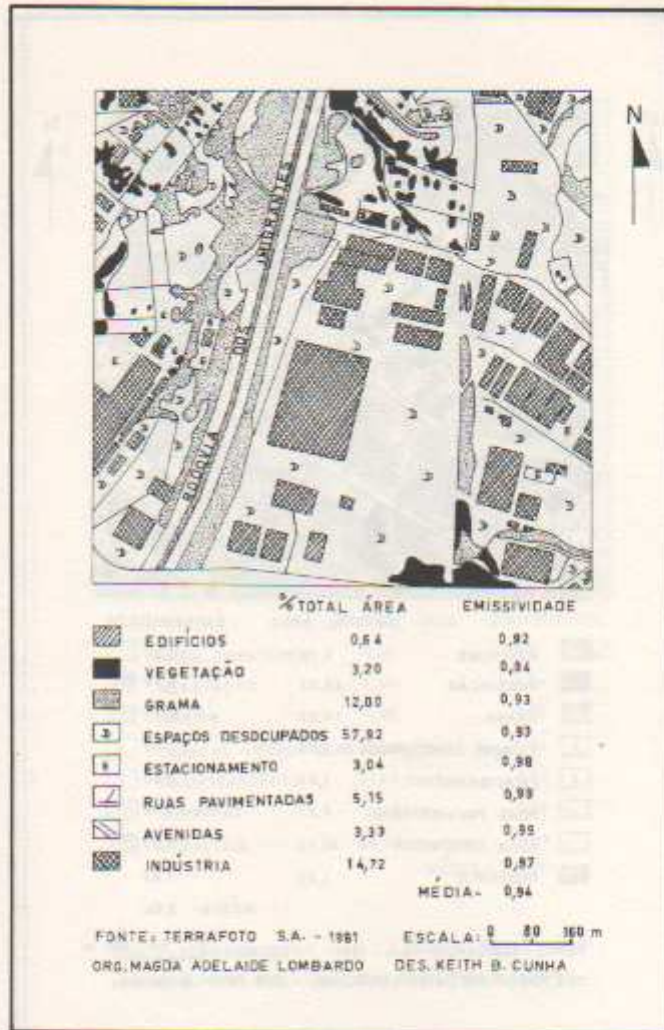


Figura 25. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 16. Área constituída por indústrias (14,72%) que margeiam a Rodovia dos Imigrantes e terrenos desocupados (57,92%). A vegetação densa tem pouca expressão em área, ocupando 3,20% do total da quadricula.



Figura 26. Padrões de uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 17. Área tipicamente industrial, nas proximidades do rio Grande, com pouca quantidade de áreas verdes. O que se destaca é o adensamento de área construída com barracões fabris (37,04%) e estacionamento (43,28%).

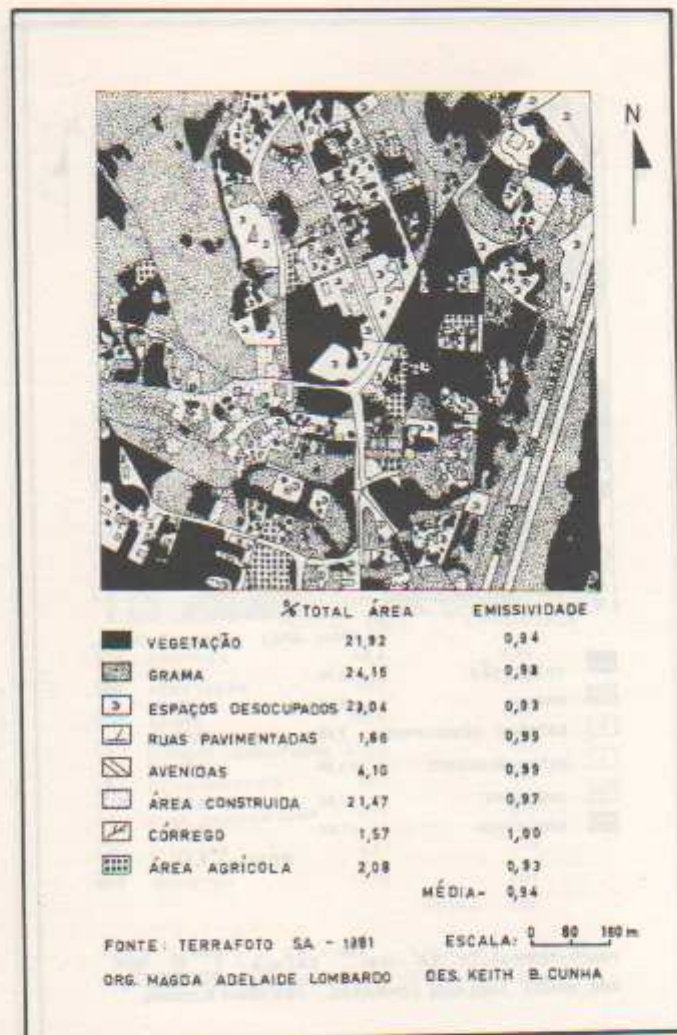


Figura 27. Padrões do uso do solo urbano utilizados para a estimativa de emissividade na amostra 18. Esta quadricula é um retrato da expansão da mancha urbana nas margens da Rodovia dos Imigrantes, nas proximidades da represa Billings. A vegetação se destaca com 21% e a área construída 21,47%. O predomínio de espaços desocupados intersticiais evidencia uma área de loteamento recente.

Uso do solo urbano: relação entre área construída e porcentagem de área verde

A relação entre área construída e porcentagem de área verde pode ser evidenciada quando se observa o mapa de uso do solo na Figura 28.

1. *Ocupação vertical*

1.1. As áreas densamente ocupadas por edifícios, com cobertura vegetal quase ausente, menos de 3%, aparecem no core do Centro da Cidade.

Caracteriza-se por ter intenso uso do solo, maior concentração de atividades econômicas e máxima valorização do espaço. A impressionante massa edificada do Centro Metropolitano, a intensa movimentação de pedestres e veículos e a ausência, quase total, de vegetação contribuem para aí se localizar o pico da ilha de calor. O ponto máximo de referência de maior concentração de pedestres e de maior movimento no trânsito na metrópole é o cruzamento da Rua Xavier de Toledo com a Praça Ramos de Azevedo, na desembocadura do Viaduto do Chá.

1.2. Área densamente ocupada por edifícios, altura média de 30 metros, com cobertura vegetal escassa, entre 3% e 10% da área.

Essa área aparece bordejando a descrita anteriormente e tem seu centro praticamente na Avenida Paulista. É caracterizada por grandes edifícios de escritórios e sedes de empresas, com instalação de unidades do setor financeiro e numerosos edifícios. Nessa área também ocorrem residências multifamiliares.

2. *Ocupação horizontal com ocupação vertical intercalada*

2.1. Área densamente construída (altura média de 8



Figura 28. Uso do solo urbano.

Figura 28. Uso do solo urbano — Legenda

1. *Ocupação vertical*

■ 1.1. Área densamente ocupada por edifícios (altura média de 30 metros), com cobertura vegetal quase ausente, menos de 3% da área, ocupando algumas praças e vias de circulação.

/// 1.2. Idem 1.1., com cobertura vegetal escassa, entre 3 a 10% da área.

2. *Ocupação horizontal com ocupação vertical intercalada*

▨ 2.1. Área densamente construída (altura média de 8 metros, com ausência quase total de cobertura vegetal — menos de 3% da área).

≡ 2.2. Idem 2.1., com cobertura vegetal escassa (praças, jardins e vias de circulação), de 3 a 10% da área.

⊘ 2.3. Idem 2.1. e 2.2., com cobertura vegetal esparsa (praças, jardins e vias de circulação), de 10 a 20% da área.

3. *Ocupação horizontal*

≡ 3.1. Área densamente construída (altura média de 6 metros), com ausência quase total de cobertura vegetal (menos de 3% da área).

▨ 3.2. Idem 3.1., com cobertura vegetal escassa, de 3 a 10% da área.

⊘ 3.3. Idem 3.1. e 3.2., com cobertura vegetal esparsa (praças, jardins e vias de circulação), de 10 a 20% da área.

▨ 3.4. Área esparsamente construída, com cobertura vegetal nos vazios intersticiais (até 50% da área).

4. *Áreas desocupadas e parques*

⊘ 4.1. Com 50 a 70% de cobertura vegetal.

⊘ 4.2. Com 70 a 100% de cobertura vegetal.

5. *Áreas industriais*

≡ Grandes concentrações industriais.

metros), com ausência total de cobertura vegetal (menos de 3% da área).

Localiza-se em parte dos bairros da Barra Funda, Santana, Pari, Brás e Mooca. É uma expansão de atividades comerciais, mesclando-se com residências multifamiliares e unifamiliares.

2.2. Área densamente construída (altura média de 8 metros), com cobertura vegetal escassa (praças, jardins e vias de circulação), de 3% a 10% da área.

Expande-se para a região oeste e sul, em bairros como Pinheiros, Jardim América, Vila Madalena, Jardim Paulista, Cerqueira César, Indianópolis, Vila Mariana. A região, com alguns corredores comerciais, caracteriza-se por possuir residências multifamiliares e unifamiliares. Apesar da vegetação escassa, ela ocorre em algumas vias de circulação, praças e jardins.

2.3. Área densamente construída (altura média de 8 metros), com cobertura vegetal esparsa (praças, jardins e vias de circulação), de 10 a 20% da área.

Ocorre nas proximidades da marginal direita do rio Pinheiros, com crescimento vertical e horizontal tipicamente residencial.

3. *Ocupação horizontal*

3.1. Área densamente construída (altura média de 6 m) com ausência quase total de cobertura vegetal, menos de 3% da área.

Esse tipo de uso abrange a maior parte da área de estudo e se espalha por todos os bairros localizados a leste, norte e sul, além de extravasar-se por outros municípios, que compõem a mancha urbana da Metrópole Paulistana. Nota-se aí que a densa concentração de concreto é associada à ausência de vegetação, o que contribui para um desequilíbrio no balanço de energia, agravando, assim, o problema da ilha de calor.

3.2. Área densamente construída (altura média de 6 m) com cobertura vegetal escassa, de 3% a 10% da área.

Ocorre nos bairros de Butantã, Santana, Casa Verde, Aclimação, Cambuci, Vila Maria, Jabaquara e Saúde. Nessas áreas residenciais, a quantidade de vegetação é maior, se for considerada comparativamente àquela já mencionada anteriormente.

3.3. Área densamente construída (altura média de 6 m) com cobertura vegetal esparsa (praças, jardins e vias de circulação), de 10 a 20% da área.

São áreas privilegiadas em relação à cobertura vegetal. Os loteamentos foram planejados, sendo respeitada a exigência de terrenos ocupados com áreas verdes. A paisagem urbana é agradável no seu conjunto, contendo casas residenciais de alto padrão, cercadas por gramados e árvores ornamentais.

3.4. Área esparsamente construída, com cobertura vegetal nos vazios intersticiais (até 50% de área).

É mais definida no bairro do Morumbi, localizado ao lado esquerdo da marginal do rio Pinheiros, onde pode notar-se que o bairro residencial aparece com a maior proporção de densidade de área verde por lote. As grandes residências são rodeadas por vegetação. Esta circunstância favorece o conforto térmico.

4. Áreas desocupadas e parques

4.1. Com 50% a 70% de cobertura vegetal.

4.2. Com 70 a 100% de cobertura vegetal.

Essas áreas estão quase ausentes do centro da cidade, e passam a aparecer mais na medida em que se caminha em direção à periferia urbana. A cobertura vegetal ocorre em manchas descontínuas em loteamentos desocupados, disseminados pela periferia da metrópole ou em áreas pouco propícias à urbanização, devido às limitações das condições do terreno.

5. Áreas industriais (*grandes concentrações industriais*)

As concentrações industriais se distribuem ao longo das ferrovias e, principalmente, margeando as rodovias e marginais. Nota-se um maior adensamento ao longo da marginal do Tietê e em direção sudeste, nos municípios de São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Santo André e Diadema. Outro segmento importante concentra-se ao longo da Rodovia Presidente Dutra, no sentido nordeste.

Classificação automática do uso do solo urbano através de imagens LANDSAT-3

A distribuição detalhada dos tipos de uso do solo da Metrópole Paulistana foi importante na configuração da ilha de calor, bem como na tentativa de se compreender o fenômeno climático e suas relações com a organização espacial da ocupação urbana.

No entanto, a Figura 29 ilustra, de forma mais globalizante, os tipos de uso do solo através da classificação automática com a utilização de computador. Tentou-se compatibilizar a escala do satélite LANDSAT-3 com as imagens termais do satélite meteorológico.

Devido às limitações do sistema, foram classificadas classes amplas do uso do solo. Nesse sentido, cabe aqui uma análise da classificação automática, suas potencialidades e restrições.

As respostas espectrais das classes de uso do solo urbano obtidas dos quatro canais do MSS pelo programa Maxver são apresentados na Tabela 3.

A área de ocupação vertical correspondente ao centro comercial da metrópole apresentou as mais baixas refletâncias nos canais 6 e 7, na região do infravermelho próximo.



Figura 29. Classificação automática de uso do solo da Grande São Paulo. Órbita 164/28 de 11/3/1981, LANDSAT-3 (imagem gerada no INPE). Note-se um excesso de verticalização no centro e um excesso de dispersão na periferia. Os espaços ocupados com áreas verdes são pequenos, ocupam apenas 2,5% da mancha urbana e estão mal distribuídos nos interstícios da área construída.

Tabela 3. Respostas espectrais das classes de uso do solo urbano.

Classes	Média de reflectância nos quatro canais LANDSAT-3			
	Canais			
	4 (0,5 a 0,6 μm)	5 (0,6 a 0,7 μm)	6 (0,8 a 0,9 μm)	7 (0,8 a 1,1 μm)
1. Ocupação vertical	32,73	37,48	27,30	26,76
2. Ocupação horizontal e vertical	31,45	39,88	48,18	49,53
3. Ocupação horizontal densa	45,08	62,82	62,19	56,42
4. Ocupação horizontal rala	50,77	71,94	68,82	60,08
5. Solo exposto	46,37	97,07	101,90	79,05
6. Indústria	60,22	91,41	85,15	69,03
7. Vegetação	26,24	26,24	67,23	78,36
8. Água	38,78	43,55	13,06	6,00

A classe mista, de ocupação horizontal e vertical, aparece nos bairros periféricos ao centro da cidade, como Pinheiros, Perdizes, Bom Retiro, Pari, correspondente à área adjacente à do crescimento vertical intenso. Apresentou resposta espectral, no canal 5, mais próximo da classe ocupação vertical, enquanto no canal 6 a resposta se aproxima da classe vegetação. Isto mostra a heterogeneidade espectral dessa classe. A grande variedade de componentes nela inserida sugere uma divisão em subclasses.

A classe ocupação horizontal densa predomina na Metrópole Paulistana, correspondendo à maior parte da área urbanizada. É formada por residências geminadas com ausência de áreas verdes. Confirmando comprovações de Nieiro (1983), essa classe apresenta a maior reflectância no canal 5 devido à presença predominante de telhados, de coloração vermelha e marrom, com maior reflectância

no comprimento de onda correspondente ao vermelho e ausência de vegetação.

A classe ocupação horizontal rala corresponde àqueles bairros onde as residências possuem jardins ou terrenos desocupados nas áreas periféricas de expansão da urbanização. A maior reflectância do canal 7, se comparada com a classe de ocupação horizontal densa, pode ser explicada pela maior presença de áreas verdes.

Na classe loteamento, a classificação apresentou alguns erros devido à variação da tonalidade de solos, associado aos vários tipos de vegetação. Embora essa classe apareça disseminada por toda a periferia de São Paulo, muitos "pixels", ou pontos, pertencentes a essa classe foram classificados em áreas de ocupação horizontal e vertical, vegetação e indústrias como mostra a matriz de classificação. Os maiores valores de reflectância aparecem nos canais 5, 6 e 7.

A classe indústria apresentou valores de reflectâncias altos nos quatro canais. Muitos "pixels" pertencentes a essa classe foram classificados nas classes 3 e 4. Entretanto, ela está localizada nas proximidades do rio Tietê, na periferia da mancha urbana, e na direção sudeste.

A classe vegetação apresentou maior reflectância nos canais 6 e 7, correspondente ao infravermelho próximo. Houve dificuldade na separabilidade da classe vegetação com loteamento. Essa classe foi fundamental para caracterizar a ausência de áreas verdes nos interstícios da mancha urbana, como mostra a distribuição do uso do solo.

A classe água aparece bem definida nos reservatórios Guarapiranga e Billings, com valores mínimos de reflectância na faixa do infravermelho próximo.

Considerando-se a resolução espacial e espectral do satélite LANDSAT-3, pode-se obter classes amplas de uso do solo urbano. Os erros de classificação ocorrem em decorrência da dificuldade em separar classes funcionais de espectrais. Por exemplo, a classe indústria não apresentou boa separabilidade e foi englobada, muitas vezes, em

outras classes, apesar de algumas limitações apresentadas quanto à classificação automática de uso do solo urbano com aquelas diferenças de temperatura, estudadas ao nível orbital. Nesse sentido, para o estudo da ilha de calor, selecionou-se onze amostras, compreendendo 4 km² para se estabelecer a área de cada classe incluída na quadrícula com os dados de temperatura tirados do satélite meteorológico. A amostra abrangeu 900 pontos ou "pixels" (Tabela 4).

Na análise de uso do solo, em várias escalas, e utilizando-se dos recursos de sensores remotos, verifica-se, através dos mapas, que a organização caótica do espaço metropolitano contribui muito para a degradação ambiental.

Na paisagem urbana, a ausência de espaços ocupados com áreas verdes, principalmente no centro da cidade, nos bairros operários da zona leste e sudeste e nas áreas industriais localizadas na periferia, marginal do rio Tietê e no ABCD, contribuem para o contraste no balanço de energia entre o centro e a periferia da metrópole. Essa organização espacial da atividade urbana cria condições espaciais propícias à formação da ilha de calor e concentração de poluentes.

Tabela 4. Área das classes de uso do solo das amostras analisadas.

Classes	Amostras de uso do solo (em %)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Ocupação vertical	0,00	1,89	5,89	53,00	0,22	0,33	0,89	0,0	1,56	2,78	0,56
2. Ocupação horizontal e vertical	0,33	2,89	0,00	7,33	0,00	1,67	0,67	2,56	19,11	1,00	1,11
3. Ocupação horizontal densa	1,67	31,78	63,44	35,33	84,11	10,00	1,33	5,56	67,44	31,00	1,78
4. Ocupação horizontal rala	0,00	2,11	4,78	1,22	4,78	0,33	0,11	0,00	1,89	2,33	0,00
5. Solo exposto	4,89	19,78	0,78	0,00	1,00	1,44	0,33	0,56	0,56	3,44	0,11
6. Indústria	0,89	10,11	5,89	0,78	1,56	1,67	0,44	0,33	2,00	6,33	0,11
7. Vegetação	88,56	28,00	12,00	1,78	5,22	73,00	91,22	90,33	7,44	38,11	95,56
8. Água	0,00	00,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,89	0,00	0,00	0,00	0,00

5

A ILHA DE CALOR DA METRÓPOLE PAULISTANA: DINÂMICA TEMPORAL E ESPACIAL

Os episódios correspondentes às medidas de temperatura realizadas devem ser analisadas à luz dos mecanismos da atmosfera. Os sistemas meteorológicos regionais interagem com as características locais e são evidenciados principalmente pela ilha de calor, o que propicia um dinamismo espacial e temporal dos seus estados.

Figura 11. A ilha de calor da Metrópole Paulista, segundo as medições do sistema TERCEN, de dia 22.º 1971 (segundo período do INPE - estação de medição localizada de Lombardi no 22.º 1971) em relação de São Paulo. São Paulo, 1971. O mapa mostra a ilha de calor (INPE) com o valor médio de temperatura superior a 22.º C. (INPE) em relação ao nível médio de 22.º C.

As imagens termais dos satélites meteorológicos
NOAA-6 e NOAA-7 e a definição da ilha de calor

Dia 21/08/80 - 15:32 hora local (Figs. 30 e 31)

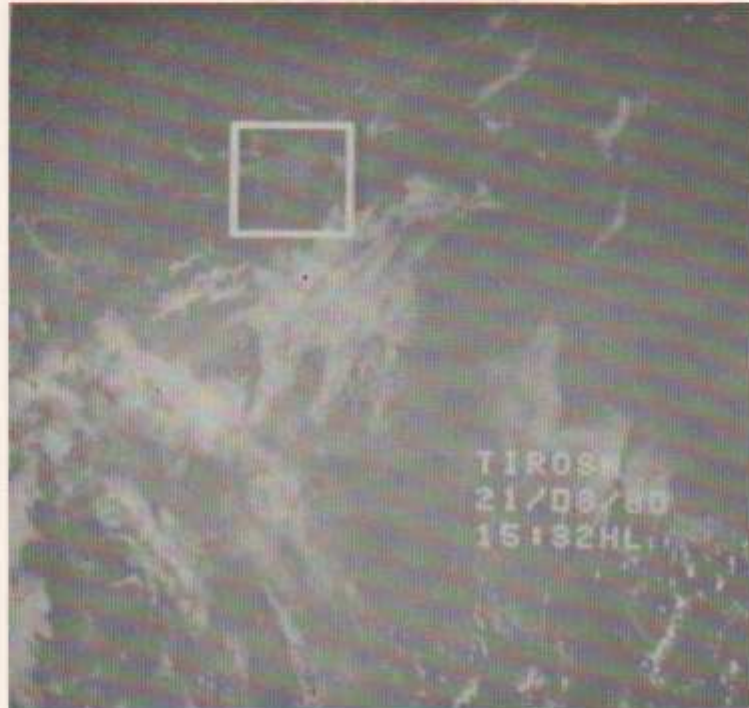


Figura 30. Seleção da área de estudo na Imagem TIROS-N do dia 21/8/80 (imagem original gerada no INPE).

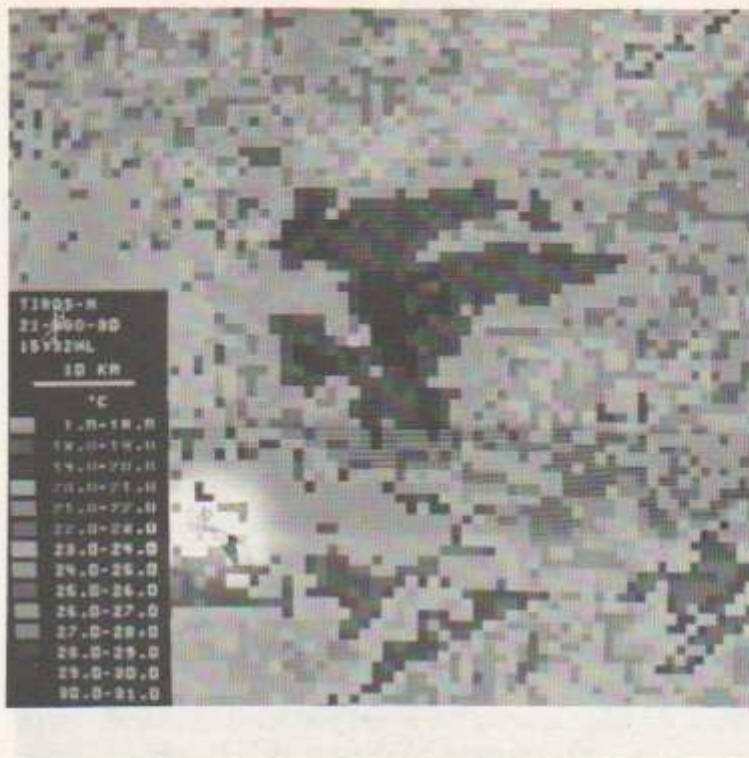


Figura 31. A ilha de calor da Metrópole Paulistana, através da imagem do satélite TIROS-N, do dia 21/8/80 (imagem gerada no INPE interpretada conforme algoritmo de Lombardo et alii 1982). No centro de São Paulo, Santo Amaro e áreas industriais a temperatura é de 31°C, enquanto no Morumbi é de 22°C.

Predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA) com céu limpo, umidade relativa de 47%, às 15:00 horas. O vento intenso de 7 m/s de NNE foi responsável pelo arrefecimento e configuração da ilha de calor sobre São Paulo. O vento soprando no sentido do vale do rio Tietê fez com que ocorresse uma canalização de temperaturas mais baixas de 23°C no trecho compreendido entre o vale e o centro da cidade, enquanto as temperaturas de 28°C aparecem no mesmo sentido, mas a uma distância de 2 km. O centro da cidade, uma parte da zona leste, marginal do Tietê, a oeste, e Santo Amaro, registram temperaturas de 31°C. Parque do Ibirapuera e Parque do Estado aparecem com uma média de 22°C. A área ocupada pelos bairros residenciais com índice de vegetação elevada, como os Jardins e o Morumbi, apresentam temperaturas mais baixas, variando de 22 a 25°C. A serra da Cantareira, ao norte, registrou temperaturas de 19 e 20°C. Na área SE, percebe-se o efeito da brisa marítima, ocorrendo uma disposição dos ventos também em direção ao centro da cidade, o que, além de trazer o desconforto térmico, também contribui no aumento da concentração de poluentes. A serra do Mar aparece com temperaturas oscilando entre 19 e 22°C, mas no espaço ocupado pela cidade de Cubatão, a temperatura eleva-se para 26°C.

Dia 24/2/81, 7:00, hora local (Fig. 32)

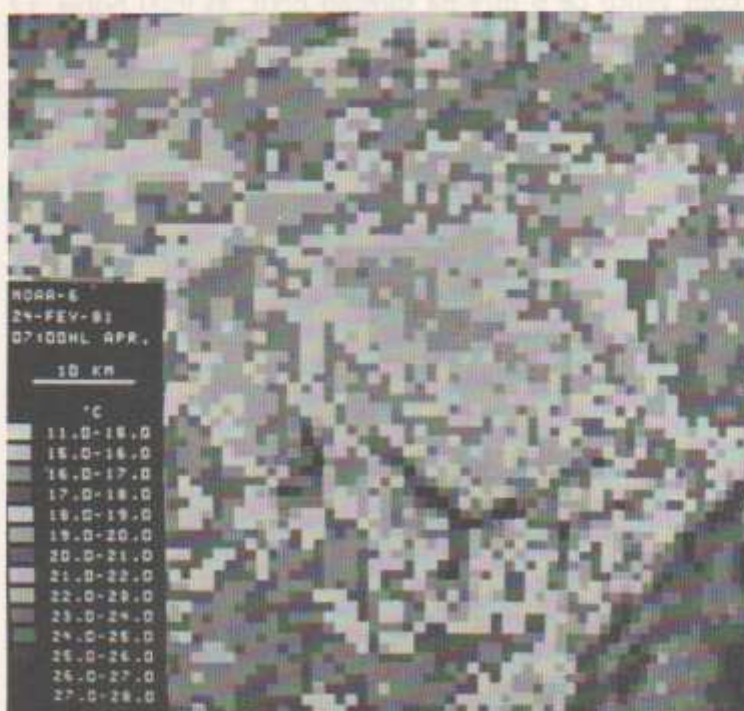


Figura 32. A ilha de calor da Metrópole Paulistana, através da imagem do satélite NOAA-6, do dia 24/2/82 (imagem gerada no INPE interpretada conforme algoritmo de Lombardo et alii 1982). No centro da cidade a temperatura é de 24°C, declinando para 19°C na periferia da mancha urbana.

Predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA) com vento de 6 m/s na direção ENE, às 9:00 horas. O centro da cidade aparece com temperatura de 23 a 24°C, enquanto na periferia os índices oscilam entre 19 a 20°C.

A área ocupada pela mancha da ilha de calor é mais ampla, avançando mais para o oeste, sul e leste. Na região dos reservatórios, pode-se notar que a água aparece com índices de 26 a 27°C, que são maiores que as temperaturas de superfície para esse horário, devido a ter a água maior capacidade de armazenamento de calor.

Quanto à poluição, ela ocorre com índices de 175 microg/m³ de dióxido de enxofre (SO₂) e 98 microg/m³ de material particulado (MP), no centro da cidade de São Paulo.



Figura 1. Distribuição espacial da temperatura e da concentração de material particulado (MP) e dióxido de enxofre (SO₂) no centro da cidade de São Paulo, às 9:00 horas, sob o predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA). A área ocupada pela mancha da ilha de calor é mais ampla, avançando mais para o oeste, sul e leste. Na região dos reservatórios, pode-se notar que a água aparece com índices de 26 a 27°C, que são maiores que as temperaturas de superfície para esse horário, devido a ter a água maior capacidade de armazenamento de calor. Quanto à poluição, ela ocorre com índices de 175 microg/m³ de dióxido de enxofre (SO₂) e 98 microg/m³ de material particulado (MP), no centro da cidade de São Paulo.

Dias 26/6/81, 7:20 horas, hora local (Fig. 33)

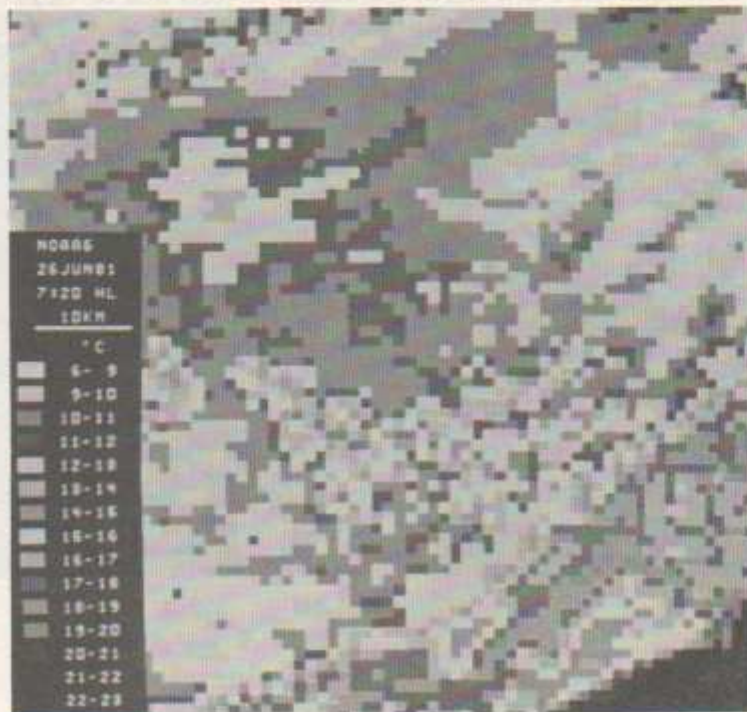


Figura 33. A ilha de calor da Metrópole Paulistana através da imagem termal do satélite NOAA-6, do dia 26/6/81 (imagem gerada no INPE, interpretada conforme algoritmo de Lombardo et alii, 1982). Por volta das 7 horas da manhã o centro da cidade aparece com 15°C enquanto na periferia registram-se 11°C.

Predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com calma e céu claro. Configura-se uma ilha de calor que tem seu pico máximo no centro da cidade, com 15°C, enquanto na periferia a temperatura é de 11°C. Na serra da Cantareira registram-se 9°C. Na região dos reservatórios d'água a temperatura aparece com 17°C, devido ao maior armazenamento de energia pela água.

Os índices de poluição foram de 307 microg/m³ de dióxido de enxofre (SO₂) e 224 microg/m³ de material particulado, no centro de São Paulo.

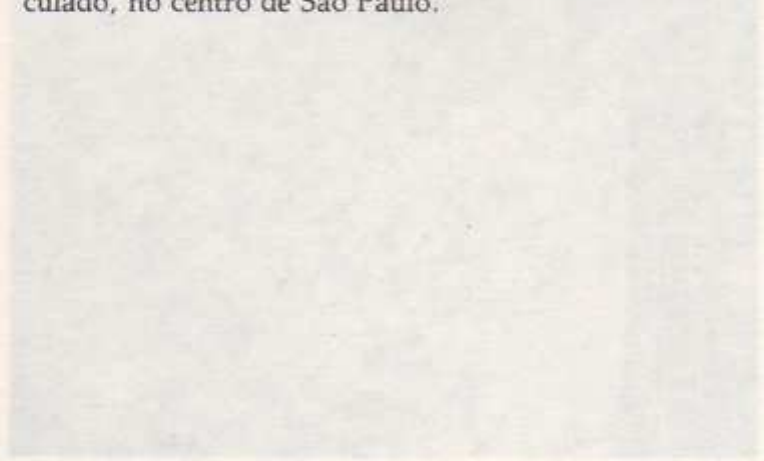


Figura 11. A ilha de calor da cidade de São Paulo, em 1977, durante o domínio do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA). A temperatura máxima é de 15°C no centro da cidade, enquanto na periferia a temperatura é de 11°C. Na serra da Cantareira registram-se 9°C. Na região dos reservatórios d'água a temperatura aparece com 17°C, devido ao maior armazenamento de energia pela água.

Dia 16/7/81, 14:47, hora local (Figs. 34, 35 e 36)

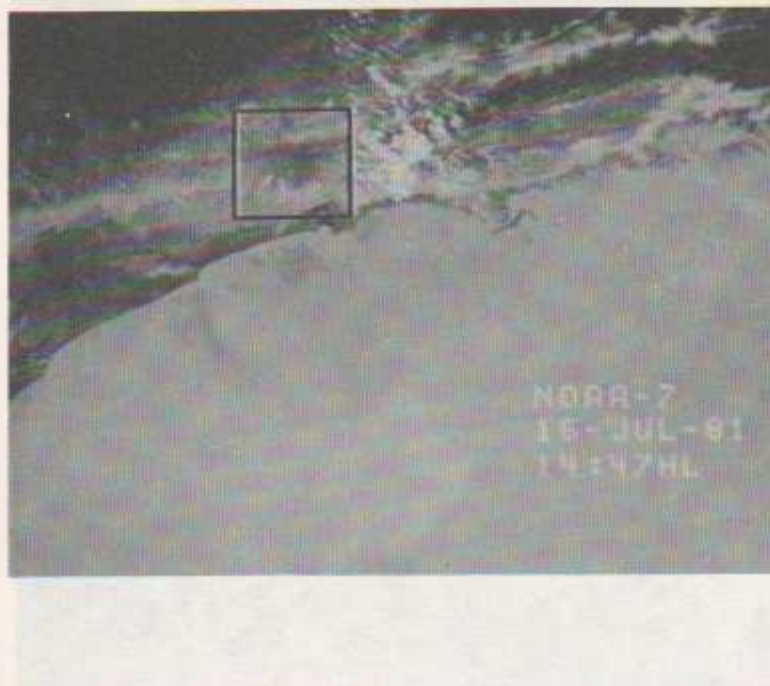


Figura 34. Área de estudo da bacia hidrográfica Paranaíba, selecionada a partir da imagem original do satélite NOAA-7 do dia 16/7/81, imagem gerada no INPE, através do software gráfico de manipulação de imagens, desenvolvido pelo INPE, sob o nome de TARD, no momento da criação, em uma escala de 1:100.000. Na zona de Cuiabá a temperatura foi de 27°C e na Ponta do Estaca, 22°C. É importante notar que a delimitação da bacia hidrográfica foi feita a partir da imagem original.

Figura 34. Seleção da área de estudo da imagem NOAA-7 do dia 16/7/81 (imagem original gerada no INPE).



Figura 35. Ampliação da área de estudo na tela do I-100, na escala 1:100.000, no dia 16/7/81 (imagem original gerada no IN-PE).

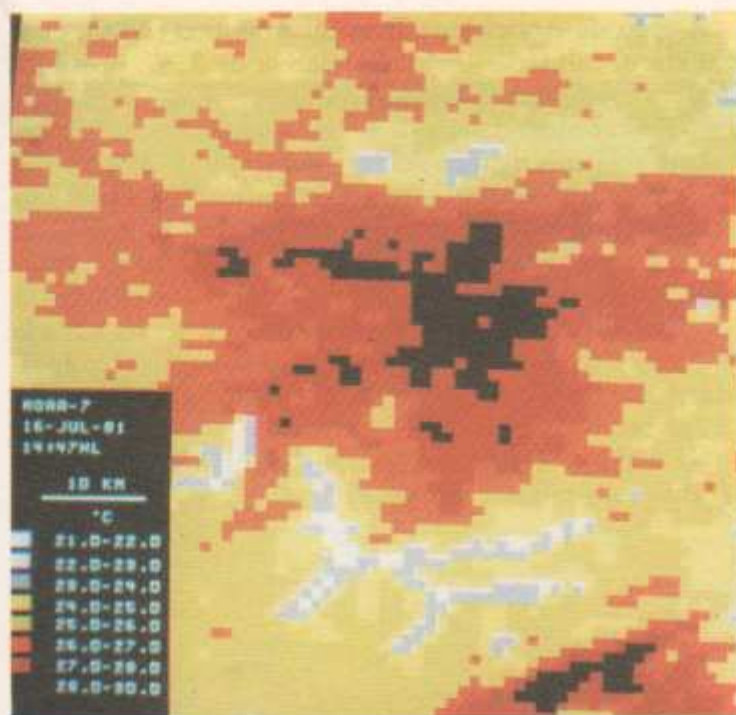


Figura 36. A ilha de calor da Metrópole Paulistana, através da imagem termal do satélite NOAA-7 do dia 16/7/81 (imagem gerada no INPE, interpretada conforme algoritmo de Lombardo et alii, 1982). No centro da cidade, na zona leste e sudeste, na marginal do Tietê e em Santo Amaro registram-se 33°C. Na serra da Cantareira a temperatura foi de 23°C e no Parque do Estado, 24°C. É interessante notar que a cidade de Cubatão, com alta concentração de poluentes, registrou temperatura elevada (30°C), coincidindo com as áreas centrais da cidade de São Paulo.

A ação do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com céu claro, calma, umidade relativa de 31%, possibilitou uma definição e expansão da ilha de calor em São Paulo. No centro da cidade foram registrados 30°C, enquanto na periferia a frequência maior foi de 23 a 24°C.

Os maiores índices de temperatura (30°C) ocorreram no centro da cidade, zona leste e sudeste, marginal do Tietê, a oeste, Santo Amaro e também em Cubatão, cidade industrial da baixada Santista. No Parque do Estado, a temperatura detectada foi da ordem de 24°C, na Cidade Universitária, de 26°C, nos bairros residenciais (Jardins e Morumbi) variou entre 25 e 26°C e na serra da Cantareira apresentou 23°C.

Na região próxima aos reservatórios d'água as temperaturas registradas foram de 24°C.

A ação do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com céu claro, calma, umidade relativa de 31%, possibilitou uma definição e expansão da ilha de calor em São Paulo. No centro da cidade foram registrados 30°C, enquanto na periferia a frequência maior foi de 23 a 24°C.

Dia 13/8/82, 15:27, hora local (Figs. 37 e 38)



Figura 37. Seleção da área de estudo na imagem NOAA-7 do dia 13/8/82 (imagem original gerada no INPE).



Figura 38. Ampliação da área de estudo na tela do I-100, na escala 1:100.000, no dia 13/8/82 (imagem original gerada no INPE).

A ação do Anticiclone Polar Tropicalizado, com ventos de NE, possibilitou a configuração de uma ilha de calor bastante densa sobre São Paulo. As maiores temperaturas (22 a 23°C) ocorreram em grande parte da marginal do Tietê, no centro da cidade, e no sul e sudeste. As menores temperaturas aparecem na serra da Cantareira, com 16°C, devido ao efeito da topografia associado à concentração de áreas verdes.

No Parque do Estado, a temperatura foi de 17°C.

Dia 16/9/82, 15:02, hora local (Fig. 40)

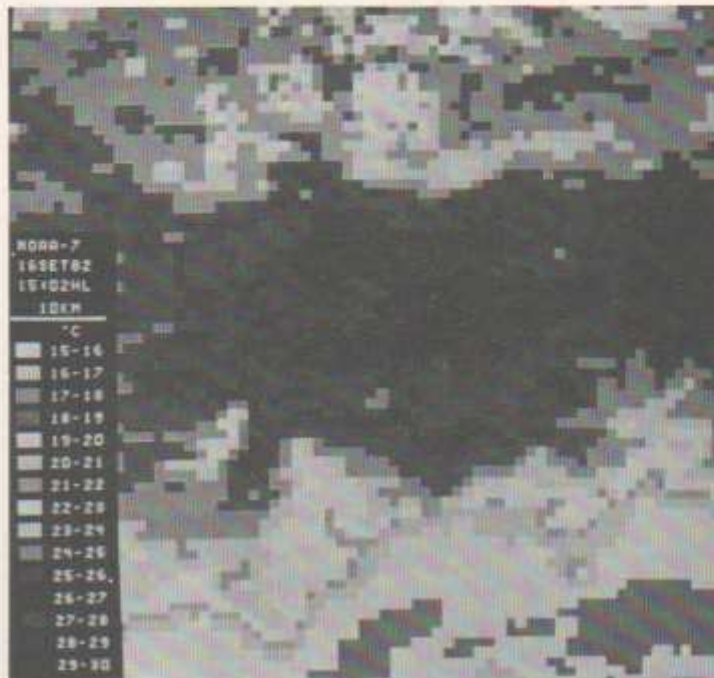


Figura 40. A ilha de calor de inverno da Metrópole Paulistana através da imagem termal do satélite NOAA-7 do dia 16/9/82 (imagem gerada no INPE, interpretada conforme algoritmo de Lombardo et alii, 1982).

Predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico, com calmaria e umidade relativa de 63%. A maior variação no gradiente horizontal de temperatura ocorreu no sentido leste-oeste. Na região central da cidade, as temperaturas registradas foram de 30°C, enquanto a periferia da ilha de calor aparece com 26°C e a área rural com 25°C. As baixas temperaturas registradas na serra do Mar, de até 16°C, parecem explicar a "barreira" exercida pela brisa marítima de SE na expansão da ilha de calor no sentido leste-oeste. Ao norte, a serra da Cantareira, com 16°C, serve de obstáculo à propagação da ilha de calor. O Parque do Estado registrou 18°C.

Dia 17/9/82, 14:56, hora local (Fig. 41)



Figura 41. A ilha de calor de inverno da Metrópole Paulistana através da imagem termal do satélite NOAA-7 do dia 17/9/82 (imagem gerada no INPE, interpretada conforme algoritmo de Lombardo et alii, 1982).

A ação do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com calma, nebulosidade parcial (Cu/Sc-2) e umidade relativa de 22%, possibilitou a intensificação da ilha de calor sobre São Paulo. Entretanto, as nuvens servem de obstáculo à configuração da ilha de calor através das imagens de satélite, porque o sensor capta, também, a temperatura do topo das nuvens.

Mesmo assim, os maiores valores, até 32°C, aparecem no centro da cidade e na marginal do rio Tietê. Na periferia da cidade ocorrem temperaturas entre 22 e 23°C. Na serra da Cantareira foram registradas temperaturas na ordem de 19 a 20°C. Os valores entre 10 a 18°C correspondem às temperaturas mais frias do topo das nuvens.



Dia 23/9/82, 15:29, hora local (Figs. 42 e 43)



...a temperatura da superfície do mar e a temperatura da superfície do ar. A temperatura da superfície do mar é importante para a compreensão dos processos de transferência de calor e de umidade entre o oceano e a atmosfera. A temperatura da superfície do ar é importante para a compreensão dos processos de transferência de calor e de umidade entre a atmosfera e a superfície do solo. A temperatura da superfície do solo é importante para a compreensão dos processos de transferência de calor e de umidade entre o solo e a atmosfera. A temperatura da superfície do oceano é importante para a compreensão dos processos de transferência de calor e de umidade entre o oceano e a atmosfera. A temperatura da superfície do ar é importante para a compreensão dos processos de transferência de calor e de umidade entre a atmosfera e a superfície do solo. A temperatura da superfície do solo é importante para a compreensão dos processos de transferência de calor e de umidade entre o solo e a atmosfera. A temperatura da superfície do oceano é importante para a compreensão dos processos de transferência de calor e de umidade entre o oceano e a atmosfera.

Figura 42. Seleção da área de estudo na imagem NOAA-7 do dia 23/9/82 (imagem original gerada no INPE).

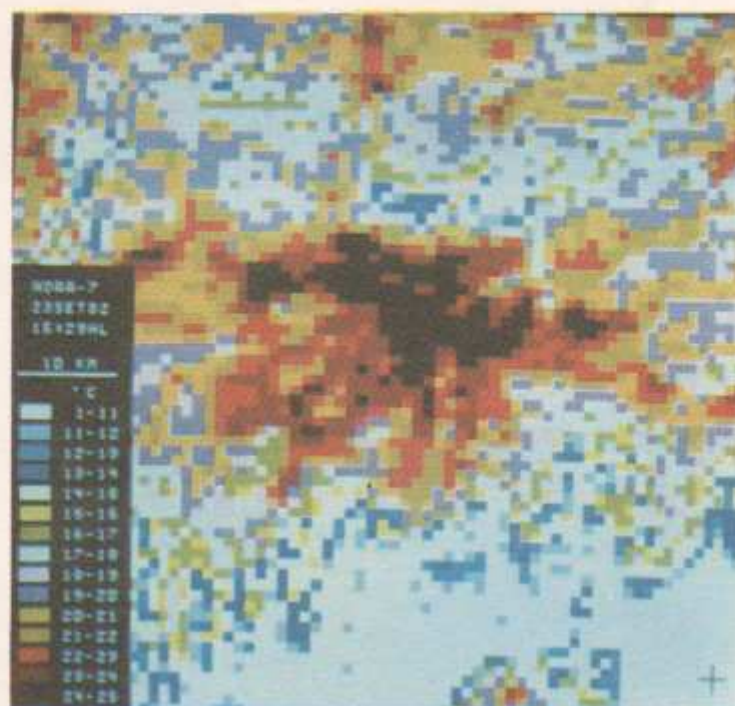


Figura 43. A ilha de calor da Metrópole Paulistana, através da imagem do satélite NOAA-7, do dia 23/9/82 (imagem gerada no INPE interpretada conforme algoritmo de Lombardo et alii 1982). O pico da temperatura (25°C) aparece no centro da cidade, na zona leste e norte e na área industrial da marginal do rio Tietê; no Parque do Estado e no Morumbi as temperaturas oscilam entre 18°C e 19°C. A conformação da ilha de calor coincide com os maiores índices de concentração de material particulado e dióxido de enxofre na atmosfera.

Predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), umidade relativa de 62% e ventos de SSE com intensidade de 5 m/s. Situação que, devido à velocidade do vento, favoreceu uma conformação da ilha de calor mais deslocada para o centro da cidade, zona leste, norte e vale do rio Tietê no sentido oeste. As maiores temperaturas foram registradas nestas áreas, com 25°C, enquanto no Parque do Estado e no bairro do Morumbi as temperaturas oscilaram entre 18 e 19°C, e na serra da Cantareira, 14°C. Cubatão também registrou temperaturas elevadas, variando de 24 a 25°C.

Nota-se, também, um pequeno pico de temperatura no centro de Santo Amaro, com 25°C.

Através do algoritmo utilizado para extrair parâmetros de temperatura das imagens termais, obteve-se uma grande aproximação com os dados das estações meteorológicas convencionais e as medidas de temperaturas registradas no campo. Em todas as imagens analisadas, o coeficiente de correlação foi sempre superior a 0,94 entre as medidas obtidas com imagens de satélites e as obtidas no campo (Figura 44). A precisão dos recursos de sensoramento remoto, principalmente por meio de um "scanner" infravermelho a bordo de um satélite, é imprescindível no estudo da ilha de calor. As imagens de satélite são convenientes quando necessário tomar medidas extensivas e repetitivas. Os sensores remotos a bordo de satélite fornecem a combinação da temperatura do ar e da superfície sendo, desse modo, importante para a comparação dos parâmetros de uso do solo urbano.

A maior limitação na utilização de imagens infravermelhas reside na dificuldade de estudos seqüenciais devido às variações nas condições da atmosfera, sendo o maior obstáculo a cobertura de nuvens. Entretanto, no predomínio de Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), onde a ilha de calor ocorre com maior intensidade, as imagens termais constituem um importante recurso para se avaliar a dimensão e espacialização do fenômeno.

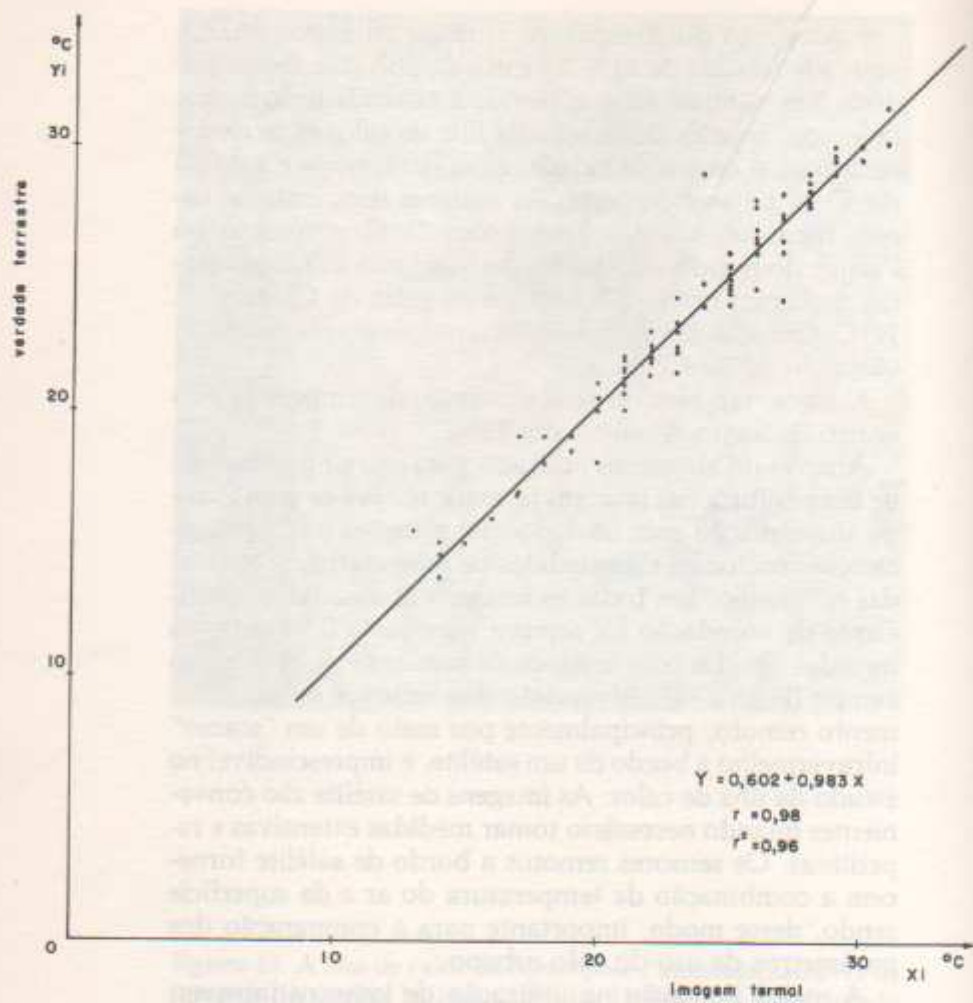


Figura 44. Relação entre o conjunto das temperaturas obtidas através de imagens termais e as medidas de campo.

A ilha de calor nas situações de inverno e de verão

A SITUAÇÃO DE INVERNO

A situação típica de inverno, correspondente aos dias 29 a 31 de julho e 1 a 18 de agosto de 1982, sofreu a ação dos Anticiclones Tropical e Polar (Tabelas 5, 6 e 7).

29/7/82 — A presença do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com inversão térmica (153 a 345 m) e umidade relativa de 46%, possibilitou o surgimento de uma ilha de calor moderada, às 9:00 horas da manhã, com alta concentração de dióxido de enxofre e material particulado (SO_2 e MP). Apesar dos fortes ventos de SSE, com intensidade de 8 m/s que prenunciava a chegada de uma frente fria, o gradiente horizontal de temperatura da ilha de calor atinge 11°C às 15:00 horas, com alta concentração de material particulado. A formação de nuvens (SC/Cu-9) propiciou a acumulação do calor produzido pela cidade e, também, de material particulado, indicada nos pontos de medidas localizados principalmente no centro da cidade, zona leste, bairros industriais e no bairro de Santo Amaro, resultando em um desconforto térmico.

Às 21:00 horas, com a penetração da frente fria, a temperatura declinou abruptamente e a precipitação acumulada em 24:00 horas foi de 18,1 mm. Nessa situação, a concentração de poluentes sofreu forte declínio. A ilha de calor continuou intensa, devido às condições propícias à sua formação no período da tarde.

30/7/82 — Sob a ação da Frente Polar Atlântica (FPA) as temperaturas decresceram durante o dia, resultando na formação de uma ilha de calor moderada e menores índices médios de poluição.

Tabela 5. Dados meteorológicos, poluição do ar e intensidade do gradiente térmico da ilha de calor, no inverno de 1982, às 9:00 horas.

Data	Alta de Color	V. atmosf. V. médio	SO ₂ microg./m ³	Material particulado		Simbólica	Vento		T. úm. %	T. °C	Precip. mm (acumul.)	Altit. do fuso (m)	T. °C da base	Vento na camada		Vento 650 mb, dir.	
				V. atmosf. V. médio	V. médio		dir.	int.						dir.	intens.		
29/7 M(6.0)	134	163	345	163	ATA	ATA	NW	10	20	46	0	131/345	18.4/19.0	N	2.0	W	14.5
30/7 M(7.0)	115	41	278	47	FF	FF	S	3	9.9	92	0	1300/1596	28/30	S	2.0	S	9.0
31/7 M(7.0)	105	51	318	76	AF	AF	S	3	10.9	90	0	863/1186	6.0/13.0	E	2.0	S	4.5
1/8 M(8.0)	81	37	154	50	AF	C	—	10.5	96	—	0	171/363	10.6/15.6	NE	2.0	—	—
2/8 M(8.0)	898	320	768	258	APM	APM	C	—	10.2	87	0	157/227	7.0/9.0	N	1.0	NW	12.5
3/8 M(8.0)	143	45	168	56	FF	FF	SSE	1	11.9	94	0	817/1670	7.0/9.0	A	—	A	—
4/8 M(8.0)	393	128	490	136	FF	C	—	11.4	86	As/As(10)	0	964/1200	7.0/9.0	A	—	A	—
5/8 M(8.0)	284	98	278	89	AF	NE	2	13.7	89	As(10)	0	391/577	9.4/11.8	ESE	1.0	E	7.5
6/8 M(11.2)	388	82	216	92	APM	NE	4	15.7	94	SO(10/10)	0	391/577	13.0/16.2	E	4.0	N	4.0
7/8 M(9.7)	342	202	210	161	ATA	C	—	19.3	78	—	0	77/270	17.0/19.0	ENE	1.0	NNW	5.0
8/8 M(11.5)	200	92	208	91	ATA	NNE	3	20.3	67	Cl(10)	0	259/646	16.0/18.0	E	1.0	N	8.0
9/8 M(6.9)	626	240	471	203	ATA	C	—	20.6	54	Cl(5)	0	35C/474	19.2/20.2	NNE	2.0	N	9.0
10/8 M(10.2)	157	62	280	66	FF	C	—	16.4	94	Sc(7)	3.7	—	16.0/13.0	SSE	2.0	SSW	2.0
11/8 M(7.3)	216	50	157	48	FF	SSE	4	13.6	95	Sc(7)	—	2170/2383	28.0/36.0	SSE	4.0	SE	11.0
12/8 M(8.0)	237	69	239	79	AF	ESE	6	15.3	75	As/As(3)	7.1	356/523	9.0/10.0	SSW	3.0	ESE	9.0
13/8 M(8.3)	324	88	162	74	APM	NE	7	15.3	70	Sc/Cu(6)	1.0	242/802	10.0/11.2	E	5.0	NE	8.0
14/8 M(9.4)	211	90	255	95	ATA	NNE	4	16.9	80	Cl(4)	0	124/219	14.0/16.0	E	3.0	N	11.0
15/8 M(9.1)	227	89	145	61	ATA	NNE	3	19.4	56	—	0	193/483	18.0/19.2	SSE	2.0	N	6.5
16/8 M(8.0)	385	169	239	137	ATA	C	—	16.2	89	Cl(4)	0.0	191/873	13.2/18.6	C	0.0	NNW	4.0
17/8 M(5.0)	642	259	365	210	ATA	C	—	16.9	89	As/As(10)	0	369/857	13.8/18.2	C	0.0	N	4.5
18/8 M(7.5)	359	163	204	163	EN	C	—	17.2	92	As/As(10)	0.3	935/630	12.6/14.0	E	1.0	W	5.0

Tabela 6. Dados meteorológicos, poluição do ar e intensidade do gradiente térmico da ilha de calor, no inverno de 1982, às 15:00 horas.

Data	Ilha de calor	SO ₂ (microg/m ³)		Material particulado (microg/m ³)		sinótica	Vento		T		Precip. mm (acum.)	
		V. extremos	V. médio	V. extremos	V. médio		dir.	int.	°C	%		
29/7	I(11,0)	106	29	333	162	ATA	SSE	8	24,6	75	Sc/Cm(9) Cl(1)	0
30/7	I(8,5)	164	52	259	69	PF	SSE	3	11,4	73	Sc(4) Ac(6)	2
31/7	I(8,0)	291	49	192	57	AP	SSE	3	16,3	63	Sc/Cul(6)	0
1/8	I(8,0)	185	33	253	56	APM	WNW	4	23,9	44	Sc/Cul(5) Cl(3)	0
2/8	I(11,0)	154	43	200	91	ATA	NW	8	25,8	39	As/Ac(9) Fc(1)	0
3/8	M(6,2)	172	45	145	60	PF	C	-	11,2	92	Sc(10)	0,3
4/8	I(8,1)	236	85	267	95	PF	ESE	3	15,0	74	As/Ac(10) Sc(1)	0
5/8	I(9,0)	198	79	169	86	AP	NE	1	17,9	75	Ac(6) Cl(3)	0
6/8	I(9,0)	185	72	227	91	APM	C	-	23,5	59	Cu/Sc(6)	0
7/8	I(14,0)	89	25	178	63	ATA	NNW	2	27	40	Cu(4)	*
8/8	I(9,0)	31	8	161	41	ATA	NNW	1	26,9	33	Cu/Sc(2)	0
9/8	I(13,7)	140	35	157	84	ATA	NW	4	27,9	32	Cl(9) Cu(1)	0
10/8	M(7,0)	165	41	125	59	PF	C	-	16,9	93	Sc(10)	4,3
11/8	M(6,6)	282	53	176	66	PF	SE	3	13,5	95	St/Sc(10)	0,5
12/8	M(6,1)	210	46	212	70	AP	SE	3	16,8	76	Sc(8) Ac(2)	0
13/8	M(7,8)	132	51	161	56	APM	NE	3	21,9	46	Cl(1)	0
14/8	I(10,1)	83	24	137	37	ATC	C	-	25,3	39	Cu(3)	0
15/8	I(8,0)	29	7	165	36	ATA	NW	5	26,4	28	Cu(2)	0
16/8	M(5,7)	126	37	149	83	ATA	WSW	2	26,6	38	Cu(3) Ac(1)	0
17/8	M(5,3)	206	136	404	194	ATA	C	-	24,5	46	Ac(5)	0,1
18/8	M(5,7)	157	39	263	77	IN	S	2	19,4	68	Sc(3) As(4)	0

Tabela 7. Dados meteorológicos do ar e intensidade do gradiente térmico da ilha de calor, no inverno de 1982, às 21:00 horas.

Data	lbr do calor	SO ₂ microg/m ³ V extrema	V média	Materiais particulado microg/m ³ V Extremos	V médio	Spórtula	Vento do	T °C	UR %	Nuvens	Precip. mm (acum.)	Altura do baso (m)	Temp. do baso °C	Vento na camada do	Vento dir	Vento dir	Vento dir
29/7	10.3	301	31	67	30	FF	C	11,9	95	Ac100	10,1	—	—	SSE	4,0	SSW	10,0
30/7	M(6.3)	231	46	129	53	FF	C	9,6	91	Sc001	0	A	A	A	A	A	A
31/7	M(5.4)	164	45	122	49	AP	C	12,3	90	Sr, Sc100	0	654/748	6,0/8,6	ESE	2,0	N	5,0
1/8	10.2	229	58	227	121	AlPM	C	13,2	95	Sr100	0	A	A	A	A	A	—
2/8	M(7.1)	113	44	94	46	FF	C	15,2	94	Ac1100	5,4	134/422	14,6/15,2	S	1,0	WSW	6,0
3/8	F(3.0)	175	67	153	60	FF	C	10,4	88	Sc(4)	0	467/684	9,2/10,0	SSE	1,0	SE	5,0
4/8	M(7.7)	208	67	149	70	FF	C	12,8	93	Sr100	0,1	680/753	9,2/10,0	SSE	2,0	E	3,0
5/8	10.6	276	96	253	139	AP	C	15,2	90	Cl, Cs(9)	0	—	—	E	4,0	ENE	7,0
6/8	10.0	294	108	518	181	AlPM	C	18,2	88	—	0	—	—	E	2,0	N	3,5
7/8	10.5	254	98	306	178	ATA	C	19,3	85	—	0	—	—	SE	1,0	NNW	4,0
8/8	M(6.5)	218	89	439	190	ATA	C	19,0	61	—	0	—	—	ESE	1,0	NNW	4,0
9/8	10.0	316	110	467	219	ATA	C	19,1	68	Ac(7)	0	—	—	WNW	1,0	WSW	4,5
10/8	M(6.4)	303	23	118	47	FF	SSE	14,5	96	Sc100	6,4	—	—	S	3,0	SE	5,5
11/8	M(6.0)	110	38	105	33	FF	ESE	12,8	97	Sr, Sc100	0,5	—	—	S	3,0	ESE	9,5
12/8	10.0	181	60	169	52	AP	ESE	13,1	88	Ac(1)	0	A	A	A	A	A	A
13/8	10.0	411	136	291	145	AlPM	C	13,4	93	—	0	124/219	14,4/16,0	SSW	1,0	NNE	11,5
14/8	M(7.6)	364	84	231	131	ATA	C	17,8	72	—	0	A	A	A	A	A	A
15/8	10.3	341	84	302	185	ATA	C	16,8	64	—	0	—	—	WNW	1,0	NNW	3,3
16/8	10.6	550	77	392	112	ATA	C	16,4	93	—	0	280/570	15,0/20,4	C	0,0	NNW	4,0
17/8	10.0	278	85	380	97	ATA	C	17,9	90	Ac, Sc(0)	0	—	—	SSW	3,0	SW	4,0
18/8	NE(7.0)	116	44	273	49	IN	C	16,2	93	Sc(1)	1,7	—	—	N	1,0	W	14,0

31/7/82 — A atuação do Anticiclone Polar na Grande São Paulo, causou declínio da temperatura e céu sem nuvens. No período diurno, com altos níveis de radiação solar devido à transparência atmosférica, ocasionou picos elevados no gradiente da ilha de calor, e um pequeno aumento nos índices de poluição, se comparado com o dia anterior.

1/8/82 — A presença do Anticiclone Polar (AP) e a sua conseqüente tropicalização no decorrer do período, chegando a uma baixa umidade relativa de 44% às 15:00 horas, propiciou a expansão da ilha de calor. Embora essas condições fossem favoráveis à concentração de poluentes, os baixos índices observados, quando comparados aos dos dias anteriores, podem ser explicados pela menor atividade urbana e industrial aos domingos.

2/8/82 — O Anticiclone Polar Modificado (APM), com inversão térmica às 9:00 horas da manhã (157 a 727 m) e calmaria, possibilitou um aumento de concentração de poluentes, chegando a atingir 888 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de enxofre (SO_2) no Cambuci e 537 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado na Lapa.

A ilha de calor, com gradiente de temperatura bastante elevado durante todo o dia, registrou 11°C às 15:00 horas e uma umidade relativa baixa de 39%. Os ventos de 8 m/s de NW foram responsáveis pela dispersão de poluentes a partir de 15:00 horas até 21:00 horas.

3/8/82 — A entrada da Frente Polar Atlântica (FPA) sobre São Paulo, com instabilidades frontais, nebulosidade e precipitação, favoreceu a dispersão de poluentes e moderação da ilha de calor durante todo o dia, chegando a registrar um gradiente de temperatura de apenas 3°C à noite.

4/8/82 — A continuidade da Frente Polar Atlântica

(FPA) enfraquecida, com ventos fracos e nebulosidade, propiciou um gradiente de temperatura atenuado da ilha de calor e aumento dos índices de poluição, se comparados com os do dia anterior.

5/8/82 — O predomínio do Anticiclone Polar (AP), durante todo o dia, teve como resultado um aumento da intensidade da ilha de calor, passando de moderada, às 9:00 horas, para intensa às 15:00 e 21:00 horas. Os índices máximos de concentração de poluentes ocorreram à noite.

6/8/82 — O Anticiclone Polar Modificado (APM), com temperaturas mais elevadas, favoreceu a alta intensidade da ilha de calor e maior concentração de material particulado, com índices 518 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no Taboão da Serra, às 21:00 horas.

7/8/82 — A presença do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com inversão térmica às 9:00 horas (77 a 270 m) favoreceu a concentração de poluentes nas camadas atmosféricas mais próximas à superfície, registrando 542 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de enxofre no centro da cidade e 310 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado no bairro da Lapa. No decorrer do período, o gradiente de temperatura da ilha de calor atinge picos elevados, devido à ausência de ventos e à presença de subsidência superior, com céu claro. A camada de mistura se expande e, com ela, os índices de poluição pulverizam-se, mas atingem a concentração de 306 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado, no bairro da Lapa, às 21:00 horas.

8/8/82 — Com o predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico, a inversão ocorre às 9:00 horas da manhã (259 a 546 m). No entanto, devido à diminuição das atividades industriais e urbanas aos domingos, os índices de poluição médios são menores, se comparados com o dia anterior. Somente no bairro da Lapa, às 21:00 horas, o mate-

rial particulado alcança o índice máximo de 439 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

9/8/82 — Ainda com a atuação do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), a inversão ocorrendo na superfície até 473 m, e os ventos calmos favorecendo a concentração de poluentes às 9:00 horas da manhã, esta chegou a atingir 658 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de enxofre, no bairro da Lapa, e 471 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado em Taboão da Serra, apesar dos índices moderados da ilha de calor. No decorrer do dia, às 15:00 horas, os ventos de NW, com intensidade de 4 m/s favoreceram a dispersão de poluentes. A intensidade da ilha de calor, porém, estendeu-se até a noite.

10/8/82 — A penetração da frente fria, com instabilidade da atmosfera, ocasionou precipitação durante o dia todo. A ilha de calor foi moderada, associada a uma diminuição nos índices de poluição, se comparados com os do dia anterior.

11/8/82 — Ainda a predominância da frente fria, com ventos fortes do SE, instabilidade e dispersão de poluentes, apesar de a intensidade da ilha de calor alcançar índices moderados a intensos.

13/8/82 — O Anticiclone Polar passa a tropicalizar-se. As temperaturas sofrem considerável elevação e, associando-se à ausência de nuvens, a ilha de calor alcança índices elevados. O pico máximo de concentração de dióxido de enxofre ocorre no bairro do Cambuci, registrando 411 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, às 21:00 horas. A distribuição espacial da poluição sofre uma certa desorganização, devido à ocorrência de ventos do NE.

14/8/82 — O predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com inversão térmica de 124 a 219 m, às 9:00

horas, possibilitou índices moderados de poluição devido à presença de ventos do NNE, com intensidade de 4 m/s. A ilha de calor alcançou índices médios e intensos.

15/8/82 — Apesar da ação do Anticiclone Tropical Atlântico, com inversão térmica de 193 a 483 m, às 9:00 horas da manhã, a poluição registrou índices menores se comparados aos do dia anterior, o que pode ser explicado pela diminuição da atividade industrial e urbana aos domingos. Devido às condições propícias à formação da ilha de calor, o gradiente térmico entre a periferia e o centro da cidade foi elevado.

16/8/82 — Ainda predomina o Anticiclone Tropical Atlântico (ATA), com inversão térmica de 191 a 573 m, às 9:00 horas da manhã, o que favoreceu a concentração de poluentes que se distribuíram espacialmente na região central, leste e bairros industriais da Grande São Paulo. Nessas áreas, os índices da ilha de calor alcançaram seus mais elevados picos.

17/8/82 — A predominância de tempo estável com calma, subsidência superior, possibilitou a concentração de poluentes, com o máximo de 642 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de enxofre, às 9:00 horas, no bairro do Cambuci, quando ocorreu inversão de 269 a 557 m. A ilha de calor teve valores moderados durante o período diurno e o máximo às 21:00 horas.

18/8/82 — Com a linha de instabilidade localizada na Grande São Paulo, ocorreu precipitação, possibilitando a dispersão de poluentes e uma ilha de calor moderada, principalmente no período noturno.

A SITUAÇÃO DE VERÃO

Esse período caracterizou-se por tipos de tempos instáveis, oriundos de várias frentes sucessivas e alternadas, com tempo estável com a presença do Anticiclone Polar Modificado (Tabelas 8, 9 e 10).

6/12/82 — Predomínio do Anticiclone Polar Modificado (APM), com intensidade da ilha de calor e poluição elevadas.

7/12/82 — Ainda a ação do Anticiclone Polar Modificado (APM), durante o período diurno, levou a ilha de calor a alcançar intensidade elevada e poluição relativamente alta. No entanto, às 21:00 horas, com a penetração da Frente Polar Atlântica (FPA), as temperaturas decresceram e a ilha de calor atingiu índices moderados.

8/12/82 — Sob o domínio da frente fria, céu encoberto, pouca velocidade do vento, a Grande São Paulo teve índices elevados da ilha de calor e pico máximo da poluição registrando 824 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de enxofre. Nesse caso, é possível que as nuvens, associadas à ausência de ventos, possibilitem o efeito de estufa, responsável pelo aumento do gradiente horizontal de temperatura na cidade.

9/12/82 — Predomínio do Anticiclone Polar Atlântico (APA), com ventos intensos de E e NW e céu encoberto influenciou no gradiente térmico fraco da ilha de calor e nos índices relativamente baixos da concentração de poluentes.

11/12/82 — A penetração da Frente Polar Atlântica (FPA), com instabilidade e precipitação possibilitou uma

Tabela 8. Dados meteorológicos, poluição do ar e intensidade do gradiente térmico da ilha de calor, no inverno de 1982, às 19:00 horas.

Data	Ilha de calor	SO ₂ microg/m ³ V. extremo	Material particulado microg/m ³ V. médio	V. máximo	Sinótipo	Vento dir. int.	T °C	UR %	Nuvens (cum.)	Preço. mm	Altura da base (m)	T°C da base	Vento na camada dir. int.	Vento 450 mb dir. int.
6/12	10.0)	204	85	176	77	APM NNW	23.1	66	Ac(15) Cl(15)	0	A	A	A	A
7/12	10.3)	270	84	224	69	APM NW	19.8	94	Cc(Nb-Sp)(9) As(11)	2.3	A	A	A	A
8/12	10.0)	240	87	165	63	PF C	17.0	92	Sc(10)	0	A	A	A	A
9/12	10.3)	253	94	180	61	AP E	18.9	75	Sc(10)	0	1.284/171.8	10.0/12.4	SSE	3.0
10/12	10.5)	288	91	176	73	AP NNE	20.0	78	Sc(10)	0	586/746	11.8/15.4	E	4.0
11/12	10.0)	195	80	184	71	FQ C	19.0	97	Sc(Sp)(8) Ac(10)	2.3	A	A	A	A
12/12	10.5)	128	58	145	38	ATA C	19.8	97	Ac(10)	2.6	145/242	18.2/10.1	ENE	0.2
13/12	10.5)	316	125	204	68	ATA NNW	23.5	61	Ac(8) Cl(1)	6.1	—	—	N	0.3
14/12	10.4)	272	91	259	83	FQ NNW	21.7	79	Ac(10)	3.1	418/613	18.8/19.0	NNW	0.2
15/12	10.6)	273	109	231	61	IN NNW	22.4	84	Ac(10) Ac(8)	12.5	A	A	A	A
16/12	10.5)	307	120	200	65	FQ C	20.7	93	Sc(9) As(1)	8.1	A	A	A	A
17/12	10.8)	253	82	299	91	IN NNW	20.3	91	Sc(10)	2.9	A	A	A	A
18/12	10.4)	141	42	213	95	IN NW	22.7	77	Sc(8) Ac(1) Cl(1)	0.3	A	A	A	A

Tabela 9. Dados meteorológicos, poluição do ar e intensidade do gradiente térmico da ilha de calor, no verão de 1982, às 15:00 horas.

Data	Ilha de calor	SO ₂ microg/m ³		Material particulado microg/m ³		Sinótica	Vento		T °C	UR %	Nuvem	Precip. mm (acum.)
		V. extremos	V. médio	V. extremos	V. médio		dir.	int.				
6/12	I(10,5)	162	49	255	80	APM	NW	1	25,5	76	Sc(6) Ac(1) Cl(s)	0,4
7/12	I(8,5)	292	110	276	78	FF	C	-	21,1	87	Sc(8) As(2)	5,3
8/12	I(11,5)	245	75	161	55	FF	ESE	2	20,5	74	Sc(10)	0
9/12	M(4,0)	268	77	220	76	AP	NW	5	19,8	78	Sc/Sr(9)	0
10/12	F(3,7)	234	72	271	80	AP	SE	3	22,9	76	Sc(10)	0
11/12	M(5,0)	183	66	227	66	HQ	C	-	19,6	91	Sc/Cu(9) As/Ac(1)	7,7
12/12	F(3,6)	82	30	110	37	ATA	C	-	22,6	80	Sc(1) As/Ac(9)	0
13/12	I(10,5)	169	49	255	54	ATA	WNW	4	26,2	55	Cu(1) Ac(7) Cl(1)	0
14/12	M(4,5)	222	69	212	77	FQ	C	-	24,6	72	Sc(1) Ac/As(9)	0
15/12	M(7,0)	317	78	212	68	IN	C	-	24,6	72	Sc(1) Ac/As(9)	3,9
16/12	I(8,0)	251	81	149	64	HQ	C	-	22,8	84	Sc/Cu(4) As/Ac(6)	0,5
17/12	M(5,5)	180	60	239	54	IN	NNW	5	23,2	82	Sc(5) Ac/As(5)	3,6
18/12	I(11,3)	128	28	200	47	IN	NNW	9	23	77	Sc(10)	0

Tabela 10. Dados meteorológicos, poluição do ar e intensidade do gradiente térmico da ilha de calor, no inverno de 1982, às 19:00 horas.

Data	ilha de calor	SO ₂ microg/m ³ V. extremo	Material particulado microg/m ³ V. médio	Suicida	Vento dir.	Vento int.	T °C	UR %	Nucom	Precep. (acum.)	Altura da base (m)	T °C da base	V. base dir.	V. base int.	Vento * (50 m) dir.
6/12	M(5.0)	166	73	94	APM	NW	2	20.1	94	5r(15)	16.3	A	A	A	A
7/12	M(5.0)	297	103	220	FF	C	—	19.4	95	5r(10)	0	A	A	A	A
8/12	M(6.0)	824	110	173	FF	ESE	1	15.8	90	5r(7)	0	742/851	15.0/16.2	SE	5.0
9/12	F(3.5)	204	57	204	AP	F	2	17.6	93	5r(5)	0	A	A	A	A
10/12	M(6.0)	216	96	227	FQ	NE	3	19.4	95	Ac/A(8)	16.6	—	ENE	3.0	NNE
11/12	M(4.5)	158	52	161	FQ	ENE	2	18.6	94	Ac/A(10)	1.9	—	E	3.0	NE
12/12	F(3.5)	154	53	208	ATA	C	—	19.6	92	Ac/A(10)	7.5	—	NE	2.0	N
13/12	M(4.1)	121	49	275	ATA	C	—	19.8	95	Ch(10)	22.8	—	N	0.3	NW
14/12	M(4.1)	271	90	236	FQ	C	—	19.9	92	Ac/(5/10)	4.6	418/613	18.8/19.0	N	0.2
15/12	M(5.0)	276	107	243	IN	C	—	19.9	93	Ac/(10)	0.6	A	A	A	A
16/12	M(5.0)	246	86	329	FQ	C	—	20.4	95	Sr/(5/10)	8.6	A	A	A	A
17/12	M(5.0)	303	106	329	IN	C	—	20.6	93	As/A(10)	6.2	A	A	A	A
18/12	(9.0)	178	43	163	IN	NW	4	21.6	84	Ac/(5/10)	0	A	A	A	A

menor intensidade da ilha de calor. A condição de instabilidade da atmosfera pode explicar os índices menores de poluição.

12/12/82 — O domínio do Anticiclone Tropical Atlântico, com inversão térmica às 9:00 horas (145 a 242 m), deveria causar índices elevados de poluição. No entanto, a baixa atividade industrial e urbana aos domingos e índices elevados de precipitação favoreceram a dispersão de poluentes e índices não muito significativos da ilha de calor.

13/12/82 — Ainda sob a ação do Anticiclone Tropical Atlântico, o máximo de poluição foi registrado no Cambuci, com 336 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de enxofre e 204 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado em Santo André, às 9:00 horas. A intensa atividade da ilha de calor às 15:00 horas, associada à concentração de partículas sólidas em suspensão, pode explicar a precipitação intensa com trovoadas que ocorreu após as 17:00 horas. Parece que a variação do gradiente de temperatura horizontal contribuiu para a intensificação das correntes convectivas, responsáveis pela formação de chuva na Grande São Paulo. Às 21:00 horas, houve diminuição da própria intensidade da ilha de calor e aumentou a dispersão de poluentes, devido às fortes chuvas que ocorreram na área.

14/12/82 — A penetração da Frente Polar Atlântica (FPA) foi responsável pela dispersão de poluentes e diminuição da intensidade da ilha de calor.

15/12/82 — A linha de instabilidade sobre São Paulo favoreceu índices não muito significativos da ilha de calor e concentração média de poluentes.

16/12/82 — A penetração da Frente Polar Atlântica (FPA) com instabilidade atmosférica, ocasionou a fraca atividade da ilha de calor às 9:00 horas. No entanto, com

a calmaria, radiação indireta e nebulosidade, o gradiente térmico da ilha de calor atinge 8°C e, possivelmente, contribui na formação de condensação e precipitação, após às 15:00 horas. Às 21:00 horas, devido às fortes chuvas, a ilha de calor tem seus índices moderados.

17/12/82 — Com a linha de instabilidade sobre São Paulo, diminui a concentração de poluentes e a ilha de calor atinge valores moderados.

18/12/82 — Ainda com a presença da linha de instabilidade sobre São Paulo, permanece a baixa concentração de poluentes e fraca intensidade da ilha de calor. No entanto, às 15:00 horas, devido à forte radiação solar, a ilha de calor é intensa, prolongando-se até às 21:00 horas.

Os dados obtidos no trabalho de campo foram plotados nos mapas de uso do solo em todo o período analisado — inverno e verão. Somando-se a esses dados, foram plotadas as temperaturas das estações meteorológicas convencionais e os dados de velocidade e intensidade de vento obtidos junto à CETESB, nas estações telemétricas distribuídas na Grande São Paulo. Em seguida, traçou-se as isotermas dos três horários (9:00, 15:00 e 21:00 horas), nos dois períodos analisados. Depois de traçar os mapas de isotermas, pode-se verificar que a conformação espacial da ilha de calor tem pouca alteração na Grande São Paulo. O que ocorre é a variação de sua intensidade de acordo com o comportamento sinótico. Em dias de céu claro, com calmaria e subsidência a ilha de calor alcança sua maior expressão em área e no gradiente de temperatura; em contrapartida, em dias chuvosos, com instabilidade, há uma concentração em área e a intensidade de variação da temperatura diminui. Foram feitos mapas das normais de temperatura, para os dois períodos analisados. O maior gradiente térmico da ilha de calor e sua maior expressão espacial verifica-se às 15:00 e 21:00 ho-

ras, no inverno. No verão, a ilha de calor sofre um declínio, diminuindo sua intensidade. Isto pode ser explicado pela grande quantidade de precipitação que ocorreu nesse verão, o que, provavelmente, resultou nos baixos valores do gradiente horizontal da temperatura na cidade.

A situação típica de inverno pode ser observada no dia 13 de agosto de 1982. A conformação espacial da ilha de calor obtida através das imagens termais é semelhante às obtidas com observação de campo (Figs. 45, 46 e 47). Pode-se verificar que os maiores índices de temperatura ocorrem no centro da cidade e zona leste, onde predomina ocupação horizontal intensa com ausência de vegetação, e em Santo Amaro, pelas próprias condições topográficas e intensa ocupação urbana. Durante o período da tarde, nota-se a influência da brisa marítima do sudeste.

A situação de verão pode ser exemplificada com o dia 13/12/82 (Figs. 48, 49 e 50).

Essas medidas foram importantes na explicação espacial e, principalmente, no estudo de sua dinâmica temporal, através da sucessão contínua do processo da ilha de calor e sua integração com as variações dos sistemas sinóticos causadores do tempo. Os mapas médios das estações para inverno e verão, comprovam a permanência da ilha de calor e sua distribuição espacial nos horários das 9:00, 15:00 e 21:00 horas, em várias condições de tempo meteorológico (Figs. 51, 52, 53, 54, 55 e 56).



Figura 45. A ilha de calor da Metrópole Paulista, no dia 13/8/82, às 9:00 horas.

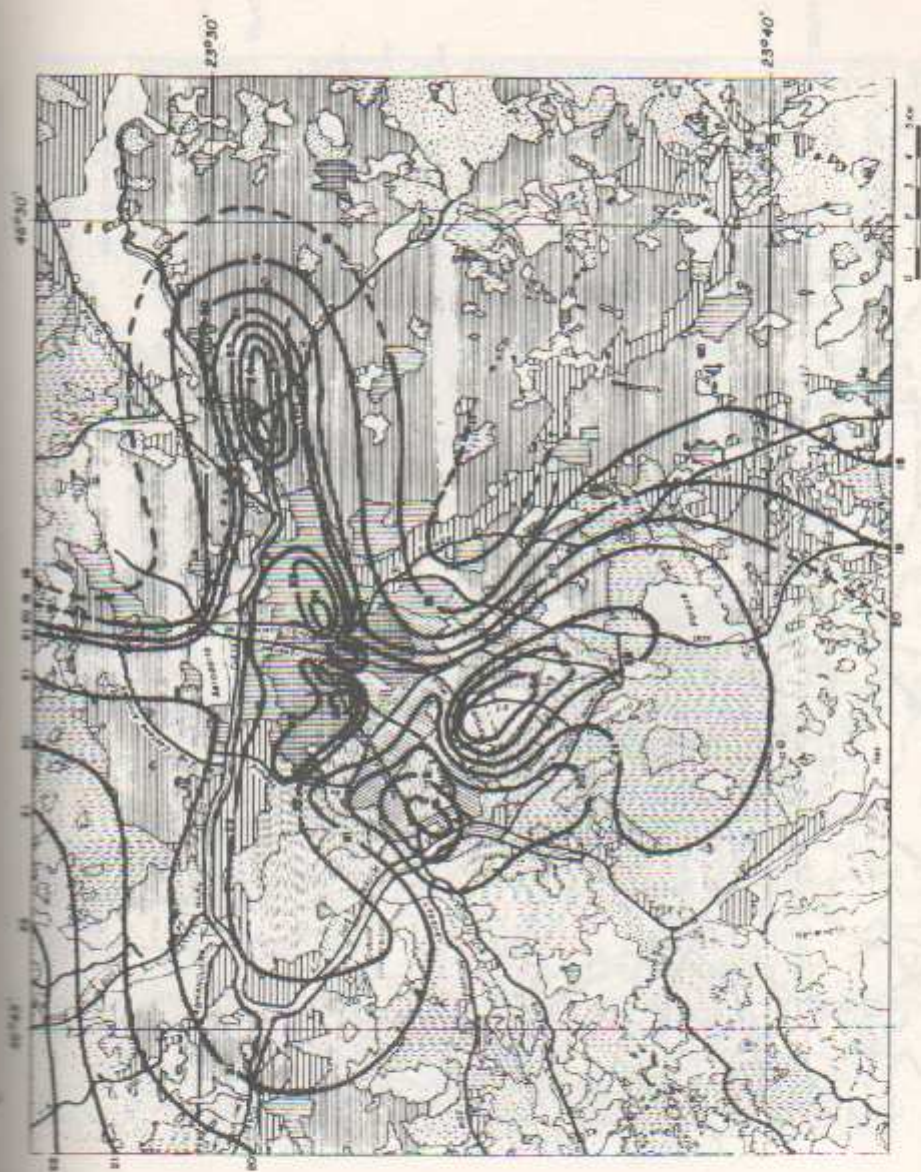


Figura 46. A ilha de calor da Metrópole Paulista, no dia 13/8/82, às 15:00 horas.



Figura 47. A ilha de calor da Metrópole Paulista, no dia 13/8/82, às 21:00 horas.



Figura 48. A ilha de calor da Metrópole Paulista, no dia 13/12/82, às 9:00 horas.

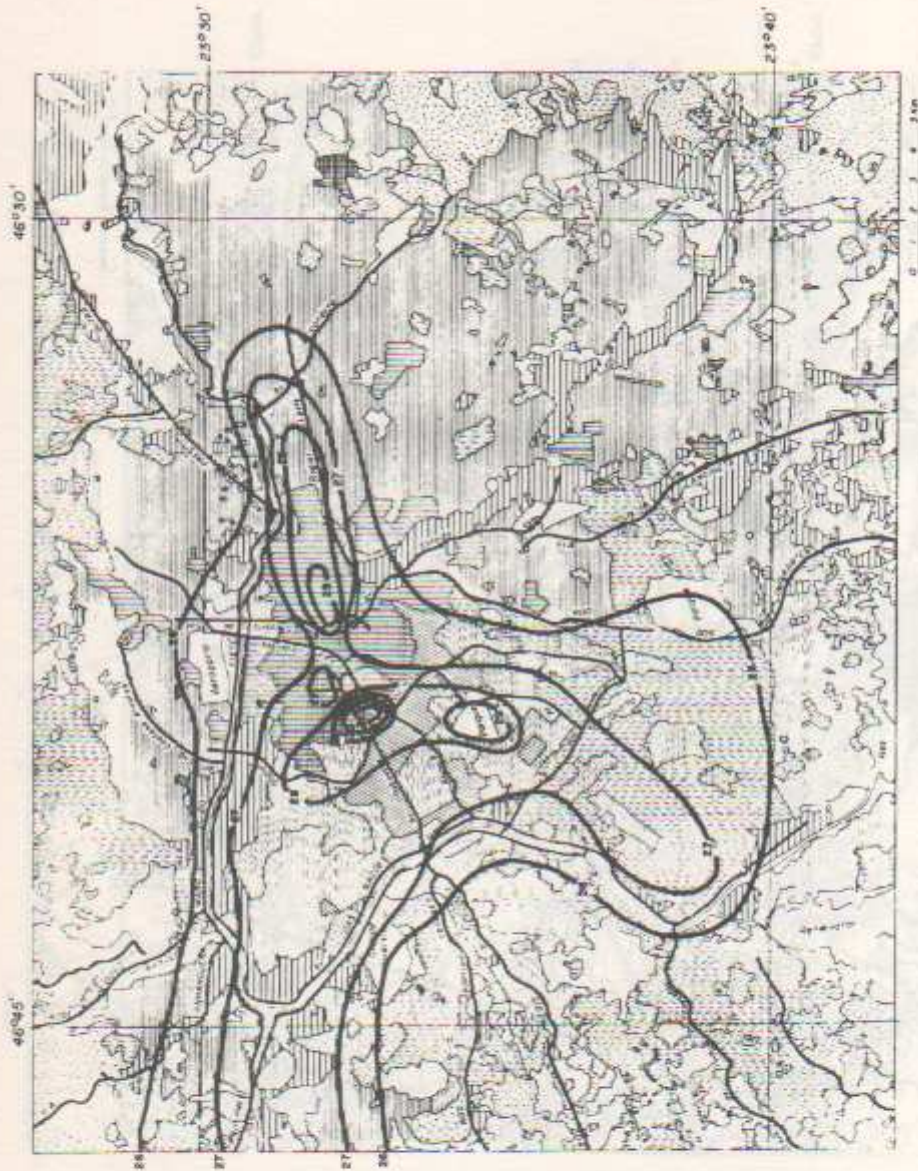


Figura 49. A ilha de calor da Metrópole Paulistana, no dia 13/12/82, às 15:00 horas.

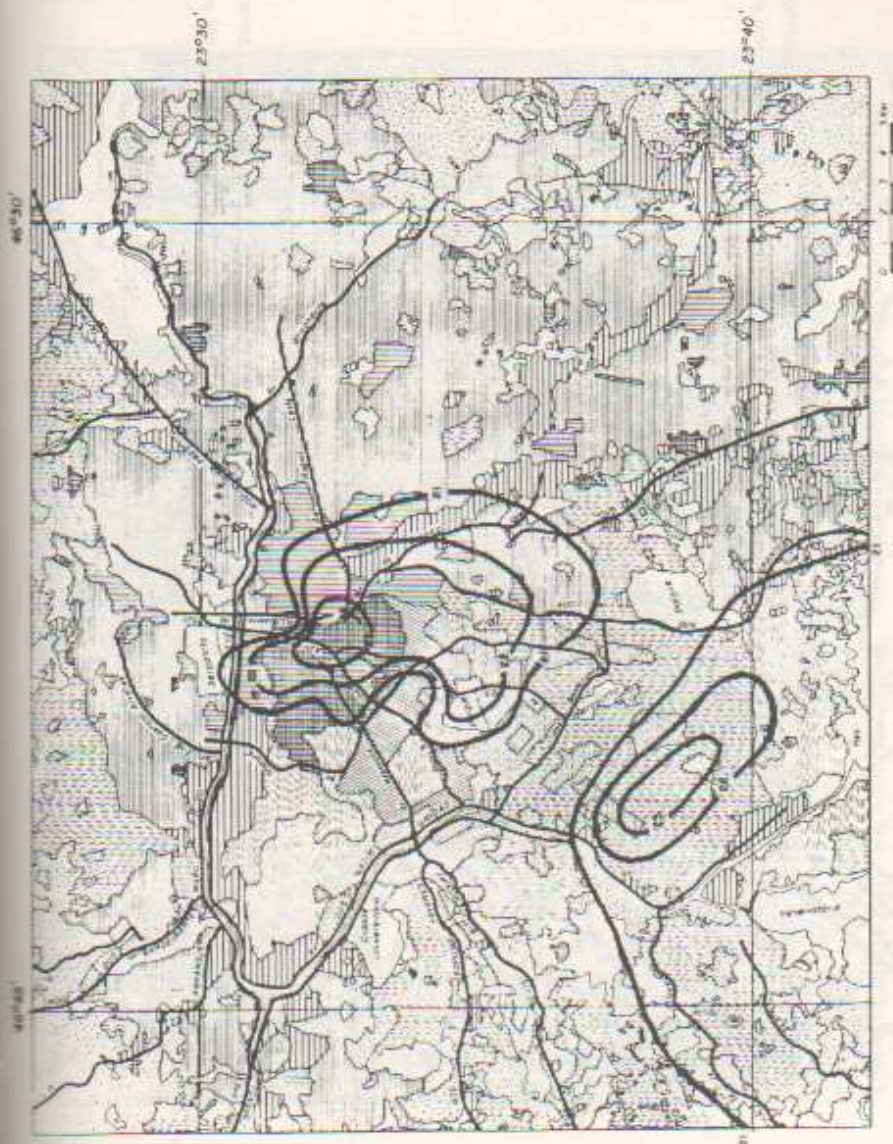


Figura 50. A ilha de calor da Metrópole Paulistana, no dia 13/12/82, às 21:00 horas.



Figura 51. A ilha de calor de inverno da Metrópole Paulista (médias), às 9:00 horas.



Figura 52. A ilha de calor de inverno da Metrópole Paulista (médias), às 15.00 horas.

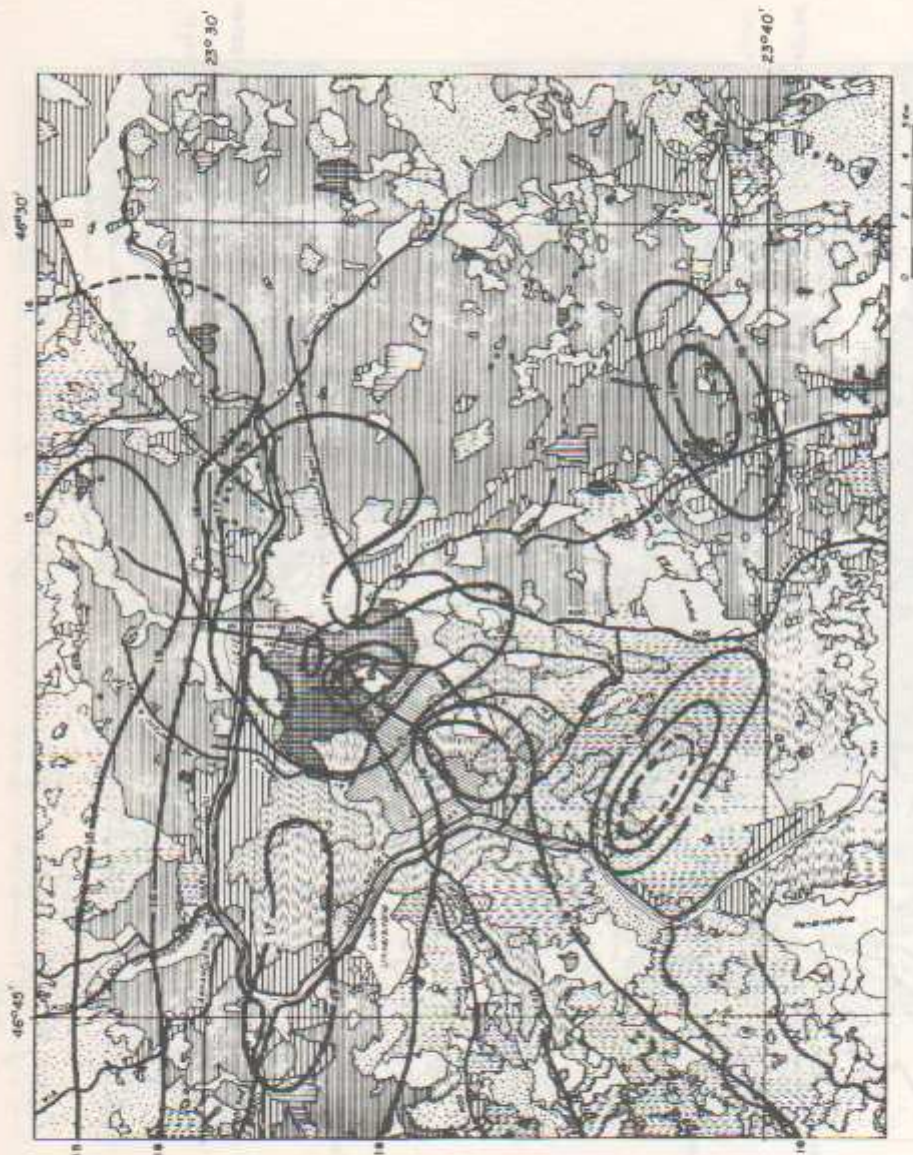


Figura 53. A ilha de calor de inverno da Metrópole Paulistana (médias), às 21:00 horas.

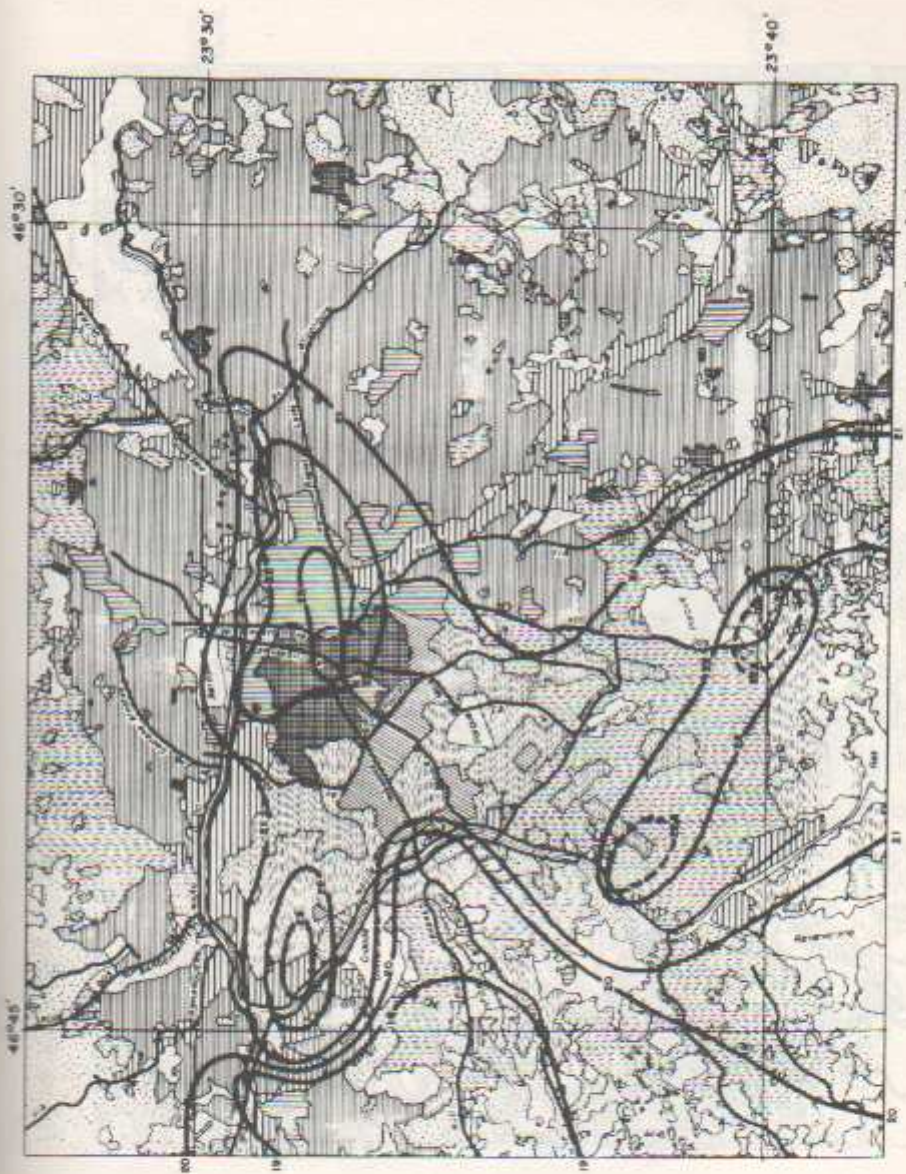


Figura 54. A ilha de calor de verão da Metrópole Paulistana (médias), às 9:00 horas.

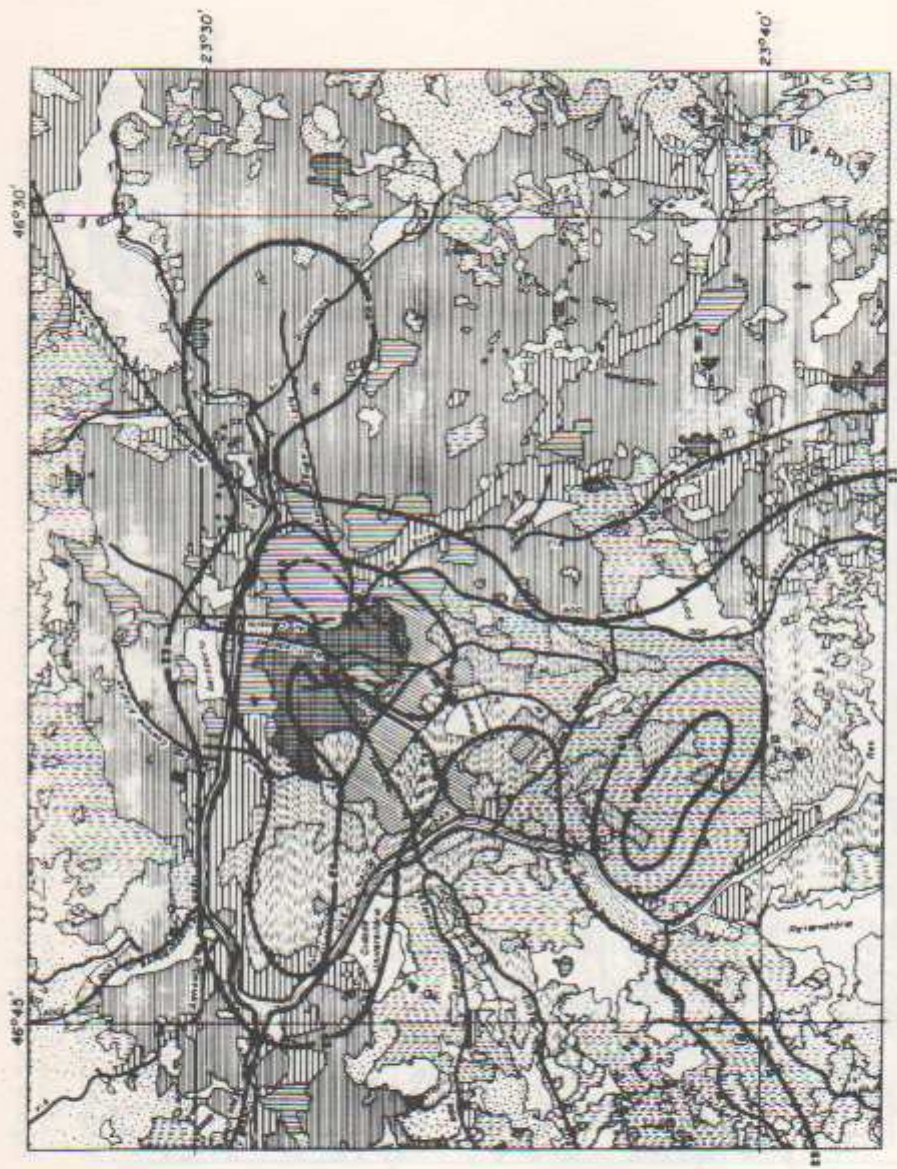


Figura 55. A ilha de calor de verão da Metrópole Paulistana (médias), às 15:00 horas.



Figura 56. A ilha de calor de verão da Metrópole Paulista (médias), às 21:00 horas.

Relações de temperatura do ar, temperatura radiométrica, umidade relativa, vento e uso do solo

Os transectos efetuados na direção oeste-leste foram importantes na definição da ilha de calor, assim como nas relações entre esse fenômeno e o uso do solo em espaços diferenciados da Grande São Paulo.

Apesar da dificuldade de trânsito, que, muitas vezes, dificultou o percurso, os transectos foram importantes por conciliarem aspectos da temperatura do ar, temperatura radiométrica dos diferentes usos do solo, umidade relativa e vento.

SITUAÇÃO DE INVERNO

30/7/82 (Fig. 57)

9:00 horas — Sob a ação da Frente Polar Atlântica (FPA), com céu encoberto, a temperatura do ar e a temperatura radiométrica média dos alvos não tiveram grande variação, em todos os pontos observados. A temperatura radiométrica média dos alvos foi mais elevada no ponto 6 (Rua da Consolação), devido à maior contribuição da radiação efetiva terrestre nessa hora.

15:00 horas — É nítido o formato de domo da ilha de calor, principalmente se considerarmos as medidas radiométricas médias, mais intensas durante a tarde e a noite. A umidade relativa do ar é menor na área onde ocorre a ilha de calor.

21:00 horas — Pode-se observar a elevação abrupta de temperatura do ponto 5 (Rua da Consolação) ao ponto 10

(marginal do rio Tietê) e um relativo abaixamento da umidade relativa. Os ventos foram fracos durante todo o percurso.

31/7/82 (Fig. 58)

9:00 horas — O céu estava totalmente coberto, com predomínio do Anticiclone Polar e ventos fracos. A temperatura sofreu um decréscimo de 1°C do ponto 1 (Cidade Universitária) ao ponto 10 (marginal do rio Tietê). A temperatura radiométrica não sofreu oscilação.

15:00 horas — Ação do Anticiclone Polar, com céu limpo e calmaria. A temperatura teve um leve acréscimo do ponto 1 ao ponto 10.

21:00 horas — Predomínio do Anticiclone Polar, com vento pouco intenso. A temperatura elevou-se 2,5°C do ponto 1 ao ponto 5 (Rua da Consolação). No ponto 5, a temperatura subiu e a umidade relativa sofreu um decréscimo, situação típica da ilha de calor, principalmente à noite. Do ponto 6 ao ponto 10, o vento intensificou-se e a temperatura sofreu um leve decréscimo.

1/8/82 (Fig. 59)

9:00 horas — Apesar das medidas serem observadas no ponto 1 ao ponto 10 (primeiro ponto da marginal do rio Tietê), a temperatura sofreu um pequeno aumento e a umidade relativa um declínio, sob a ação do Anticiclone Polar, com calmaria.

15:00 horas — Através da carta sinótica verificou-se que o Anticiclone Polar sofreu uma tropicalização. A umidade relativa diminuiu e as temperaturas foram mais elevadas. A temperatura radiométrica média dos alvos foi inferior à temperatura do ar, do ponto 1 ao ponto 7. No

ponto 7, às 15:30 horas, a temperatura radiométrica média ultrapassa a temperatura do ar, o que auxiliou bastante a conformação da ilha de calor no centro da cidade. Na parte da manhã, a temperatura radiométrica é menor que à tarde, porque a radiação solar ainda não é suficiente para aquecer o alvo, enquanto que à tarde os alvos estão aquecidos e transmitem ao sensor uma temperatura radiométrica maior que a temperatura do ar.

21:00 horas — A ilha de calor é bem definida, com variação de $4,5^{\circ}\text{C}$ entre a Cidade Universitária (20:30 horas) e Estação da Luz (21:15 horas), apesar do registro ser efetuado com uma diferença de 45 minutos. Com o aumento de temperatura, a umidade relativa diminuiu.

2/8/82 (Fig. 60)

9:00 horas — A ação do Anticiclone Polar Tropicalizado (APT), com inversão térmica, céu totalmente limpo, presença de névoa seca, possibilitou grande concentração de partículas sólidas em suspensão. A ilha de calor foi insignificante pela manhã, e a umidade relativa permaneceu elevada durante todo o trajeto.

15:00 horas — A temperatura oscilou apenas 1°C entre os pontos, indicando que a ilha de calor não alcançou expansão no sentido oeste-leste. A umidade relativa foi menor, principalmente no centro da cidade, possivelmente relacionado ao fenômeno ilha de calor. A pouca variação de temperatura entre os pontos pode ser explicada pela intensidade razoável de vento, predominando a velocidade de 4 m/s de NW, o que contribuiu para a homogeneização do gradiente horizontal de temperatura.

21:00 horas — Formação bem definida da ilha de calor com variação de até $4,5^{\circ}\text{C}$. Os pontos mais elevados ocorreram na zona leste, nas proximidades da marginal

do rio Tietê. Nessa área, a umidade relativa também teve um declínio. No entanto, entre a Estação da Luz e a marginal do rio Tietê, a temperatura sofreu uma diminuição, passando de 16°C no ponto 10, para 19,5°C no ponto 11. Em contrapartida, a umidade relativa elevou-se. Essa situação pode ser explicada pelas condições peculiares da conformação da ilha de calor, com convergência de ventos ascendentes no lado oeste da ilha de calor.

8/8/82 (Fig. 61)

15:00 horas — O predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico, com algumas variações na velocidade do vento, favoreceu a formação da ilha de calor. Esse fenômeno foi mais evidenciado a partir da Rua da Consolação até a marginal do rio Tietê. Nos pontos onde a temperatura do ar foi mais elevada, a umidade relativa foi menor.

9/8/82 (Fig. 62)

15:00 horas — Predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico, com variação de temperatura entre os pontos 1 e 15 de 4°C. A velocidade do vento foi considerável, de 3 m/s, e a umidade relativa sofreu um declínio em relação à elevação da temperatura. Do ponto 5 (cruzamento da Rua da Consolação com a Avenida Paulista) à Estação da Luz, a temperatura sofreu declínio.

21:00 horas — A mesma configuração da ilha de calor das 15:00 horas, mas com localização diferenciada. O pico de temperatura aparece na Estação da Luz (ponto 9).

13/8/82 (Fig. 63)

15:00 horas — A ação do Anticiclone Polar Tropicalizado favoreceu a formação da ilha de calor, entre os pontos 9

(Estação da Luz) e 11 (marginal do rio Tietê). Entretanto, houve pequeno declínio da temperatura que pode ser explicado pela ocupação diferenciada do solo, com maior densidade de vegetação e ocorrência de terrenos vagos, nas proximidades da marginal do rio Tietê. Os valores de umidade relativa acompanham, no sentido inverso, a elevação da temperatura. A umidade relativa aumenta somente naqueles pontos onde houve diminuição da temperatura.

21:00 horas — As medidas registradas até o ponto 8 evidenciam a formação da ilha de calor, com picos mais elevados de temperatura nas proximidades da Estação da Luz e, simultaneamente, menores valores de umidade relativa.

15/8/82 (Fig. 64)

15:00 horas — Predomínio do Anticiclone Tropical Atlântico, com ventos fracos até 15:30 horas e, posteriormente, com maior intensificação (5 m/s), às 15:43 horas. O formato da ilha de calor mostrou-se suavemente ondulado do ponto 1 (Cidade Universitária) ao ponto 7 (Praça Roosevelt), com uma subida de temperatura, posteriormente, até a Estação da Luz. A forma pouco abaulada que aparece do ponto 1 ao ponto 7 pode ser explicada pela formação de uma circulação local, possivelmente influenciada pela atividade da própria ilha de calor. A umidade relativa diminui de maneira inversa à conformação da ilha de calor.

SITUAÇÃO DE VERÃO

10/12/82 (Fig. 65)

9:00 horas — Sob a ação da Frente Polar Atlântica, a ilha

de calor foi pouco expressiva nesse período. A grande elevação de temperatura do ponto 11 (marginal do rio Tietê) pode ser explicada pela diferença de horário. No primeiro ponto, o registro foi realizado às 8:35 horas e no ponto 11 as medidas foram efetuadas às 10:10 horas.

15:00 horas — O gradiente de temperatura foi bastante significativo entre o ponto 1 (Cidade Universitária) e o ponto 8, mostrando a intensidade da ilha de calor de $4,5^{\circ}\text{C}$.

21:00 horas — Devido à instabilidade da atmosfera, a ilha de calor foi alterada, mas sua conformação foi evidenciada através do gráfico. A umidade relativa não registrou declínio acentuado. A diferença de valores da umidade relativa em alguns pontos é devido ao domínio da instabilidade da atmosfera.

15/12/82 (Fig. 66)

9:00 horas — Apesar da presença de uma linha de instabilidade, o gráfico mostra uma pequena configuração da ilha de calor em São Paulo e, conseqüentemente, um declínio da umidade relativa do ar. As oscilações tanto da temperatura como da umidade relativa são acompanhadas de diferenças na velocidade do vento. Os registros de temperaturas radiométricas dos alvos foram inferiores aos de temperatura do ar, em razão das condições de instabilidade e intensa nebulosidade.

15:00 horas — A situação foi semelhante àquela ocorrida às 9:00 horas, com maior pico de temperatura no ponto 10 (marginal do rio Tietê).

Essa análise dos transectos contribuiu para verificar o comportamento da ilha de calor, no sentido oeste-centro e do centro para o leste, em direção à marginal do rio Tietê. As variações de topografia e a associação com os tipos

de uso do solo, através da análise de fotografias aéreas, foram imprescindíveis para a explicação da conformação da ilha de calor nos três horários analisados. As medidas dos outros parâmetros da atmosfera, como vento, umidade relativa e temperatura radiométrica dos diferentes usos do solo contribuíram para a análise integrada dessas variáveis com a ilha de calor. Por exemplo, a associação entre elevação de temperatura e diminuição da umidade relativa foi comprovada em todos os transectos medidos. Essas relações comprovam aquelas discussões teóricas sobre os efeitos termoantrópicos e suas associações com as variações de outros parâmetros climáticos, como umidade relativa e vento.

As medidas móveis, apesar de serem observadas em horários diferentes devido ao deslocamento entre os pontos, foram importantes no estudo combinado dos parâmetros climatológicos. Através dessa técnica observacional pode-se analisar os efeitos de combinações da poluição térmica com relação à velocidade e direção do vento e valores de umidade relativa. As temperaturas radiométricas dos alvos e as temperaturas do ar, em diferentes horários, possibilitaram a observação dos diferentes tipos de reflectância dos materiais de construção às 9:15 e 21:00 horas locais.

Os transectos podem contribuir para o estudo da circulação local provocada pelo efeito da ilha de calor.

As medidas móveis combinadas com as fixas podem contribuir para a análise da dinâmica da ilha de calor. No entanto deve-se ressaltar que esses transectos efetuados nas áreas urbanas são onerosos e exigem aparelhos observacionais de precisão assim como uma equipe especializada.

Essas medidas sistematizadas podem contribuir para o estudo da ilha de calor; elas representam, no entanto, apenas uma das técnicas para se analisar o fenômeno da ilha de calor. Essas observações devem ser combinadas

com as medidas fixas de temperatura. Esse cruzamento de dados contribui para a compreensão da dinâmica da ilha de calor.

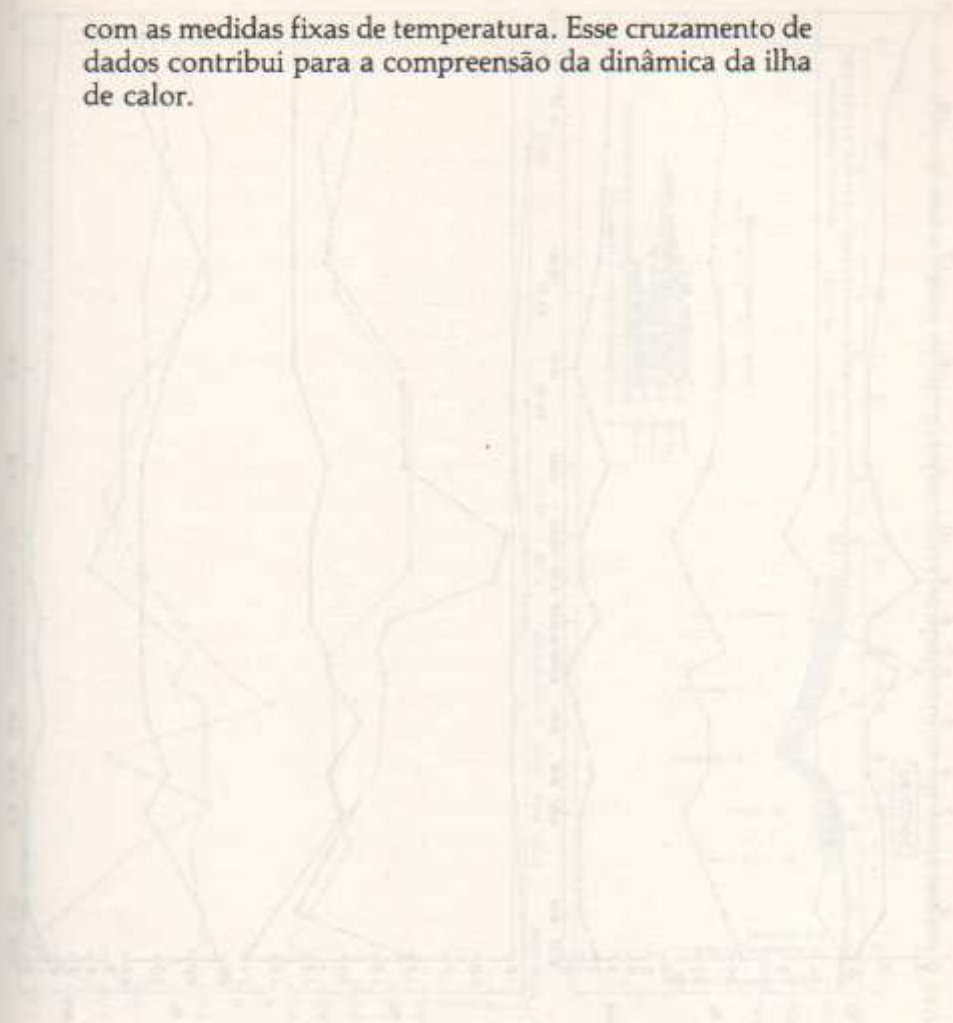
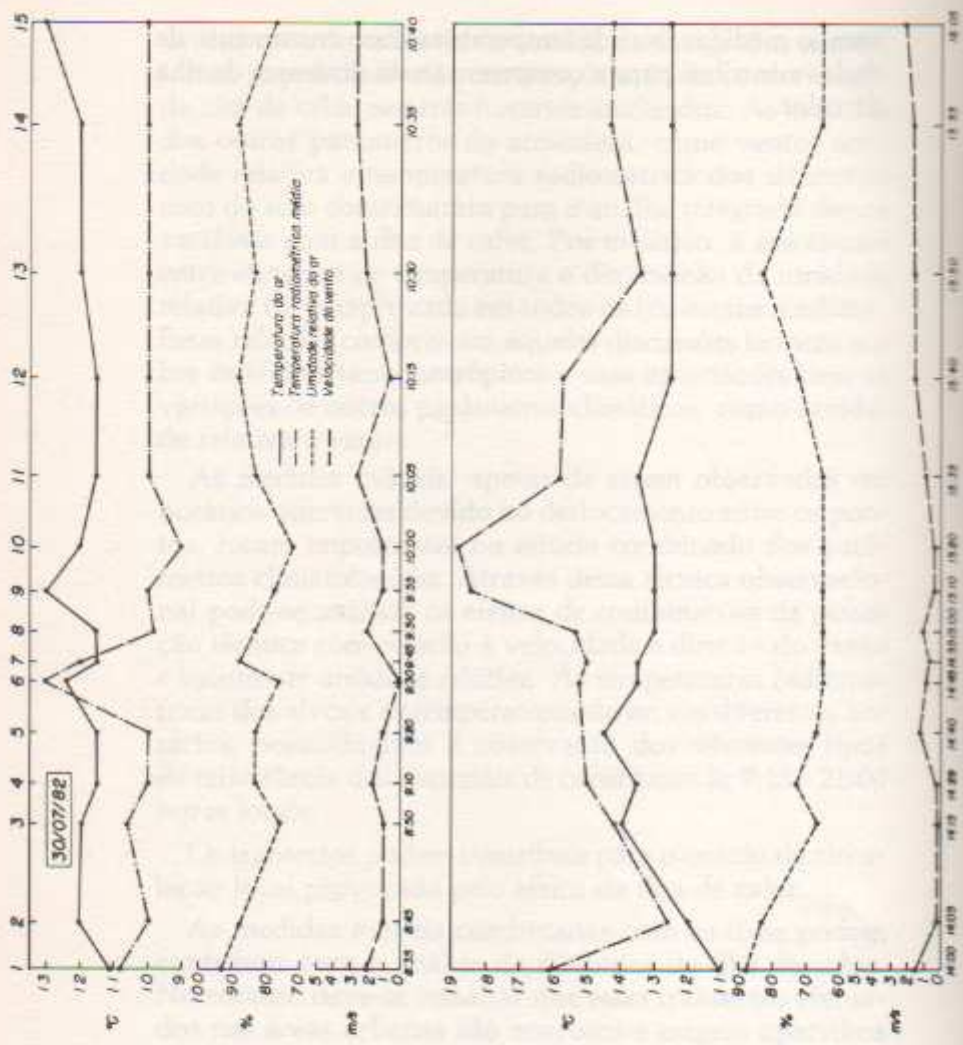


Figura 3.7. Evolução da temperatura ambiente e da temperatura da superfície da água em função do tempo.



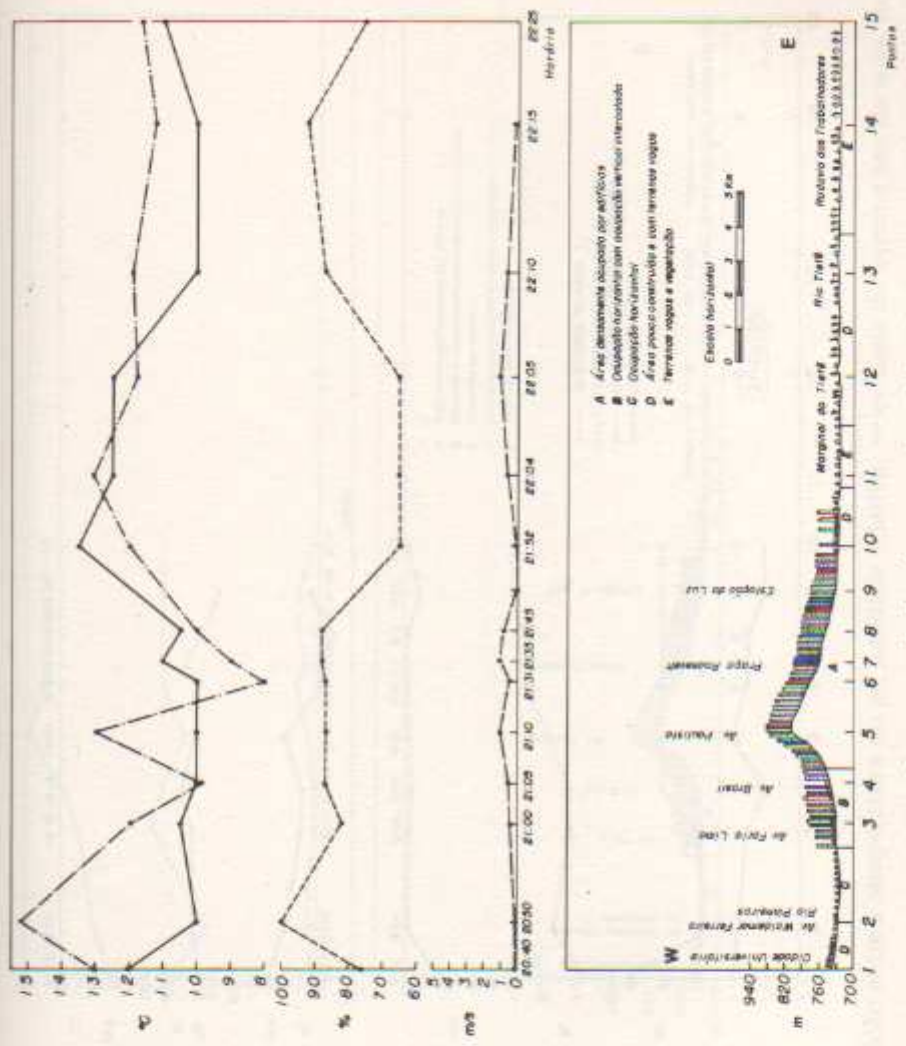
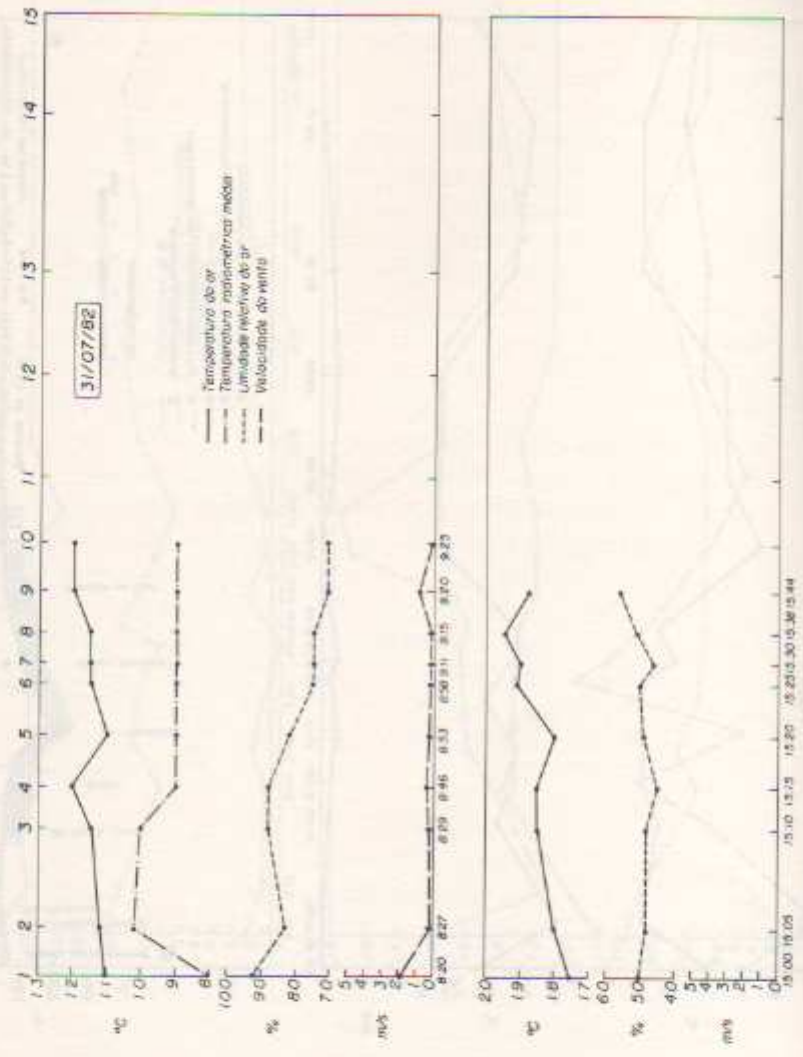


Figura 57. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 30/7/82.

STY 2011/13
 10/04/2013 10:00:00



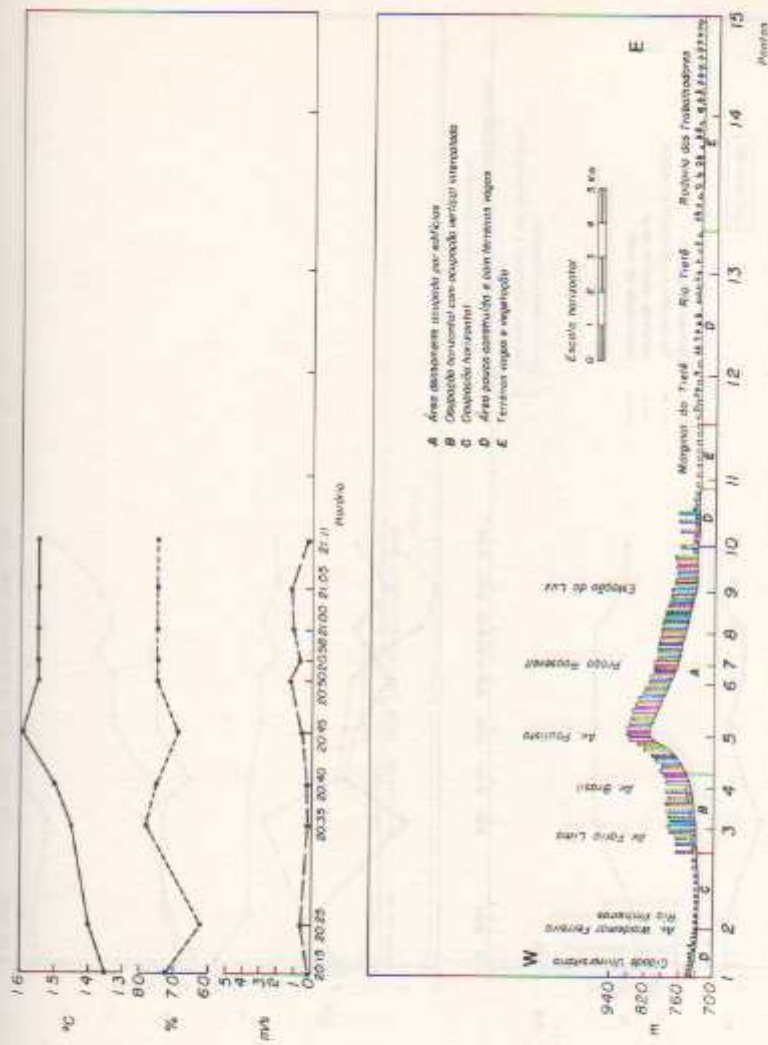
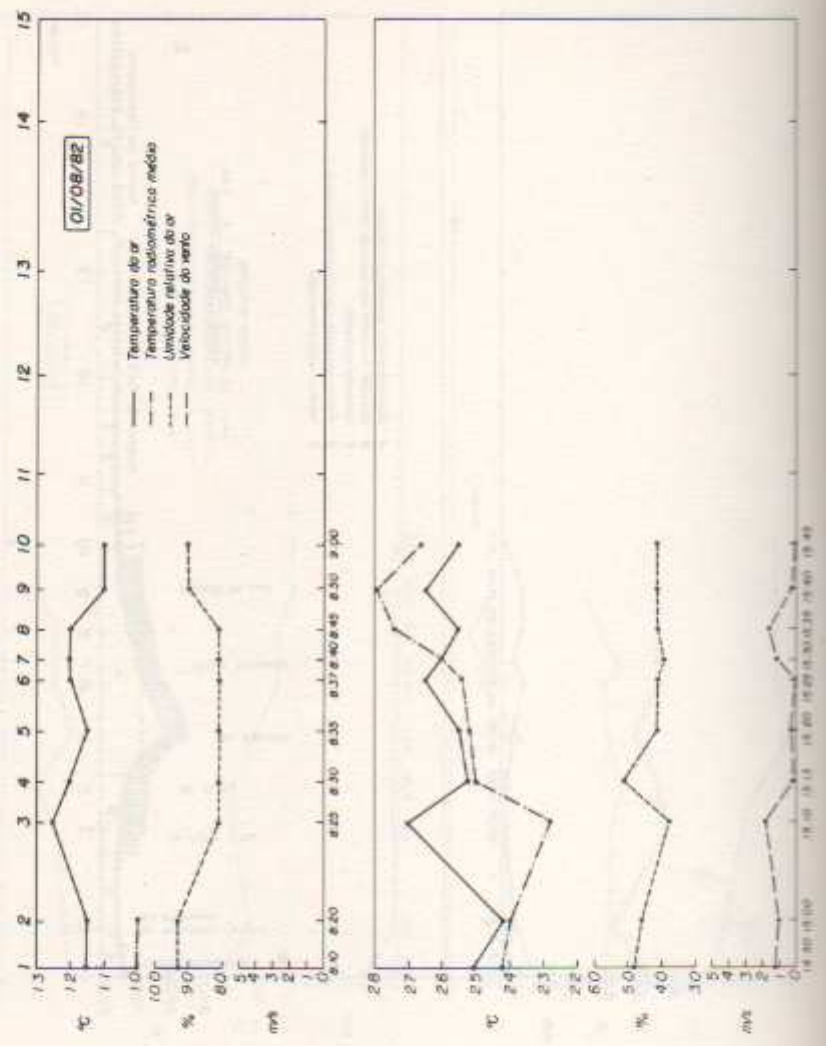


Figura 58. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 31/7/82.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA AERONAUTICA
 INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA AERONAUTICA
 INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA AERONAUTICA



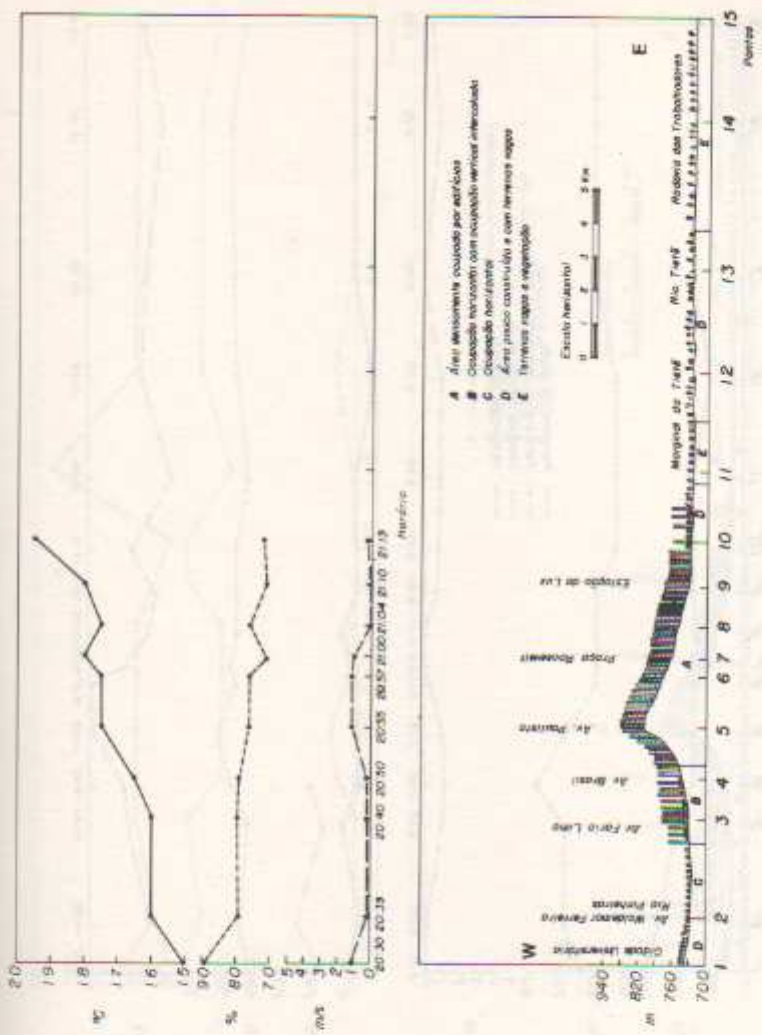
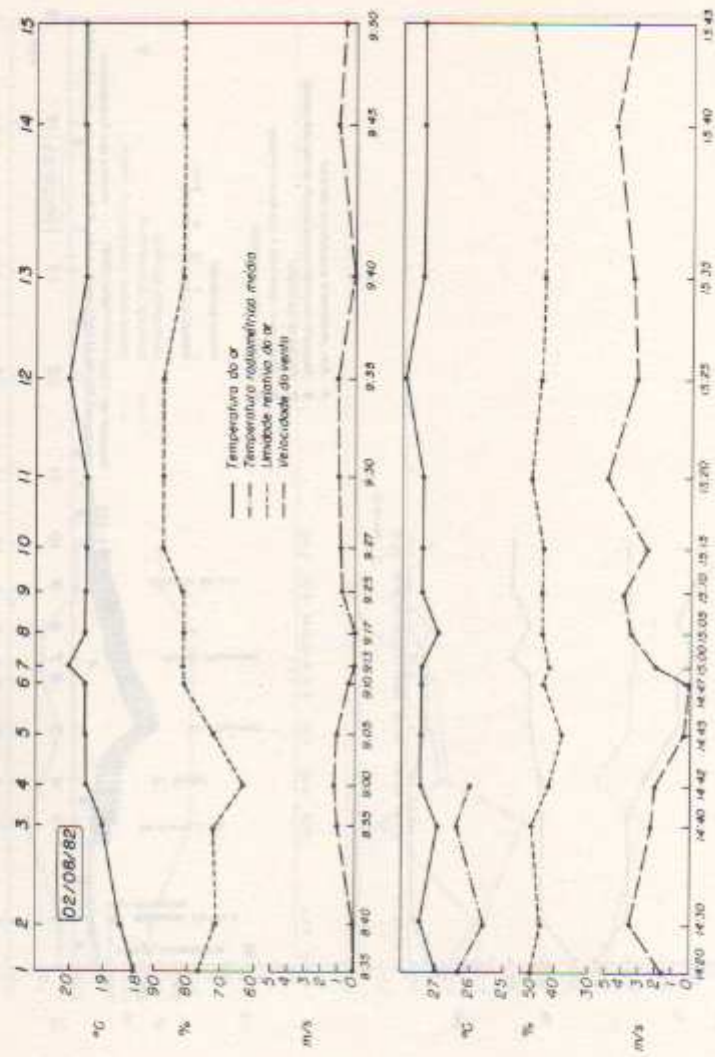


Figura 59. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 1/7/82.



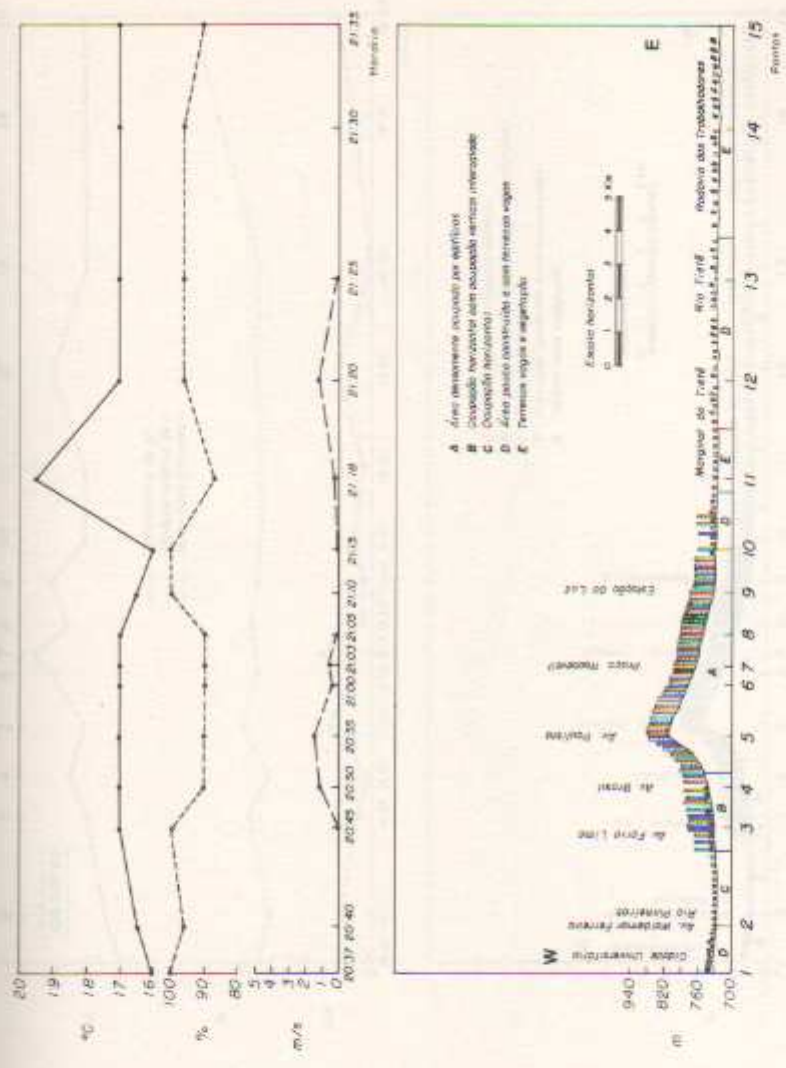


Figura 60. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 2/8/82.

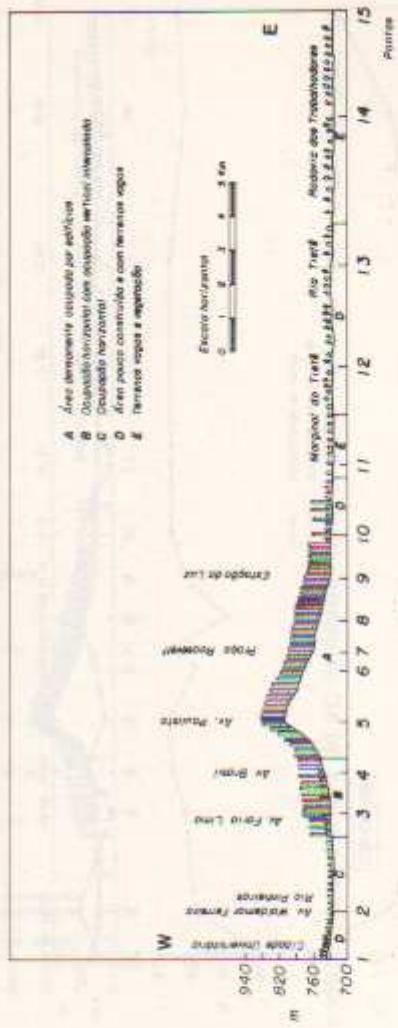
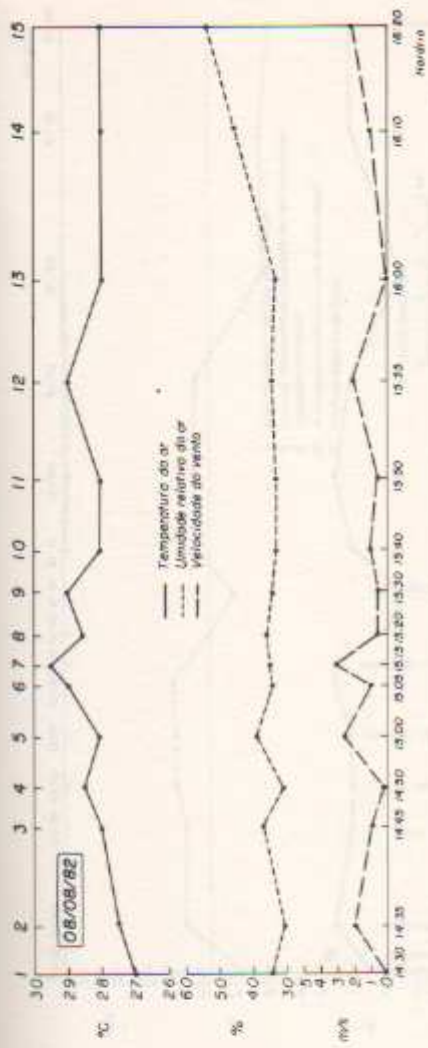
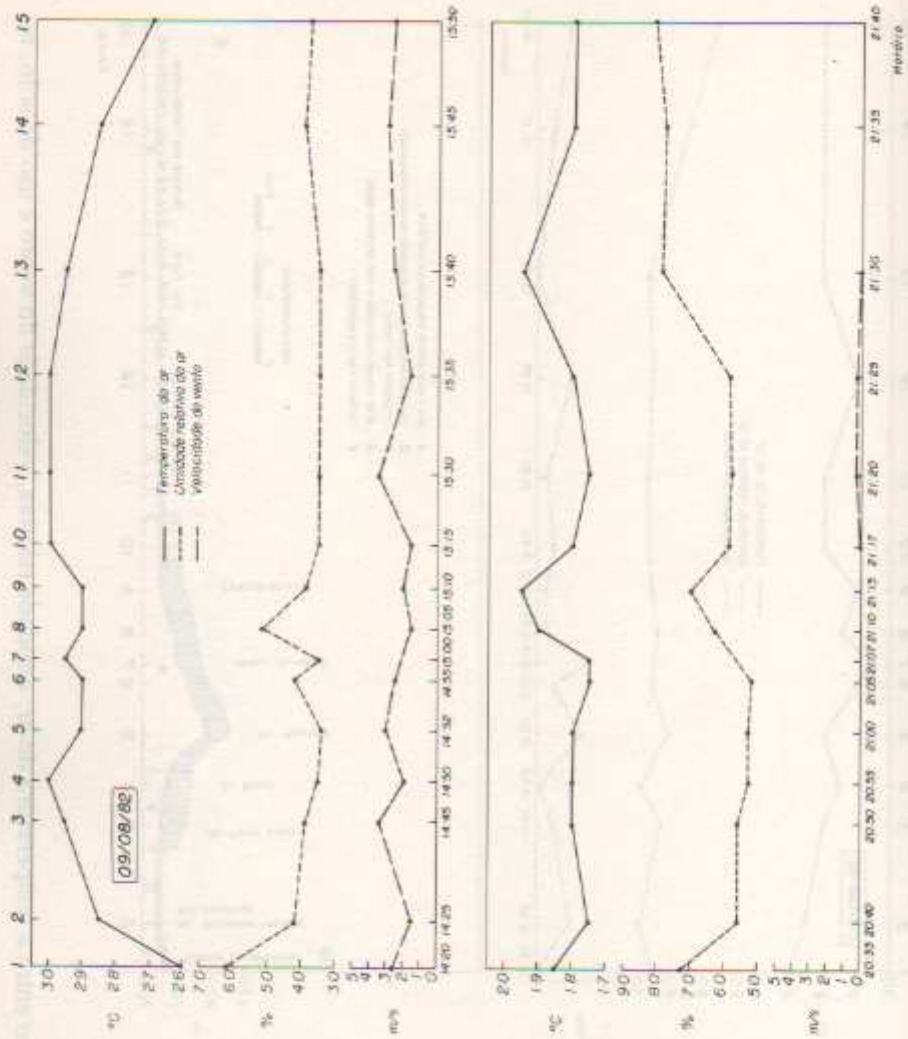


Figura 61. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 8/8/82.



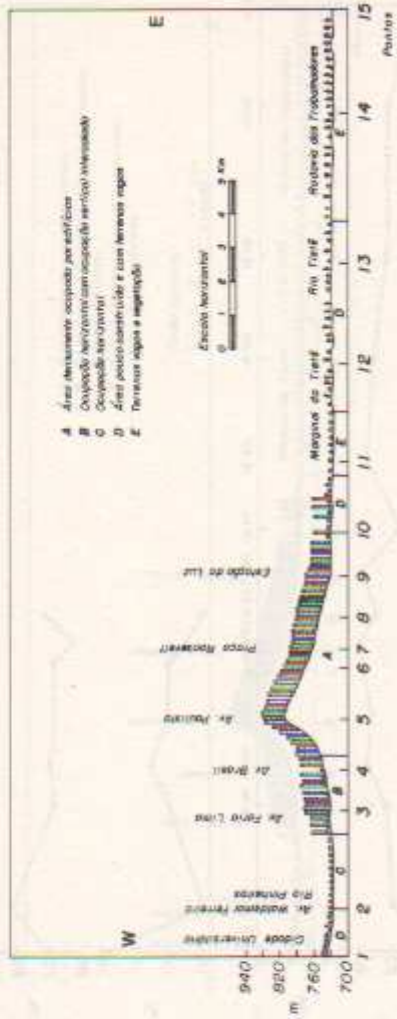
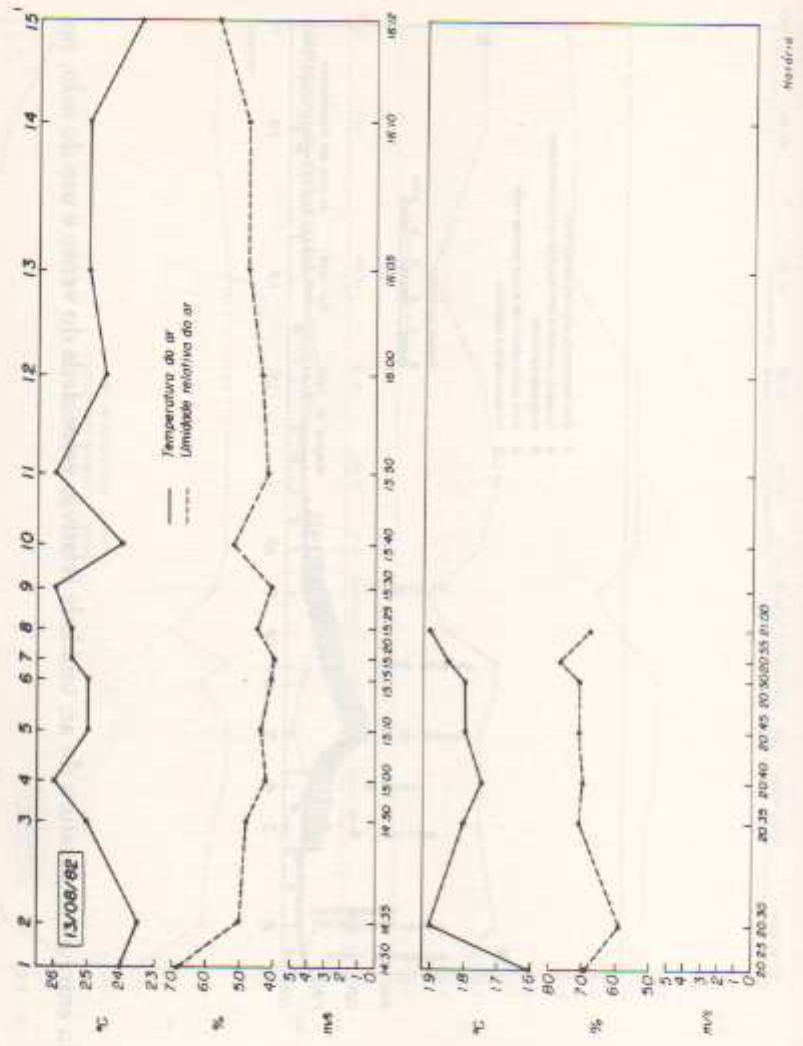


Figura 62. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 9/9/82.



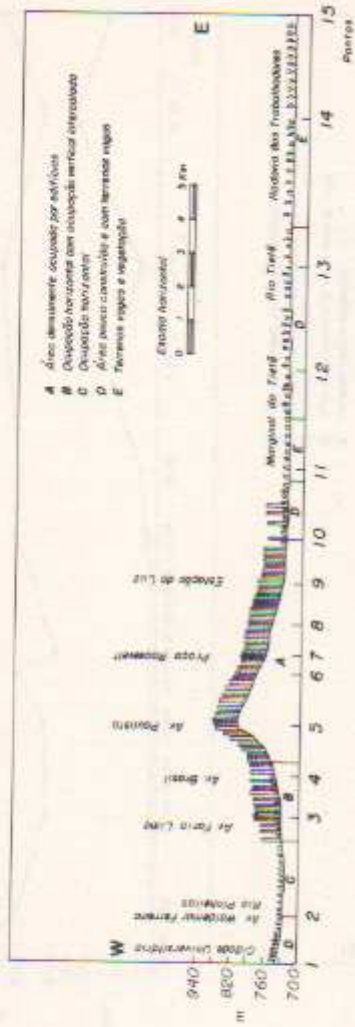


Figura 63. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 13/8/82.

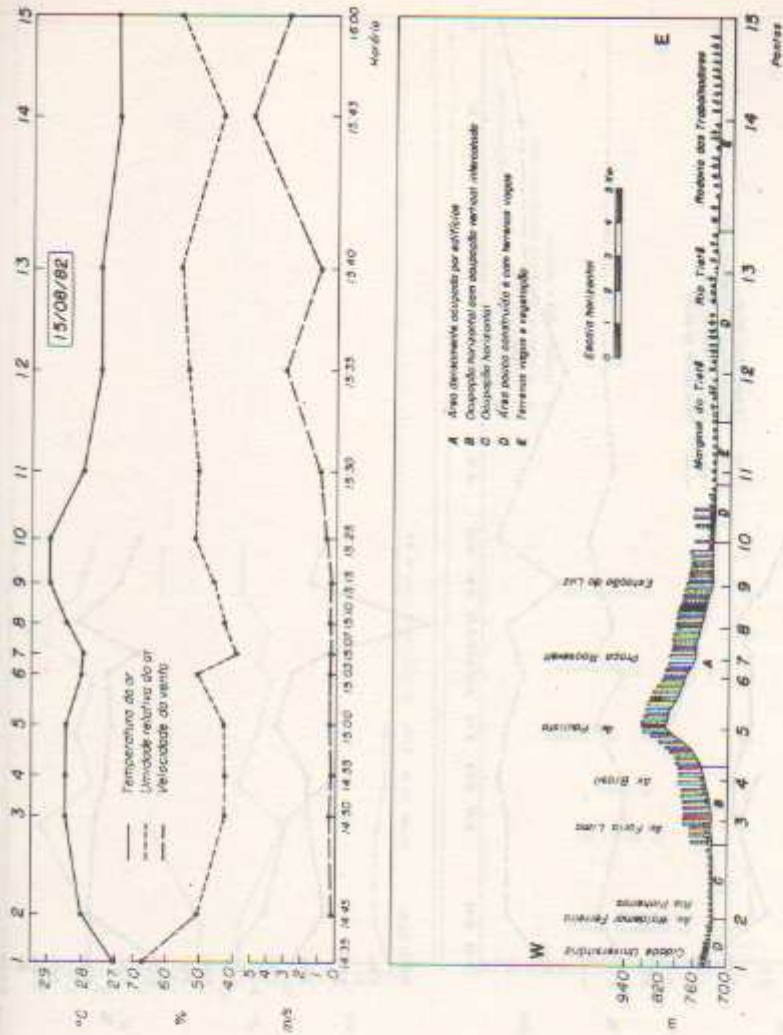
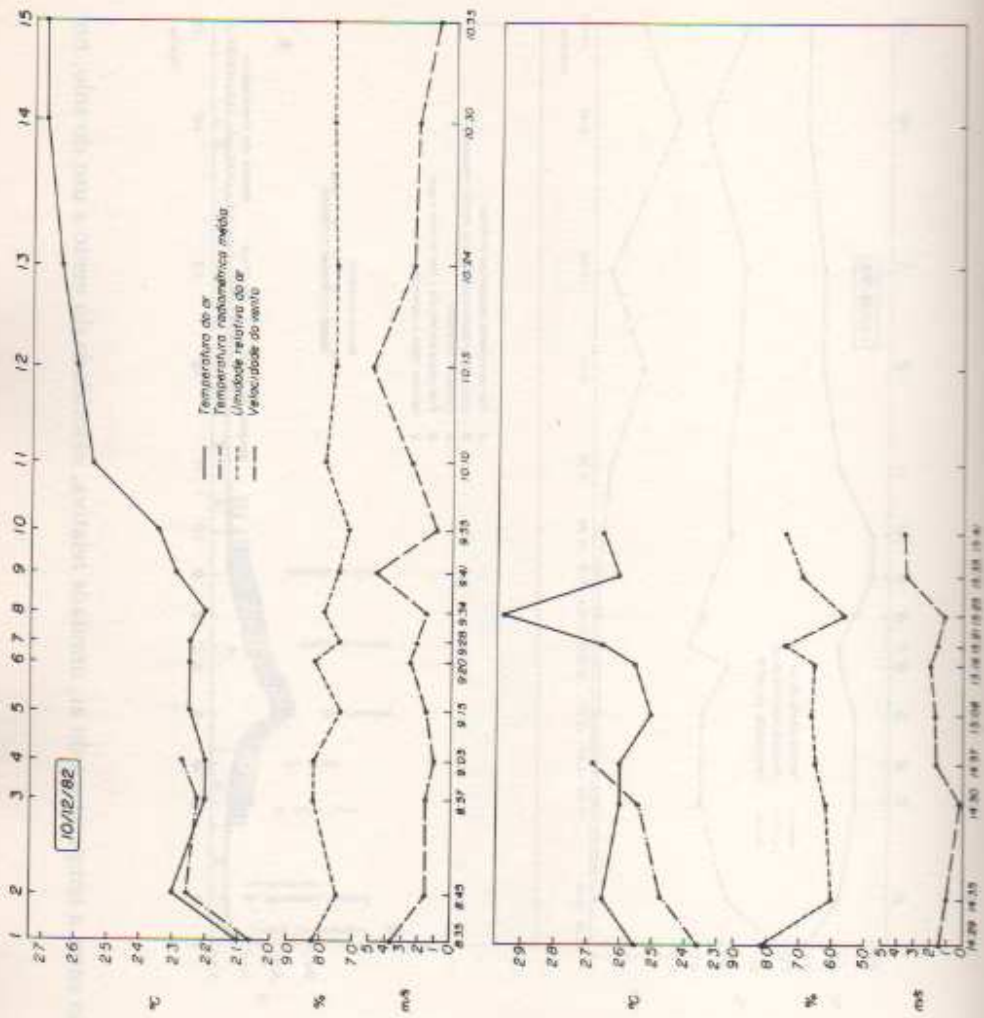


Figura 64. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 15/8/82.



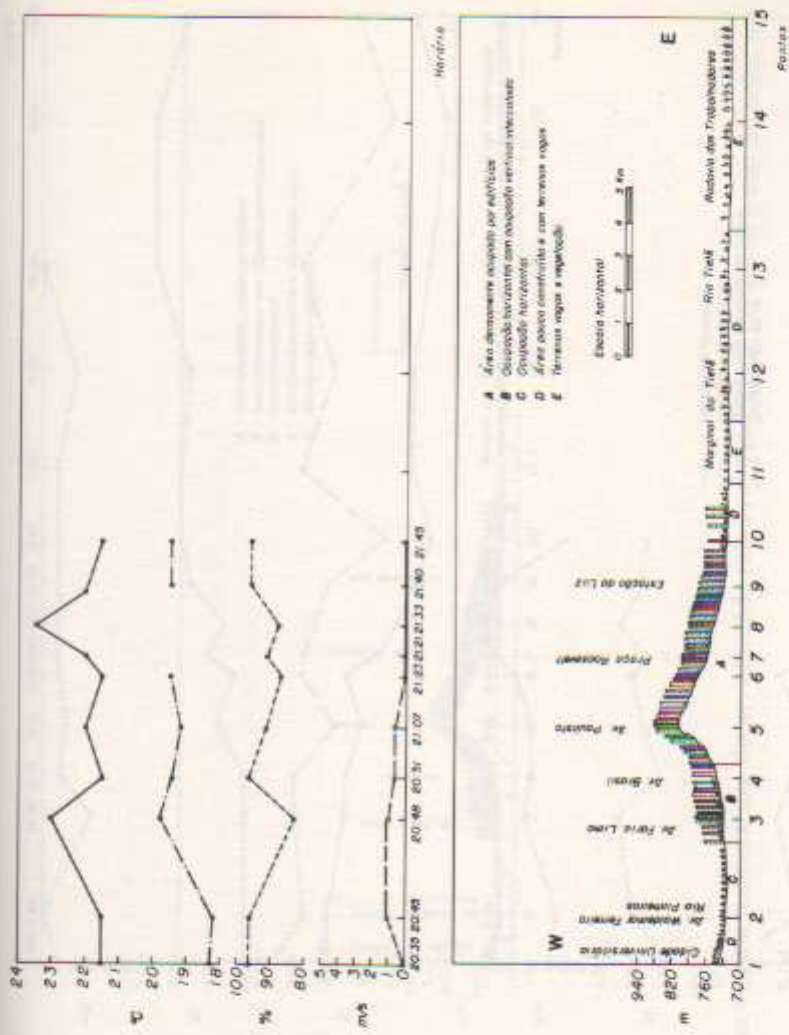
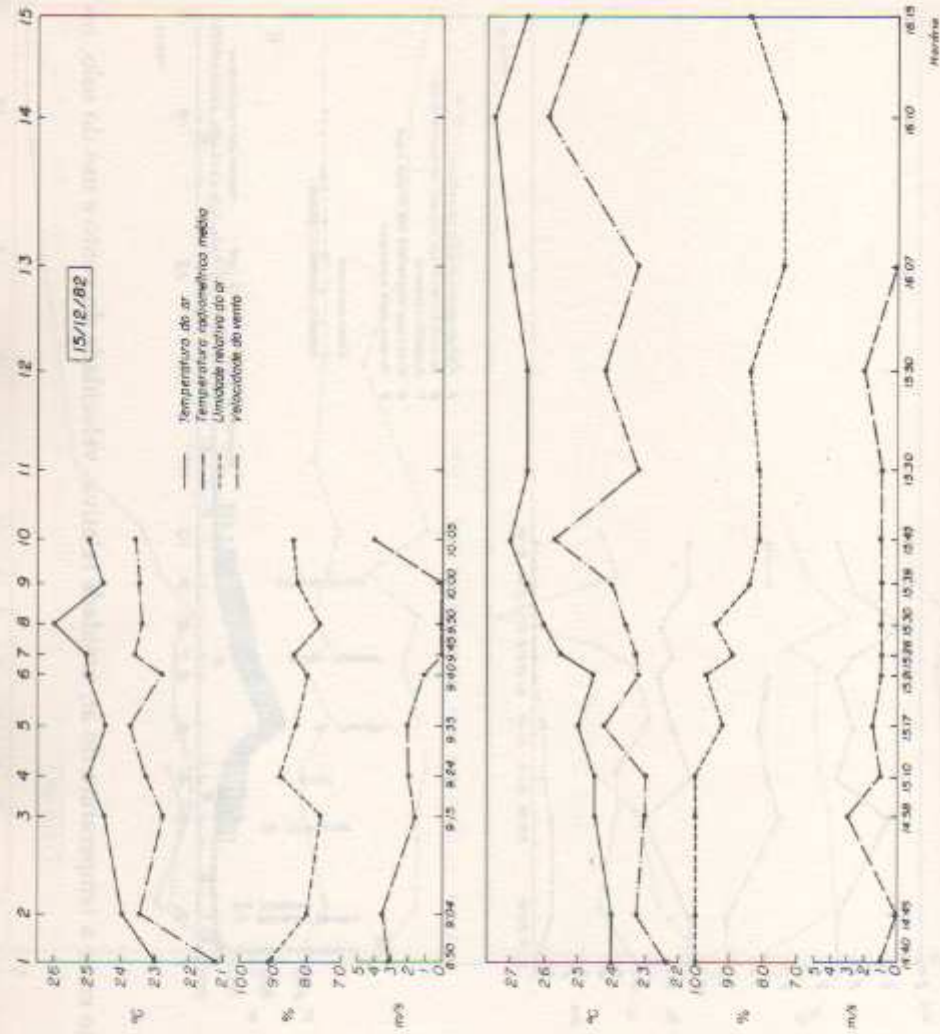


Figura 65. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 10/12/82.



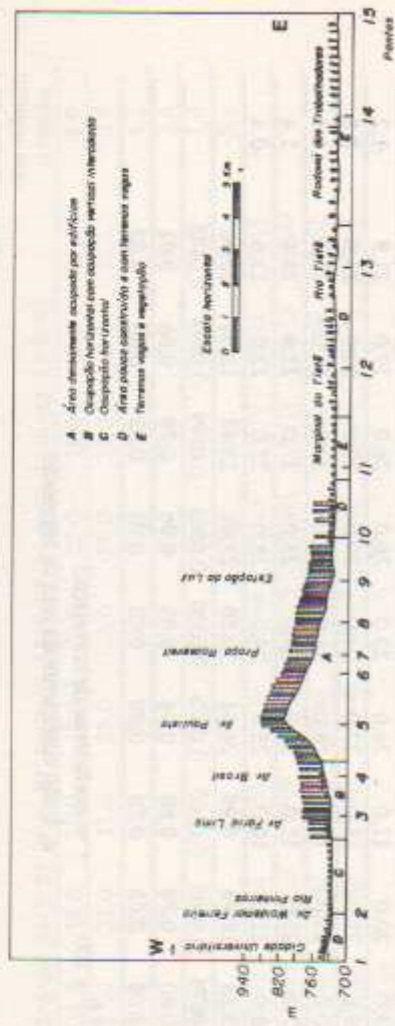


Figura 66. Relação entre a temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e uso do solo, no dia 15/12/82.

Tabela 11. Relação entre o índice da área construída e variação de temperatura na Metrópole Paulista - direção oeste-leste.

Nº	Índice de concreto	Interpretação automática de imagens termiais												Média	Desvio de T em relação a média
		21/8/80	24/2/81	26/6/81	16/7/81	13/8/82	16/9/82	17/9/82	23/9/82	23/9/82	17,0	19,9	19,9		
1	2	23,0	18,0	10,0	25,0	22,0	23,0	23,0	21,0	21,0	17,0	17,0	19,9	-3,1	
2	40	23,0	20,0	11,0	26,0	23,0	26,0	26,0	26,0	26,0	19,0	19,0	21,8	-1,2	
3	80	29,0	21,0	11,0	27,0	24,0	29,0	29,0	29,0	29,0	20,0	20,0	23,8	0,8	
4	97	30,0	25,0	12,0	28,0	26,0	29,0	29,0	30,0	30,0	24,0	24,0	25,5	2,5	
5	92	27,0	25,0	11,0	29,0	26,0	23,0	27,0	27,0	22,0	22,0	24,4	1,4		
6	14	26,0	22,0	10,0	25,0	24,0	25,0	27,0	27,0	22,0	22,0	22,6	-0,4		
<i>a</i>		23,23	18,93	9,97	24,64	22,38	23,61	23,42	18,51	20,60					
<i>b</i>		0,0574	0,0565	0,0160	0,0375	0,0330	0,0565	0,0599	0,0393	0,0443					
<i>r</i>		0,80	0,79	0,87	0,94	0,85	0,96	0,78	0,66	0,91					
<i>r</i> ²		0,64	0,62	0,76	0,89	0,72	0,92	0,62	0,43	0,83					

$$c = \frac{1+2+3+4+5+6}{+0+-1} \times 100$$

r = coeficiente de correlação
a, b são coeficiente da reta de regressão

Direção oeste-leste

Tabela 12. Relação entre o índice da área construída e variação de temperatura na Metrópole Paulista - direção norte-sul.

Nº	Índice de concreto	Interpretação automática de imagens termiais											Média	Desvio de T em relação a média	
		21/8/80	24/2/81	26/6/81	16/7/81	13/8/82	16/9/82	17/9/82	23/9/82	18,0	18,0	19,5			
7	3	24,0	18,0	10,0	21,0	22,0	22,0	21,0	21,0	21,0	21,0	18,0	18,0	19,5	-1,9
8	3	27,0	21,0	11,0	25,0	23,0	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	18,0	18,0	22,1	0,7
4	97	30,0	25,0	12,0	28,0	26,0	29,0	30,0	30,0	30,0	24,0	24,0	25,5	4,1	
9	90	26,0	24,0	12,0	27,0	24,0	23,0	29,0	29,0	29,0	22,0	22,0	24,9	2,6	
10	44	18,0	20,0	13,0	22,0	20,0	22,0	21,0	21,0	21,0	16,0	16,0	19,0	-2,3	
11	3	20,0	18,0	10,0	20,0	20,0	22,0	20,0	20,0	22,0	16,0	16,0	18,2	-3,1	
a		22,15	18,44	10,53	21,27	20,96	22,45	21,19	21,19	21,19	16,41	16,41	19,15		
b		0,0493	0,0626	0,0197	0,0628	0,0373	0,0585	0,0811	0,0633	0,0633	0,0547	0,0547			
r		0,48	0,92	0,71	0,83	0,70	0,79	0,80	0,84	0,84	0,81	0,81			
r ²		0,23	0,85	0,50	0,68	0,49	0,62	0,64	0,71	0,71	0,65	0,65			

$$r = \frac{7+8+4+9+10+11}{+0+-1} \times 100$$

r = coeficiente de correlação
a, b são coeficiente da reta de regressão

Direção norte-sul



Hoje não faz mais sentido usar o slogan "São Paulo da garoa", pois esse tipo de precipitação torna-se cada vez mais raro, devido à presença da ilha de calor que modifica as condições do ponto de orvalho.



Vista da área central da cidade, com alta densidade de ocupação vertical e freqüentes congestionamentos de trânsito: aí, a fumaça expelida pelos veículos torna o ar altamente poluído, além de elevar a temperatura, que chega a alcançar índices máximos. A diferença entre essa área e as periféricas florestadas chega a alcançar 10°C de temperatura.





Ladeira da área central da cidade, com excessiva concentração de edifícios e circulação de pedestres, o que contribui para o aparecimento de picos de ilha de calor.



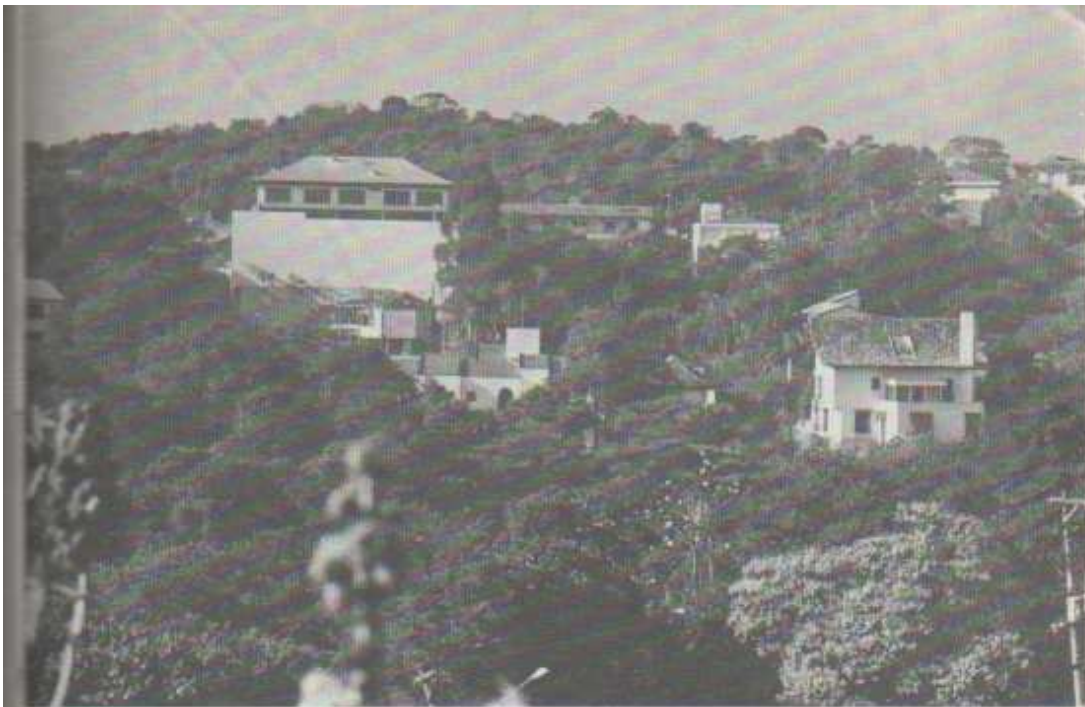
Arranha-céu do centro da cidade equipado com aparelhos de ar condicionado para fazer frente às altas temperaturas na área central da ilha de calor, o que acarreta apenas conforto térmico interno. A pouca vegetação apresenta sinais de não suportar a degradação ambiental.



A ilha de calor, associada à concentração de elementos poluentes, favorece a formação de condensação, fato que condiciona freqüentes episódios de enchentes no centro da cidade; essas enchentes são intensificadas principalmente devido ao aumento das áreas impermeabilizadas pela pavimentação das ruas e avenidas e pela concentração de construções.



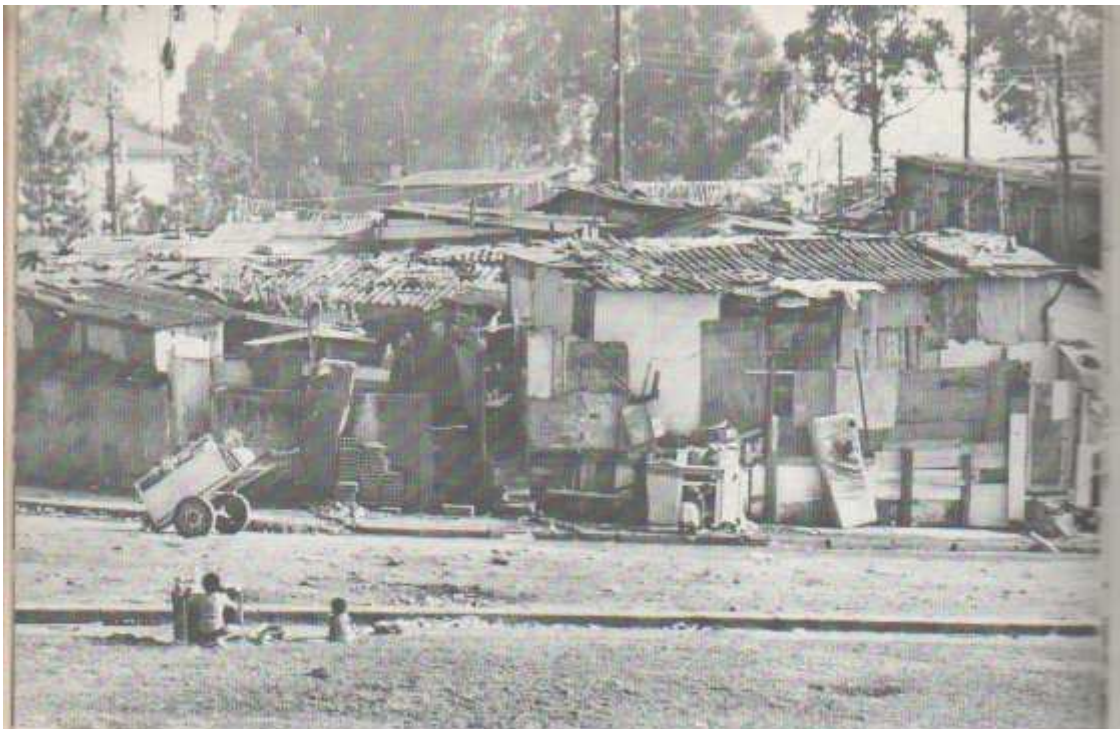
A degradação das condições ambientais da metrópole provoca o êxodo dos pássaros, dando lugar à permanência apenas de pombos, aves que se adaptam a temperaturas elevadas (poluição térmica), decorrentes de altas concentrações de concreto.



Bairro residencial do Morumbi, onde se observa rarefação de habitações em relação ao tamanho dos lotes e devido a restrições de uso do solo urbano; mantêm-se, por isso, amplos espaços ajardinados, constituindo-se esse bairro no de maior concentração de áreas verdes da Metrópole Paulistana, o que contribui para uma melhoria do conforto térmico. Entre essas áreas e outras posições centrais da metrópole observa-se diferença aproximada de 7°C de temperatura.



Residência do bairro do Morumbi, circundada por amplos jardins.



Aspecto das contradições sociais da metrópole — a favela junto ao bairro do Morumbi.

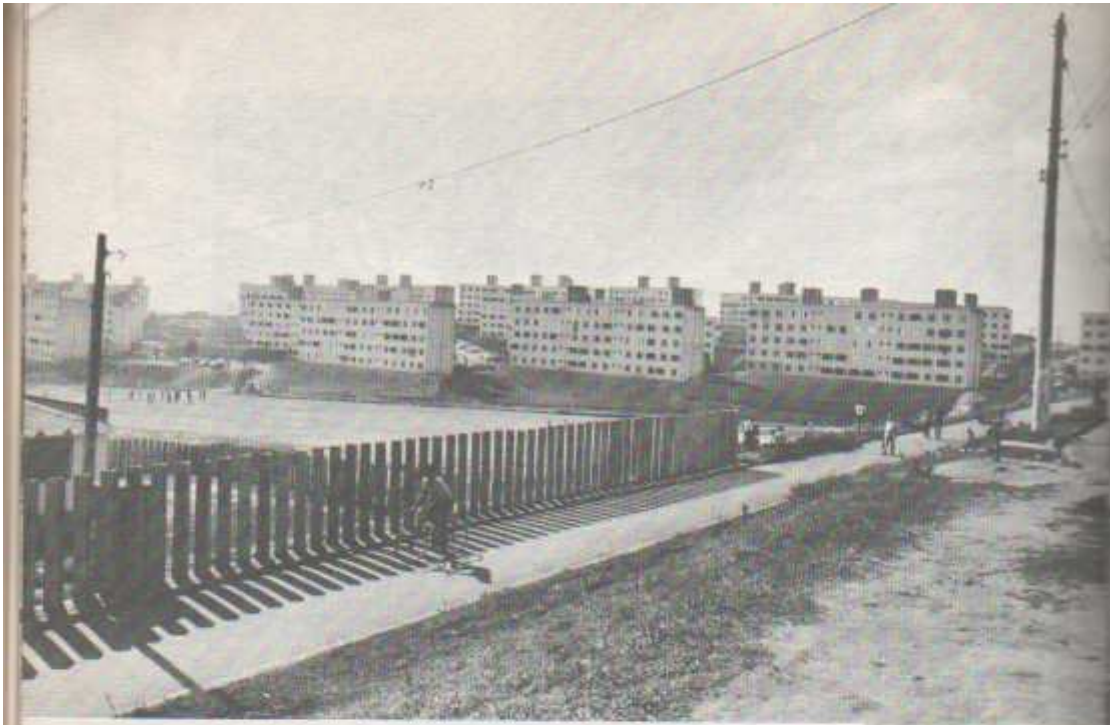
Aspecto de favela localizada nas proximidades da marginal do rio Pinheiros. Os materiais empregados em suas construções contribuem para maior emissão de calor, podendo alterar as condições climáticas microlocalizadas.





Tomadas de um dos bairros dos Jardins, a segunda melhor área residencial da metrópole, no que diz respeito ao conforto térmico; isso ocorre por conta do equilíbrio entre os espaços construídos e as áreas verdes, já definidos pela arrojada concepção urbana do loteamento, em 1929.





Conjunto residencial da periferia. A proximidade dos edifícios e a ausência total de vegetação provocam elevação da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar. Essas construções proliferam assustadoramente, comprometendo as condições ambientais da metrópole.



Aspecto parcial da periferia leste da metrópole. No primeiro plano, uma ocupação semi-rural; ao fundo, a ocupação horizontal densa e caótica contribui para o desconforto térmico.



Vista do espigão da Avenida Paulista, nas proximidades da área central. No passado representava a área nobre da cidade, com casarões luxuosos e amplos espaços verdes. Atualmente a densidade vertical da ocupação alterou radicalmente as condições microclimáticas, transformando essa região em área de relativo desconforto térmico.



Arranha-céu da Avenida Paulista, com acabamento de vidro fumê, inadequado ao clima tropical. Somando-se a esse fato a pavimentação da avenida e a ausência de vegetação, temos os elementos que alteram a temperatura e a umidade do ar, ocasionando desconforto térmico.



Vista do rio Pinheiros, em 29/6/1985, às 10:00 horas. Observa-se uma concentração de edifícios muito próximos às grandes avenidas. A ausência de vegetação nas bordas do rio contribui para o desequilíbrio do comportamento hídrico e térmico, além de emprestar aspecto agressivo à fisionomia urbana.



Zona densamente industrializada nas proximidades da marginal do rio Tietê. Os materiais empregados nas edificações e mais a ausência de vegetação contribuem para o aumento das temperaturas locais. Além disso, os amplos espaços pavimentados, que se destinam a estocagem e a estacionamento, e a presença de caldeiras, refletem a configuração das maiores ilhas de calor da metrópole.



Vista da Metrópole Paulistana tomada do alto do pico do Jaraguá em 28/6/1985, às 15 horas. No primeiro plano, vegetação arbórea ainda preservada face à altitude; no sopé, área de transição em face da expansão urbana; ao fundo, aspecto do crescimento vertical denso de áreas centrais da metrópole. Observa-se na atmosfera, na camada limite urbana, concentração de elementos poluentes associada à ilha de calor.



Vista parcial do aeroporto internacional de Cumbica, inaugurado recentemente em área completamente desaconselhada em virtude de sua localização na periferia da mancha urbana e, conseqüentemente da ilha de calor, o que favorece a concentração de nevoeiros; esse fato acarreta ausência freqüente de visibilidade, dificultando as operações de vôo.

A ILHA DE CALOR E SUAS RELAÇÕES COM AS CONDIÇÕES NATURAIS E SOCIAIS

Através da análise dos dados orbitais e terrestres para estudo da ilha de calor da Metrópole Paulistana pôde-se verificar que a sua conformação segue o modelo clássico em forma de domo, onde o maior gradiente horizontal de temperatura ocorre no centro da cidade, conforme Oke (1978). Essa forma é favorecida pelo sítio urbano caracterizado pela bacia sedimentar de São Paulo e, também, pela disposição espacial da mancha urbana que acompanha, de forma concêntrica, a disposição do relevo. A ilha de calor segue o contorno da cidade em todas as condições sinóticas onde foram obtidas as medidas, tanto no verão como no inverno. No entanto, sua configuração e sua evolução parecem ser alteradas conforme a orientação do vento.

Os levantamentos bibliográficos assinalam que as maiores variações de temperatura entre cidade e campo registraram 5°C. Entretanto, a intensidade do fenômeno ocorrido em São Paulo ultrapassa, de muito, essas medidas, chegando a ocorrer um gradiente de temperatura horizontal superior a 10°C entre o centro e a área rural. Esta maior intensidade foi verificada em tipo de tempo estável, com calmaria. A intensidade da ilha de calor da Metrópole Paulistana parece refletir a grande dimensão espacial da mancha urbanizada, como também a distribuição dos diferentes tipos de usos do solo.

Pode-se afirmar, também, considerando-se os índices de poluentes, que os seus mais altos valores de concentração ocorrem nos locais onde aparecem as mais elevadas temperaturas, principalmente quando predomina a estabilidade de tempo meteorológico, com Anticiclone Tropical Atlântico, associado à inversão térmica e calmaria. Os mais elevados índices de poluição verificados na análise de campo, nos dias das passagens do satélite, confirmam, em termos espaciais, uma alta relação entre ilha de calor e concentração de poluentes. Em situações sinóticas favoráveis à maior extensão do calor antrópico é, também, onde ocorrem os maiores índices de materiais particulados concentrados na mancha urbana. Essas anomalias acentuadas são mais presentes na situação de inverno, com predomínio de estabilidade como foi comprovado pelos dados de campo. Quando esses contrastes são maiores, há uma diminuição da umidade relativa no contexto da área urbanizada. Quanto maior é o gradiente térmico entre o campo e a cidade, maior é o declínio da umidade relativa, como mostram os dados dos transectos analisados.

Essas configurações de anomalia, associadas às ações sinóticas e intensidade de urbanização, são dinâmicas tanto ao nível diário e semanal como sazonal.

Em regra geral, a maior evidência da ilha de calor ocorre a partir das 15:00 horas e continua com grande expressão até às 21:00 horas. No decorrer da madrugada, o equilíbrio do balanço de radiação, associado à baixa atividade urbana, faz com que haja a diminuição do fenômeno, como já foi observado em imagens de satélite na faixa do infravermelho.

Em todos os dados observados, é importante notar que a interferência antropogênica gerada pela intensa atividade urbana diminui as anomalias climáticas no fim de semana, incluindo os efeitos de ilha de calor, poluição e precipitação. Essa observação foi feita primeiramente por Ashworth (1929), na cidade industrial de Rochdale onde

a precipitação aumentou 14% em três décadas, mas a precipitação aos domingos era 13% menor que dias úteis (154 mm contra 177 mm no intervalo de 1918-1927). Outros também destacaram o mesmo fenômeno; Mitchell (1961) notou em New Haven, Connecticut (E.U.A.), que aos domingos, em quatro invernos, a cidade ficou 0,3°C mais quente, embora, em dias úteis, o contraste cidade-aeroporto tenha variado 0,6°C para temperaturas médias diárias. Quanto à poluição, essas observações são também evidentes, onde se verifica um declínio da poluição tanto no tempo, como na distribuição espacial, aos domingos. Esse fato é significativo, pois enfatiza a forte atuação da atividade urbana nos efeitos da atmosfera, o que também pudemos confirmar em nossa pesquisa de campo, na área da Grande São Paulo. Sazonalmente, pôde-se verificar que a ilha de calor e a poluição aparecem bem relacionadas na situação de inverno. Numa análise espacial verifica-se que os maiores índices de poluição e de temperatura ocorrem no centro da cidade, bairros operários da zona leste e norte, bairros industriais, do ABCD, zona leste e marginal do rio Tietê.

No verão, a ilha de calor é também associada à distorção no campo de precipitação da cidade. Em consequência dessas anomalias, ocasionadas pela ação antrópica no espaço urbano, os maiores problemas de enchentes ocorrem justamente nas áreas com alto grau de impermeabilidade do terreno. O que coincide com os maiores picos da ilha de calor e de intensidade de chuvas. A provável influência da Metrópole Paulistana, associada ao efeito da ilha de calor, combinados à situação sinótica favorável, possibilita o desenvolvimento e intensificação de convecção na região. No verão, as situações freqüentes de instabilidade meteorológica, associadas à ilha de calor, possibilitariam o aumento do campo de precipitação na mancha urbana. Tal aumento está associado à formação e movimentação das tormentas que ocorrem após às 15:00 horas, como foi verificado na análise de verão, com as

chuvas convectivas de maior efeito local.

Gomes (1984) analisou a distribuição espacial e temporal da precipitação sobre a bacia hidrográfica do alto Tietê, onde está incluída a região metropolitana da Grande São Paulo. A autora destaca que no dia 18 de dezembro de 1977 ocorreu um único evento de precipitação observado na região, que excedeu em apenas um caso ao valor médio mais um desvio-padrão.

A evolução temporal e espacial localizou-se na mancha urbana e teve início às 15:00 horas. A evolução temporal e espacial do evento foi mais intensa no contexto da área urbanizada. Os campos médios de máxima precipitação ocorrem no centro urbano da região metropolitana de São Paulo e próximos à região do divisor da serra da Cantareira.

Entre os muitos estudos que tiveram como resultado núcleos de máximas precipitações sobre a área urbana, destacam-se Chagnon (1969), Harnack e Landsberg (1975) e Chagnon et alii (1971). Entretanto, mais recentemente, Yonetani (1983) simulou um modelo numérico de nuvens com uma ilha de calor circular, cujo gradiente térmico seria de 2°C. Os resultados gerados pelo modelo comprovam que a existência da ilha de calor é suficiente para desencadear a formação de precipitação. No caso da ilha de calor de São Paulo, essa anomalia térmica possivelmente contribui para a maior intensidade no campo de precipitação.

Numa escala sub-regional ou local, a modificação do clima pelo homem exerce uma influência mais qualitativa que quantitativa, aspecto salientado por Endlicher (1981). Nesse contexto, devem-se fazer estudos mais integrados e multidisciplinares sobre esses efeitos não só na atmosfera, como também de sua influência na qualidade de vida do homem urbano.

Como resultado, verificou-se que as temperaturas mais elevadas estão associadas a áreas de maior concentração de edifícios e de indústrias, e as mais baixas a bairros com

maior concentração de áreas verdes, como é o caso dos bairros residenciais, parques e serra da Cantareira, onde as mais baixas temperaturas se associam à concentração de vegetação e às condições topográficas. É no inverno que ocorrem os maiores contrastes térmicos. A maior incidência de inversão e a maior concentração de poluentes contribuem para aumentar o contraste térmico cidade/campo. Os mais baixos valores de umidade relativa foram registrados também no inverno e na área de máxima temperatura da ilha de calor, confirmando a conclusão de diversos autores, como Eriksen (1978) e Jáuregui (1979).

A complexidade inerente ao estudo do processo do fenômeno ilha de calor da Metrópole Paulistana exigiu um grande intervalo de escalas espaciais e temporais. Também levou-se em consideração os aspectos específicos da cidade e sua integração com a dinâmica atmosférica.

Em todas as situações sinóticas analisadas, a ilha de calor de São Paulo coincide, na sua conformação, com a análise teórica proposta por Oke (1978), onde este fenômeno é mais notável no centro da cidade, a sotavento, e segue o seu contorno. A intensidade maior da temperatura na cidade ocorre na concentração de área construída. Em parques ou reservatórios, as temperaturas são menores, enquanto áreas industriais, conjuntos residenciais com alto índice de concentração de concreto, áreas comerciais ou áreas centrais expressam valores de temperatura mais elevada. Daí a necessidade de se desenvolver técnicas de análise do uso do solo urbano compatíveis com o objetivo do estudo, isto é, relacionar as variações da temperatura horizontal da cidade com o uso do solo urbano (Tabelas 11 e 12).

Utilizando-se de várias escalas de abordagem, desde o trabalho de campo até imagens de satélites para o estudo do uso do solo, pode-se analisar variações de temperatura em suas relações com os padrões de uso do solo urbano.

Dessa maneira, os dados encontrados comprovam a existência de uma alta correlação entre os tipos de uso do

solo urbano e a variação da temperatura do ar. Assim, as altas temperaturas são verificadas em áreas com crescimento vertical intenso e pouca quantidade de verde, principalmente nos espaços residenciais e industriais densamente ocupados. Em contrapartida, nas regiões com maior concentração de espaços livres, com vegetação e nas proximidades ou junto aos reservatórios d'água, as temperaturas sofrem declínios acentuados. Nestes lugares, o conforto térmico é evidenciado, principalmente em áreas de parques, como, por exemplo, o Parque do Estado e em espaços urbanos como os jardins, bairros residenciais onde a presença de áreas verdes atinge mais de 10% da área total ocupada.

Portanto, a relação estreita entre ocupação do solo urbano e ilha de calor, com suas variações espaciais, comprova a necessidade urgente de um replanejamento do uso do solo, com a implantação de espaços verdes intersticiais na mancha urbana de São Paulo, fundamentais para a melhoria do conforto térmico e, conseqüentemente, da qualidade de vida dos habitantes.

Na Grande São Paulo, o acesso às áreas verdes é basicamente desfrutado pelas classes privilegiadas, enquanto para as outras parcelas da população, principalmente as mais carentes, o acesso aos ambientes de parques e jardins torna-se cada vez mais difícil.

Ao mesmo tempo, julgamos fundamental a adequação de uma legislação eficiente, baseada em pesquisa, para controle do crescimento urbano-metropolitano, considerando-se a proporção mínima de área verde em relação à quantidade de concentração de concreto, conforme pode ser analisado nas Tabelas 11 e 12. Com o constante e incontrolado aumento da área construída, a variação térmica aumenta e a necessidade de se interpor áreas verdes de dissipação se torna mais premente.

É necessário, pensando na expansão urbana futura da metrópole, que se adote uma legislação de uso do solo onde haja reserva de espaços verdes intersticiais nos bair-

ros periféricos que se forem implantando. Concomitantemente a essas mudanças no planejamento de áreas verdes, ter-se-ia que desenvolver todo um trabalho de educação de base junto à população. Cavalheiro (1981), salienta que "a utilização econômica de espaços livres públicos, como a agricultura e fruticultura, não é feita nas regiões metropolitanas brasileiras, notando-se, pelo contrário, uma expulsão desses usos. As grandes cidades, segundo a concepção brasileira, elaboram produtos industriais ou são centros comerciais importantes e, assim, de forma alguma devem produzir agricultura". Essa concepção reflete-se em todas as esferas e só assim, talvez, possa-se explicar porque a idéia alemã, conhecida em quase toda a Europa, dos Kleingarten (área de aproximadamente 350 m² concebida para o lazer de fim-de-semana e de uso importante para o abastecimento da família com frutas e verduras), foi tão prontamente rechaçada por quase todos os planejadores de espaços livres, por nós entrevistados no Brasil.

Na organização de áreas verdes em diferentes bairros, deve-se levar em consideração as aspirações dos habitantes. Nos bairros em que dominam as classes privilegiadas, o verde desempenha uma função mais ornamental e de valorização do solo. Já nos bairros onde mora a população mais carente, os espaços livres deveriam ser projetados e organizados tendo em vista o oferecimento de opções de lazer ativo.

Portanto, há uma necessidade crescente de elevar a proporção de áreas verdes nos interstícios da mancha urbana, principalmente nos bairros onde esse tipo de ocupação esteja mais ausente, para amenizar a variação de temperatura na cidade. A maior quantidade de vegetação implica a mudança do balanço de energia, devido à necessidade de as plantas absorverem o calor em função do processo de transpiração e fotossíntese.

Por outro lado, também é necessário relacionar a intensidade da ilha de calor com os dados de densidade de

mográfica. Comparando-se esses fatos, pode-se concluir que os altos valores de temperatura estão relacionados às mais altas densidades de população, onde se encontram mais de trezentos habitantes por hectare. Por sua vez, as altas densidades populacionais ocorrem justamente nos bairros residenciais das classes menos favorecidas (bairros operários). A ilha de calor, portanto, é também uma expressão da associação de aspectos naturais e sociais que ocorrem no espaço ocupado pela cidade. Os maiores valores de temperatura encontram-se, de certa forma, associados às maiores pressões produzidas economicamente sobre o meio ambiente.

A ILHA DE CALOR: REALIDADE PERMANENTE?

A análise do fenômeno *ilha de calor* reflete a complexidade do estudo integrado das condições sócio-econômicas e naturais da cidade. A análise dessas condições na Metrópole Paulistana parece significativa para o estudo, uma vez que as características peculiares da organização urbana de São Paulo, associadas aos efeitos de circulação atmosférica local, contribuíram como subsídio à compreensão do comportamento climático, em áreas intensamente urbanizadas das regiões tropicais.

A configuração da ilha de calor de São Paulo identifica-se com o modelo clássico concebido por Oke (1978), onde as maiores temperaturas ocorrem no centro comercial, sendo que um grande declínio aparece no limite rural-urbano.

O fenômeno foi estudado dinamicamente ao nível temporal e espacial. As maiores variações do gradiente horizontal de temperatura ocorreram durante a tarde, intensificando-se até o período noturno. Entretanto, a análise de algumas imagens termais de satélites confirmam que, durante a madrugada, a ilha de calor tende a diminuir, coincidindo com o declínio da atividade urbana, associada às diferenças no balanço de radiação. É importante ressaltar que aos domingos a intensidade da ilha de calor, bem como a concentração de poluentes, diminuem em São

Paulo, independente das condições sinóticas predominantes, o que vem confirmar o grau de significância da atividade urbana no processo de alteração climática.

Pode-se concluir que as situações sinóticas favoráveis à concentração de poluentes também contribuem para intensificar o gradiente horizontal de temperatura em São Paulo. Nessas situações, com a presença do Anticiclone Polar aquecido e do Anticiclone Tropical Atlântico, o gradiente térmico da ilha de calor atinge mais de 10°C. A situação de subsidência, inversão térmica, calmaria, umidade relativa baixa e névoa seca são evidências que indicam condições altamente propícias à formação da ilha de calor e concentração de poluentes.

No verão, com a intensificação de situações de instabilidade atmosférica, ocorre uma diminuição do gradiente de temperatura horizontal. No entanto, constatamos que a média de variação de temperatura entre a zona rural e o centro da cidade alcançou 4°C. Nessa época do ano, é mais evidenciada a anomalia da precipitação que, possivelmente, associa-se às anomalias de temperatura da mancha urbana. O ar quente ascendente e o aumento dos núcleos de condensação, devido ao acúmulo de poluentes, podem provocar um aumento de precipitação. Coincidentemente, as enchentes de grande magnitude ocorrem justamente nas áreas de maior intensidade da ilha de calor.

Especialmente, a ilha de calor acompanha a conformidade da mancha urbana. Entretanto, de acordo com a direção e velocidade do vento, sua maior expressão pode ocorrer no sentido leste-oeste ou norte-sul. A interferência da penetração da brisa marítima sobre São Paulo, principalmente à tarde, altera a configuração e o formato do fenômeno nas áreas sul e sudeste da metrópole.

Em São Paulo, os maiores gradientes de temperatura aparecem no centro da cidade, em áreas industriais e bairros operários com alto coeficiente de ocupação dos lotes. Constatou-se, através das imagens termais de satélites,

elevados índices de temperatura no centro da Metrópole Paulistana, que coincidem com os verificados em Cubatão, cidade tipicamente industrial, localizada na baixada Santista. No interior da mancha urbana de São Paulo, é no Parque do Estado e nas proximidades dos reservatórios d'água da Billings e de Guarapiranga que ocorreram as temperaturas mais baixas. A serra da Cantareira, situada na periferia dessa mancha, apresentou-se com temperaturas mais baixas em todas as condições sinóticas estudadas.

Deve-se ressaltar que o gradiente térmico horizontal da Metrópole Paulistana, em condições de atmosfera estável, registra as maiores variações de temperatura. A intensidade do gradiente térmico da ilha de calor supera os 10°C , ultrapassando muito as medidas realizadas em cidades de clima temperado, com variação em torno de 5°C .

Nessas situações, onde a ilha de calor atinge o seu mais alto grau de intensidade, notou-se variação mais intensa de temperatura em determinados padrões de uso do solo urbano.

Através da análise da relação entre variação de temperatura e índices de área construída, pode-se verificar coeficientes de correlação acima de 0,80, evidenciando que o fenômeno da ilha de calor tem menor intensidade em áreas com índices elevados de vegetação arbórea. Nesse contexto urbano, o impacto negativo sobre o meio ambiente e as possibilidades de recuperação do espaço exigem considerações, tanto ao nível quantitativo como ao qualitativo.

A ilha de calor de São Paulo está associada aos contrastes climáticos que ocorrem na mancha urbana. No inverno, ressalta-se mais a associação entre ilha de calor e altos índices de poluição, assim como abaixamento da umidade relativa do ar, o que se traduz num estado de desconforto térmico urbano. No verão, a ilha de calor está mais associada às perturbações de instabilidade localizadas na mancha urbana. A intensificação da precipita-

ção, principalmente no período da tarde, provoca, em algumas situações, enchentes nas áreas intensamente impermeabilizadas da área urbana.

Tudo indica, também, que a ilha de calor concorre para fazer diminuir a incidência de garoa na área central, em virtude dos baixos valores de umidade relativa que distanciam o ponto de orvalho.

A urbanização desordenada da Metrópole Paulistana parece causar problemas de ordem ecológica: o desequilíbrio crescente entre o número de habitantes e o equipamento urbano leva à deterioração da qualidade ambiental urbana. A natureza humanizada através das modificações do ambiente alcança maior expressão no espaço ocupado pelas cidades, criando um ambiente artificial. Devido à posição geográfica, às condições de sítio urbano e às peculiaridades de uma metrópole localizada nos trópicos, a ilha de calor de São Paulo produz concretamente o desconforto térmico urbano, principalmente em condições de estabilidade atmosférica.

A utilização de dados de sensoriamento remoto constituiu-se na técnica fundamental para a execução do trabalho. Na análise do uso do solo urbano, desenvolveu-se uma metodologia compatível com as várias escalas de abordagem, utilizando-se de sensores ao nível de aeronave e orbital. As estratégias adotadas, tanto em relação à interpretação visual como automática, foram adequadas e compatibilizadas com os padrões de uso do solo urbano, ajustados ao estudo da ilha de calor.

O algoritmo desenvolvido no tratamento de imagens termais foi fundamental no estudo temporal e espacial da ilha de calor. Com uma confiabilidade acima de 0,94 entre os dados obtidos com imagens termais e os da verdade terrestre, os dados de sensoriamento remoto permitiram estabelecer a base para a coleta de dados de campo.

A utilização integrada dos dados multitemporais de sensoriamento remoto, dados meteorológicos e de campo, contribuíram satisfatoriamente ao estudo integrado e

dinâmico da ilha de calor. O trabalho de campo, tanto ao nível dos pontos fixos, como móveis, foi fundamental para comprovar os resultados obtidos com técnicas de sensoriamento remoto.

O cruzamento de todos os dados coletados, em várias escalas de abordagem, com técnicas apropriadas, permitiu estabelecer correlações dinâmicas e temporais relativas ao fenômeno ilha de calor.

O objeto de estudo, face à complexidade de análise, exige uma estratégia adequada para a sua compreensão enquanto fenômeno dinâmico e processual. As pesquisas nesse campo estão no estágio inicial e desenvolvem-se através de metodologias diferenciadas, o que dificulta os estudos comparativos, principalmente em áreas urbanas localizadas nos trópicos. Os obstáculos inerentes ao estudo traduzem-se pela variabilidade espacial e temporal do fenômeno, criando problemas ao nível da observação como também do tratamento estatístico dos dados.

Apesar da contribuição de muitos trabalhos descritivos sobre o fenômeno, há falta de esquemas conceituais e teóricos para a pesquisa da ilha de calor nas diferentes escalas de análise. As investigações podem avançar, considerando-se a própria rugosidade da cidade, como também as modificações que ocorrem na camada limite urbana.

O desenvolvimento de estudos nas metrópoles localizadas nos trópicos muito contribuirão para a compreensão dos processos e poderão fornecer subsídios para generalização através do desenvolvimento de modelos numéricos. Essas investigações em áreas de baixas latitudes poderão auxiliar a compreensão do conforto térmico urbano em ambiente tropical. Esses modelos poderão fornecer subsídios aos estudos urbanísticos e sua aplicação nas regiões tropicais.

Embora essa pesquisa tenha visado o conhecimento da ilha de calor da Metrópole Paulistana, numa abordagem dinâmica e processual das inter-relações cidade-atmosfera, a própria natureza do conhecimento demonstra a ne-

cessidade de se ampliar os estudos de ecologia urbana no Brasil.

No caso das metrópoles brasileiras, o intenso processo de crescimento, principalmente nas últimas décadas, desencadeou sérios problemas de degradação ambiental que afetam não apenas o espaço ocupado pela mancha urbana, mas também extrapola o nível regional. Tornam-se necessários estudos básicos para posterior intervenção adotando-se uma política ligada aos projetos urbanos.

Atualmente, as pesquisas em ecologia urbana estão pouco integradas. A problemática ambiental nas metrópoles, como um ecossistema diversamente estruturado, incluindo inter-relações complexas do homem e sua técnica, o solo, a água, a flora e a fauna, exige uma investigação que deve ultrapassar o conhecimento específico dos pesquisadores. Os projetos multidisciplinares, englobando vários estudiosos, podem auxiliar no estudo do ambiente urbano, através da análise dos processos, funcionamentos das variações cronoespaciais, no contexto de uma análise dinâmica e globalizante.

Este trabalho procurou, enfim, demonstrar os resultados de uma pesquisa que busca avaliar o impacto da urbanização não controlada sobre o meio ambiente. Diante dessas comprovações, pode-se concluir que o espaço urbano ocupado pela Metrópole Paulistana possui uma natureza profundamente transformada pelo homem, uma segunda natureza, da qual a ilha de calor — objeto central deste trabalho — é uma das evidências.

Entre os estudos a serem realizados, podem ser destacados as inter-relações do fenômeno ilha de calor, a poluição do ar, a degradação urbana e suas conseqüências no ambiente das metrópoles, principalmente nas localizadas nos trópicos. Nessas, os contrastes urbanos, associados a uma dinâmica atmosférica diferenciada, certamente influem para modificações que prejudicam a qualidade de vida da população.

Bibliografia

- AB'SABER, A. N. - Geomorfologia do sitio urbano de São Paulo, *Boletim* 219, Geografia 12, USP, São Paulo, 1957.
- ALMEIDA, M. A. L., OLIVEIRA, S. de., CORREIA, S.L. - *Um estudo preliminar sobre a ocorrência de ozona, no período da noite, na região da Grande São Paulo*, 36.^a Reunião Anual da SBPC, São Paulo, USP, 1984. CETESB.
- ASHWORTH, J. R. - The Influence of Smoke and Hot Gases from Factory Chimneys on Rainfall, *Q.J. Roy. Meteorol. Soc.*, 55, 341-350, 1929.
- ATKINSON, B. W. - The Reality of the Urban Effect on Precipitation - a Case Study Approach, *Urban Climates*. W.M.O., Tech. Notes 108, 342-360, 1970.
- ATKINSON, B. W. - The Effect on an Urban Area on the Precipitation from a Moving Thunderstorm, *J. Appl. Meteorol.*, 10, 47-55, 1971.
- ATKINSON, B. W. - Urban Effects on Precipitation: an Investigation of Lond's Influence on Severe Storm in August 1975, *Ocasional Paper 8*, Department of Geography, Univ. of London.
- ATWATER, M. A. - Thermal Effect of Urbanization and Industrialization: a Numerical Study, *Bound Layer Meteor.*, 3, 229-241, 1972.
- ATWATER, M. A. - Thermal Changes Induced by Urbanization and Pollutants, *J. Appl. Meteor.*, 14, 1061-1071, 1975.
- AUER, A. H., Correlation of Land Use and Cover with Meteorological Anomalies, *J. Appl. Meteor.*, 17, 636-643, 1978.
- AZEVEDO, A. (org.) - *A cidade de São Paulo. Estudos de*

- Geografia Urbana*, Associação dos Geógrafos Brasileiros, Seção Regional de São Paulo, São Paulo, Cia. Editora Nacional, 4 vols., il., 1958.
- BALCHIN, W. G. V., and PYE, N. - A Micro-Climatological Investigation of Bath and the Surrounding District, *Quarterly Journal, Royal Meteorological Society* 73, 297-323, 1947.
- BARTHOLOMEU, H. - The Land Use Survey, in MAYER, H. M.; KOHN, C. F., *Readings in Urban Geography*, Section 9, p. 265-269, Chicago, 1959.
- BELFORT de MATOS, J. N. - *O clima de São Paulo*, Serviço Meteorológico do Estado de São Paulo, 1925.
- BERGSTROM, R. W., and VISKANTA, R. Modeling of the Effects of Gaseous and Particulate Pollutants in the Urban Atmosphere. Part I: Thermal Structure, *J. Appl. Meteor.*, 1973.
- BERGSTROM, R. W., and VISKANTA, R. Comparison of Predicted and Observed Solar Radiation in an Urban Area, *J. Appl. Meteor.*, 16, 1107-1116, 1977.
- BERNALDEZ, F. G. - *Ecología y paisaje*, Ed. H. Blume, Madrid, 1981.
- BORNSTEIN, R. - Observations of the Urban Heat Island Effect in New York City, *J. Appl. Meteor.*, 7, 1968.
- BORNSTEIN, R. - The Two-Dimensional URBMET - Urban Boundary Layer Model, *J. Appl. Meteor.*, 14, 1975.
- CAMPOS, F. C. M. - *O espaço metropolitano*, conferência, AGB, Seção Regional de São Paulo, USP, 24/5/1978.
- CASTELLS, M. - *La cuestión urbana*. Madrid, Siglo XXI de España Editores S/A, 1ª ed., 1974.
- CAVALHEIRO, F. - *Die Kommunale Freiraum-verwaltung in São Paulo/Brasilien. Gegenwärtige Situation und changes Zukünftiger Entwicklung*, Diss., Hannover, 1981.
- CECH, I.; WEISBERG, R.; HACKER, C. and LANE, R.: Relative Contribution of Land Uses to the Urban Heat Problem in the Coastal Subtropics, *Int. J. Biometer*, 20, nº 1, pp. 9-18, 1976.
- CETESB - *Sistema de previsão meteorológica aplicada à poluição do ar na Região da Grande São Paulo*, 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Manaus, 1979.

- CHAHINE, M. T. - Infrared Remote Sensing of Sea Surface Temperature, in *Remote Sensing of Atmospheres and Oceans*, Edited by Adarsh Deepak, Academic Press, 1980.
- CHANDLER, T. J., The Changing Form of London's Heat-Island, *Geography*, 46, part 4, n.º 213, nov. 1961.
- CHANDLER, T. J. - *The Climate of London*, Hutchinson & Co., Londres, 1965.
- CHANDLER, T. J. - Urban Climates: Inventory and Prospects, W.M.O. *Symposium on Urban Climates and Building Climatology*, Brussels, October, 1968.
- CHANGNON, S.A., Jr. - Recent Studies of Urban Effects on Precipitation in the United States, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 50, 411, 421, 1969.
- CHANGNON, S. A., Jr., F. A. & SEMONIN, R. G. — METROMEX: an Investigation of Inadvertent Weather Modification, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 52, 958-967, 1971.
- CLARKE, J. F. and PETERSON, J. T. - An Empirical Model Using Eigenvectors to Calculate the Temporal and Spatial Variations of the St. Louis Heat Island, *J. of Appl. Meteor.*, September, 1973.
- COLLINS, W.G.; EL-BEIK, A. H. A. - The Acquisition of Urban Land Use Information from Aerial Photographs of the City of Seed (Great Britain), *Photogrammetria*, 27(2); 71-92, 1971.
- CONTI, J. B. — Poluição e urbanização. O caso de S. Paulo, "Suplemento Cultural" do jornal *O Estado de S. Paulo*, 107, ano 3, 19/11/1978.
- CONTI, J. B. - Crescimento urbano e mudanças climáticas. O Estado de São Paulo, "Suplemento Cultural" do jornal *O Estado de S. Paulo*, 149, ano III, p. 3, 9/9/1979.
- CORDEIRO, H. K. - *O centro da metrópole paulistana: expansão recente*, Série Teses e Monografias, IGEOG-USP, n.º 40, São Paulo, 1980.
- COUTINHO, J. M. V. - Relações estruturais e litológicas da bacia de São Paulo com o Pré-Cambriano circunvizinho, Mesa-redonda da Associação Brasileira de Geologia e Engenharia do SBC, São Paulo, maio/1980.
- DETWYLER, T. and MARCUS, M. G. - *Urbanization and Environment: The Physical Geography of the City*, California, Duxbury Press, 1972.

- DANNI, I. M. - A ilha térmica de Porto Alegre. Contribuição ao estudo do clima urbano, *Boletim Gaúcho de Geografia*, Série Geo, 8, p. 33-48, maio 1980.
- ECA - Aplicação de dados e análises de fotos de satélites meteorológicos, *Relatório técnico*, 01/74, 20/11/1974.
- Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo - EMPLASA - *O desafio metropolitano*, São Paulo, 1976.
- Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo - EMPLASA - *Sistema Cartográfico Metropolitano. Uso do solo, escala 1:25.000*, São Paulo, 1980a.
- Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo - EMPLASA - *Sistema Cartográfico Metropolitano. Padrões de uso e ocupação do solo urbano, escala 1:25.000*, São Paulo, 1980b.
- Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo - EMPLASA - *Atlas da Região Metropolitana de São Paulo*, São Paulo, 1984.
- ENDLICHER, W. - L'ilot de chaleur urbain d'Annecy. Quelques remarquers sur le climat local d'une ville alpine, *Revue de Géographie Alpine* (Grenoble), tome LXIX, 1981-83.
- ERIKSEN, W. - Klimatologisch - "Ökologische Crapekte der umweltbelastung Hannovers Stadtklima und Lutverunreinigung", in *Hannover und sein Unland*, Hannover, 1978.
- FERRARI, C. M. D; OLIVEIRA, S. de - A intensidade das inversões térmicas e sua influência na qualidade do ar, 36ª Reunião Anual da SBPC - São Paulo, USP, 1984. CETESB.
- FREDERICK, R. H. - Preliminary Results of a Study of Precipitation by Day-of-week over the Eastern United States, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 51, 100, 1970.
- FONZAR, B. C. - *O processo de ocupação regional. O modelo urbano e o conforto térmico na alta Sorocabana: um teste aplicado*, Presidente Prudente, Tese de Mestrado apresentada ao Departamento de Geografia da FFLCH, USP, São Paulo, 1981.
- FORSTER, B. - Urban Residential Ground Cover Using Landsat Digital Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46 (4), 547-558, 1980.
- FRANÇA, A. - *Estudo sobre o clima da bacia de São Paulo*, Boletim nº LXX da FFCL da USP, São Paulo, 1946, 59 pp.
- FUJIBE, F. and ASAI, T. - *Some Features of a Surface Wind*

- System Associated with the Tokyo Heat Island*, Tóquio, 1980.
- FUJUI, E. - Increasing Temperature Due to the Expansion of Urban Areas in Japan, *Tokio Journal of Climatology*, 1, n.º 1, Tóquio, 1964.
- FUKUOKA, Y. and NOBUYUKI, T. - *Urban Climate and Quality of Hiroshima City* (2nd Report), Tóquio, 1980.
- GALLEGO, L. P. - *Tipos de tempo e poluição atmosférica no Rio de Janeiro: um ensaio em climatologia urbana*, Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Geografia da FFLCH, USP, 1972.
- GARSTANG, M. P.; TYSON and EMITT - The Structure of Heat Islands, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 13, 139-165, 1975.
- GÄTZ, D. F. - An Investigation of Pollutant Source Strenght Rainfall Relationships at St., Louis, *J. Appl. Meteor.*, 18, 1245-1251, 1979.
- GEIGER, R. - *The Climate near the Ground*. 379-385 p. Massachusetts, Harvard University, 1950.
- GIVONI, B. - *Man, Climate and Architecture*, Applied Science Publishers, Londres, 1976.
- GODINHÓ, R., OLIVEIRA, S. de., ALMEIDA, M. A. L. - *Estudo preliminar sobre a utilização da sonda acústica no controle da poluição do ar CETESB - 11º Congresso da ABES - Fortaleza*, 1981.
- GOMES, A. M. - *Distribuição espacial da precipitação e sua variabilidade na bacia hidrográfica do alto Tietê*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Meteorologia, IAG, USP, 1984.
- GUISALLET, H., GUILMET, B. et ARLY R. - *Climatologie, méthodes et pratique*, Gauthier Villars & Cie., 1962.
- HASUI, Y. & SADOWSKI, G. R. - Evolução geológica do pré-cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo, *Revista Brasileira de Geociências*, 3, Vol. 6. São Paulo, set. 1976.
- HASUI, Y. & CARNEIRO, C. D. R. - *Origem e evolução da bacia de São Paulo*, in Mesa-Redonda da Associação Brasileira de Geologia e Engenharia do S.B.G., São Paulo, maio de 1980.
- HARNACK, R. P., & H. E. LANDSBERG - Selected Cases of Convective Precipitation Caused by the Metropolitan Area

- of Washington, D. C., *J. Appl. Meteorol.*, 14, 1050-1060, 1975.
- HEYMSFIELD, G. M.; SZEJWACH, G.; SCHOTZ, S., BLACKMER, JR., ROY, H. - Upper-Level Structure of Oklahoma Tornadoic Storms on 2 May 1979. II: Proposed Explanation of "V" Pattern and Internal Warm Region in Infrared Observations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, março 1983.
- HUFF, F. A., & J. L. VOGEL - Urban, Topografic and Diurnal Effects on Rainfall in the St. Louis Region, *J. Appl. Meteorol.*, 17, 565-577, 1978.
- HUFF, F. A., & S. A. CHANGON, JR. - Climatological Assessment of Urban Effects on Precipitation at St. Louis, *J. Appl. Meteorol.*, 11, 823-842, 1972.
- Instituto Gramsci - *Uomo, natura, società. Ecologia e rapporti sociali*, Editori Riuniti, Roma, 1974.
- IWASAKA, Y.; MINOURA, M. and NAGAYA, K. - The Transport and Spacial Scale of Asian Dust-storm Clouds; a Case Study of the Dust-storm Event of April 1979, 35B, p. 189-196, *Tellus*, Japan, 1983.
- JAUREGUI, O., E. - La isla de calor em Toluca, México, *Boletín del Instituto de Geografía*, Universidade Nacional Autónoma de México, nº 9, p. 27-37, México, 1979.
- JAUREGUI, E. - Urban Climate of Mexico City, *Erdkunde*, 27, 298-307, 1973.
- JONES, P. A., & J. E. JIUSTO - Some Local Climate Trends in Four Cities in New York State, *J. Appl. Meteorol.*, 19, 135-141, 1980.
- JUNOT, L. R. - Estudo da temperatura da cidade de São Paulo, *An. IX Congr. Bras. Geogr.*, vol. II pp. 460-488, Rio de Janeiro, 1942.
- JUNOT, L. R. - As chuvas da cidade de São Paulo, *Arquivo de Higiene e Saúde Pública*, ano VIII, nº 18, pp. 9-90, São Paulo, maio de 1943.
- KAYANE, I. - Temperature Increase Due to the Expansion of Urban Area in Tokyo, *Journal of Climatology*, 1, nº 2, Tóquio, 1964.
- KRATZER, A. *Das Stadtklima*, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunscheig, Germany, 1956.
- KAWAMURA, T.; SUZUKI, Y. - Air Temperature Difference Between Park and the Surrounding Urban Area, *Inst. Geos-*

- ci. Univ. Tsukuba, 9, p. 30-41, out. 15, 1983.
- KIMURA, R. - Effects of General Fows on a Heat Island Convection, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 54, 1976.
- KOPEC, R. J. - *Further Observations of the Urban Heat Island in a Small City*, American Meteorological Society, U.S. (7), 602 pp., jul. 1970.
- LANDSBERG, H. E. - The Climate of Towns, in *Man's Role in Changing the Face of the Earth*, pp. 585-601. Edited by William L. Thomas Jr., Published for the Wernergrem Foundation for Antropological Research and the National Science Foundation, The University of Chicago Press, 1956.
- LANDSBERG, H. E. - *The Urban Climate*, Academic Press, New York, 1981.
- LANGENBUCH, J. R. - *Estruturação da Grande São Paulo. Estudo de Geografia Urbana*, Instituto Brasileiro de Geografia, Rio de Janeiro, 1971.
- LAURITSON, L.; NELSON, G. J.; PORTO, F. W. - *Data Extraction and Calibration of Tiros - N/NOAA - Radiometers*, NOAA Technical Memorandum Ness 107, United States Department of Commerce, Washington, D. C., November, 1979.
- LEE, D. O.; Contrasts in Warming and Cooling Rates at an Urban and a Rural Site, *Weather* (Royal Meteorological Society) 34, nº 2, Feb., 1979.
- LEE, R. L.; BERGSTRON and BORNSTEIN. Workshop on Modeling the Urban Boundary Layer, Las Vegas, Nevada, 5 May, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 57, 313-314, 1976.
- LEFEBRE, H. - *O direito à cidade*, Editora Documentos Ltda., São Paulo, 1969.
- LINAGRE, E. - Características das várias escalas de clima, *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, ano V, nº 1, 1981.
- LOMBARDO, M. A.; CÂMARA, G.; PEREIRA, E.; TARIFA, J. R. - *Use of Infrared Images in the Delimitation of São Paulo's Heat Island*, Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of Environment, May 9-13, Ann Arbor, Michigan, EUA, 1983.
- LOMBARDO, M. A.; NOVO, E. M. L. M.; NIEVO, M.; FORESTI, C. - *Uso da terra no vale do Paraíba através de dados de sensoriamento remoto*, Relatório final, São José dos

- Campos, INPE, RPE, 1972.
- LOMBARDO, M. A.; PEREIRA, A. E. C.; CÂMARA, G.; DIAS, V. - *Estudos radiométricos da ilha de calor*, INPE, 2156, RPE/375, São José dos Campos, julho, 1981.
- LONGLEY, R. W. - *Elements of Meteorology*, John Wiley & Sons Inc. 317 p., New York, 1970.
- LOWRY, W. P.; WATHER and LIFE - *An Introduction to Biometeorology*, Academic Press, New York and London, 1967.
- LOWRY, W. P. - The Climate of Cities, *Sci. American*, 217, pp. 15-23, 1967.
- LOWRY, W. P. - *Urban Effects on the Atmosphere, Who in the World Care?* Conference on Urban Environment, and Second Conference on Biometeorology American Meteorological Society, Philadelphia, pp. 135-138, 1972.
- LYNCH, K. - A cidade como meio ambiente, in *Cidades: a urbanização da humanidade*, Rio de Janeiro, Zahar Editores, 1970.
- MACHADO, L. A. T., e M. A. S. DIAS - Análises de uma tempestade severa sobre a cidade de São Paulo: um exemplo de interação entre diferentes escalas de movimentos, *Anais do II Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 1982 (a ser publicado).
- MARCUSE, H. - *Ecología y revolución*, Ediciones Nueva Visión, Buenos Aires, 1975.
- MARTIN, F. P. & EVANS, M. - The Heat Island Effect a Large Shopping Mall in Akron, Ohio, *Westerwise the Magazine about Weather*, David M. Ludlum, vol. 29, n.º 6, dez, 1975.
- MATSON, M.; McCLAIN, E. P.; MCGINNIS, D. F.; PRITCHARD, J. A. - Satellite Detection of Urban Heat Islands, *Monthly Weather Review*, 106 (2), 1725-1734, 1978.
- MIDDLETON, W. E. K., and MILLAR, F. G. - Temperature Profiles in Toronto, *Royal Astronomical Society (Toronto) Journal* 30, 265-72, 1936.
- MONTEIRO, C. A. F. - *A frente polar atlântica e as chuvas de inverno da fachada sul-oriental do Brasil*, São Paulo, Inst. de Geografia da USP, 1969, Série Teses e Monografias n.º 1, 68 pp.
- MONTEIRO, C. A. de F. - Análise rítmica em climatologia: problemas de atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho, *Climatologia*, 1, São Paulo,

- Instituto de Geografia da USP, 21, pp., ilustr., 1971.
- MONTEIRO, C. A. de F. - *A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo: estudo geográfico sob a forma de atlas*, São Paulo, Instituto de Geografia da USP, 1973.
- MONTEIRO, C. A. de F. - *Teoria e clima urbano*, IGEOG, USP, Série Teses e Monografias n° 25, São Paulo, 1976.
- MONTEIRO, C. A. de F. - Fluvial Hazards and the Desorganization of Urban Life in Greater São Paulo, Brasil, in AFO-LABI, E. S. (Editor) *Environmental Problems of Resources Development in Developing Countries*, Ile-Ife, Nigéria, University of Ife, July, 1978, pp. 44-46.
- MONTEIRO, C. A. de F. - *Environmental Problems in São Paulo Metropolitan Area: the Role of Urban Climate with Special Focus on Flooding*, 24th. International Geographical Congress, Japan, September, 1980.
- MONTEIRO, C. A. de F.; TARIFA, J. R. - *Contribuição ao estudo de clima de Marabá: uma abordagem de campo subsidiária ao planejamento urbano*, Instituto de Geografia da USP, série Climatologia n° 7, 1977.
- MYRUP, L. - Numerical Model of the Urban Heat Island, *J. Appl. Meteor.*, 8, 908-918, 1969.
- NIERO, M. F. C. - *Uso do solo urbano da área metropolitana de São Paulo através da análise automática de dados LANDSAT*, São José dos Campos, INPE, 2788, RPE/137, junho, 1983.
- NISHIZAWA, T.; SALES, J. A. - The Urban Temperature in Rio de Janeiro, Brazil, *Latin American Studies*, 5, 1983.
- NKEMDIRIN, L. C. - Dynamics of Urban Temperature Field. A case Study. *J. Appl. Meteor.*, 15, N° 8, 818-828, Aug., 1976.
- NORWINE, J. R. - *Heat Island Properties of an Enclosed Multi-Level Suburban Shopping Centers*, Conference on Urban Environment and Second Conference on Biometeorology, American Meteorological Society, Philadelphia, pp. 139-158, 1972.
- OBLE, D. B.; LEE, R. L. - Linearized Calculations of Urban Heat Island Convection Effects, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 1971.
- OCCHIPINTI, A. G. e SANTOS, P. M. - *Análise das máximas intensidades de chuvas na cidade de São Paulo*, Instituto Astronômico e Geofísico, 41 pp., São Paulo, 1965.

- OGATA, M. G. - *Os resíduos sólidos na organização do espaço e na qualidade do ambiente urbano: uma contribuição geográfica no estudo do problema na cidade de São Paulo*, São Paulo, Departamento de Geografia da FFLCHUSP, 1978 (exemplar mimeo.), Dissertação de Mestrado.
- OKE, T. R. - *City Size and the Urban Heat Island*, Conference on Urban Environment and Second Conference on Biometeorology, American Meteorological Society, Philadelphia, pp. 144-146, 1972.
- OKE, T. R. - *Boundary Layer Climate*, London, Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, 372 pp., New York, 1978.
- OKE, T. R. - The Energetic Basis of the Urban Heat Island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1982.
- OLIVEIRA, A. P. e P. L. S. DIAS - Aspectos observacionais da brisa marítima na cidade de São Paulo, *Anais do II Congresso Brasileiro de Meteorologia* (a ser publicado), 1982.
- OLIVEIRA, A. P. e OLIVEIRA, S. de - *Levantamento estatístico da instabilidade atmosférica através de radiossondagem*, 36ª Reunião Anual da SBPC, São Paulo USP, 1984. IAG-USP.
- OLIVEIRA, S. de - *A influência da altura máxima da mistura sobre a concentração do SO₂ e material particulado no período do inverno*, 36ª Reunião Anual da SBPC, São Paulo, 1984. CETESB.
- OLIVEIRA, S. de; ALMEIDA, M. A. L.; BRUNI, A. C. - *Estudo preliminar sobre parâmetros meteorológicos críticos para dispersão de poluentes utilizando a sonda acústica*, 12º Congresso da ABES, Santa Catarina, 1983. CETESB.
- OLIVEIRA, S. de; BRUNI, A. C. de; ALMEIDA, M. A. L. - *Análise de fluxo do vento visando o transporte de poluentes na região da Grande São Paulo*, 12º Congresso da ABES, Camboriú, 1983.
- ORSINI, C. M. Q. et al. - *Avaliação preliminar da qualidade do ar de Cubatão* (Relatório), São Paulo, Instituto de Física da USP, 79 pp., 1982.
- PADMANABHAMURTY, B. and MANDAL - Urban-Rural Radiation Differences at Delhi, *Mausan*, 33, 509, 1982.
- PASCHOAL, W. - *A inundação no Cambuci: percepção e reação de habitante e usuário de uma área central da metrópole*

- a um de seus problemas mais sérios, Tese de mestrado apresentada ao Departamento de Geografia da FFLCHUSP, São Paulo.
- PAZERA Jr., E. - A ilha de calor da cidade: fatores e atributos, *Boletim Geográfico*, 34 (249), 51-57, Rio de Janeiro, abril-junho, 1976.
- PERLOFF, H. S. - *La calidad del medio ambiente urbano*, Ed. Oikos-Tau, Espanha, 1973.
- PETERSON, J. T. - *The Climate of the Cities: a Survey of Recent Literature. Climate in Review*, Geoffrey Mc Boyle, Houghton Mifflin Co., 313 pp., Boston, 1973.
- PETERSON, J. T.; FLOWERS, E. C. - Urban-Rural Radiation and Atmospheric Turbidity Measurements in the Los Angeles Basin, *J. Appl. Meteor.*, 17, nº 17, nº 11, 1595-1609, Nov. 1978.
- PETERSON, J. and STAFFEL, T. L. - Analysis of Urban-Rural Solar Radiation data from St. Louis, Missouri, *J. Appl. Meteor.*, 19, nº 3, 275-283, March, 1980.
- RAO, A. R. - Stochastic Analysis of Annual Rainfall Affected by Urbanization, *J. Appl. Meteorol.*, 19, 41-52, 1980.
- RIBEIRO, E. A.; li, F. A. M.; MOREIRA, J. C.; DUTRA, L. B. - *Manual de usuário dos sistemas de tratamento de imagens digitais*, São José dos Campos, INPE, s.d.
- ROSEMBERG, N. J. - *Microclimate: the Biological Environment*, John Wiley & Sons, New York, 1974.
- ROSS, J. L. S. - *A qualidade da água subterrânea no espaço urbano da Grande São Paulo*, Dissertação de mestrado FFLCHUSP, São Paulo, 1981.
- ROUSE, W. R.; NOAD, D.; McCUTCHEON, J. - Radiation, Temperature and Atmospheric Emissivities in a Polluted Urban Atmosphere at Hamilton, Ontário, *J. of Appl. Meteor.*, 12, 1973.
- SAMPAIO, A. H. L. - *Correlações entre uso do solo e ilha de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador*, Dissertação de mestrado, Departamento de Geografia, FFLCHUSP, São Paulo, 1981.
- SANDERSON, M.; KUMANAN, I.; TANGUAY, T.; SCHERTZER, W.; The Aspects of the Urban Climate of Detroit, Windsor, *J. of Appl. Meteor.*, 1973.
- SANDERSON, M., & R. GORSKI - The Effect of Metropolitan Detroit, Windsor on Precipitation, *J. Appl. Meteorol.*,

- 17, 423-427, 1978.
- SANTOS, M. - *As cidades nos países subdesenvolvidos*, Rio de Janeiro, Civilização Brasileira, 1965.
- SANTOS, M. - Desenvolvimento econômico e urbanização em países subdesenvolvidos: os dois sistemas de fluxo de economia urbana e suas implicações espaciais, *Boletim Paulista de Geografia*, AGB (53), 35/61, fevereiro, 1977.
- SANTOS, M. - *Espaço e dominação*, Seleção de textos, Associação dos Geógrafos Brasileiros, São Paulo, junho, 1978.
- SARTORI, M.G.B. - *O clima de Santa Maria, RS: do regional ao urbano*, Tese de mestrado, Departamento de Geografia, FFLCHUSP, São Paulo, 1979.
- SCHIMIDT, J.A. - *The Environmental Impact of Urbanization*, Ass. Americ. Geogr., Washington, Public. n° 13, 1974.
- SCHOTT, J. R.; WILKINSON, E. P. - Quantitative Methods in Aerial Thermography, *Optical Engineering*, 21, n° 5, Sept.-Oct. 1982.
- SEKIGUTI, T. - Studies in Local Climatology - Temperature Distribution and Surface Covers, *Papers in Meteorology and Geophysiscs*, Nabashi, Suginami, Tokyo, Japan, vol. II, n° 3-4, 1951.
- SEKIGUTI, T. - Introduction to Local Climatology, *Tokyo Journal of Climatology*, 2, 1965.
- SEKIGUTI, T. - Basin and City Climate Complex, *Japanese Progress in Climatology*, 1979.
- SEKIGUTI, T.; TAKANO, K. - Mathematical Simulation of Heat Island Model, *Japanese Progress in Climatology*, University Tokyo, Japan, pp. 80-81, 1975.
- SELBY, J. E. A.; McCLATCHEY, R. A. - *Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5 um: Computer Code LOWTRAN-3*, Cambridge, MA, Air Force Cambridge Research Laboratories, 1975. (AFCRL-TR-75-02-55).
- SELBY, E. A.; KNEIZYS, F. X.; CHETWIND, J. H.; McCLATCHEY, R. A. - *Atmospheric Transmittance Radiance; Computer Code LOWTRAN-4*, Cambridge, MA, Air Force Cambridge Research Laboratories, 1978 (AFGL - TR - 78-0053).
- SERRA, A. - *Secondary Circulation of Southern Brazil*, Serviço Meteorológico, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 1938.
- SERRA, A. - *La circulation générale de L'Amérique du Sud*, Ministério da Agricultura, Serviço Meteorológico, Rio de

- Janeiro, 1939.
- SERRA, A.; RABISBONNA, K. - *As massas de ar da América do Sul*, Serviço Meteorológico, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 1942.
- SETZER, A.; CAVALCANTI, I. F. A.; MARCELINO, B. C. - *Influência meteorológica da poluição atmosférica em São Paulo*, relatório preliminar, INPE, São José dos Campos, SP, julho, 1979.
- SHITARA, H. - Effects of Buildings upon the Winter Temperature in Hiroshima City, *Geographical Review of Japan*, 30, 468-482, Tóquio, 1957.
- SHITARA, H. - The Minute Diurnal Fluctuation of Air Temperature and its Vertical Profile in a Built-up Area, *Geographical Review of Japan*, 32, 313-319, Tóquio, 1959.
- SHITARA, H. - An Analysis of the Distribution of the Nocturnal Air Temperature in a Coastal Area, *Geographical Review of Japan*, 28, 609-620, Tóquio, 1955.
- SHREFFER, J. H. - Detection of Centripetal Heat Island Circulations from Tower Data in St. Louis, *Boundary Layer Meteor.*, 15, 229-242, 1978.
- SHREFFER, J. H. - Heat Island Convergence in St. Louis During Calm Period, *J. Appl. Meteor.*, 18, nº 12, 1512-1520, Dec. 1979.
- SILVA, A. C. - *A metrópole ampliada e o bairro metropolitano. O caso de São Paulo*, 1982.
- SINGER, P. - *Desenvolvimento econômico e evolução urbana*, São Paulo, Companhia Editora Nacional e Editora da USP, 1968.
- SINGER, P. - Urbanização e desenvolvimento: o caso de São Paulo, *Economia política e urbanização*, São Paulo, Brasileira, 2ª ed., CEBRAP, 1975.
- SUNDBORG, A. - Local Climatological Studies of the Temperature conditions in an Urban Area, *Tellus*, 2(3), 221-231, 1950.
- TARIFA, J. R. - Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana e rural de São José dos Campos (SP), Brasil. *Geografia*, 2(4), 59-60, Rio Claro, 1977.
- TARIFA, J. R. - *O clima de Manaus: uma abordagem geográfica para fins de planejamento*, Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas. Para SERETE S/A Engenharia, Campinas, 1973.

- TERJUNG, W. H. et al. - The Energy Balance Climatology of a City-Man System, *Annals of the Association of American Geographers*, 60(3): 446-492, 1970.
- TERJUNG, W. H. and LOUIS, S. S. F. - Solar Radiation and Urban Heat Island, *Annals of American Geographers*, 63(2): 181-190, 1973.
- TERJUNG, W. H. and ROURKE, P. A. - Relative Influence of Vegetation on Urban Energy Budgets and Surface Temperatures, *Bound. Layer Meteorol.*, 21, 255-263, 1981.
- THOMAS, M. K. - *A Survey of the Urban Effects on the Climates of Canadian Cities*, Department of Environment Atmospheric Service, 1971.
- TITARELLI, A. H. V. - A onda de frio de abril de 1971 e sua repercussão no espaço geográfico brasileiro, *Climatologia* 4, São Paulo, Instituto de Geografia da USP, 14 pp., il., 1972.
- TITARELLI, A. H. V. - Alteração do clima local nos centros urbanos: efeitos adversos da urbanização, *Caderno Prudentino de Geografia* 3, IPEA-UNESP, Presidente Prudente, pp. 28-35, 1982.
- TITARELLI, A. H. V. - *Air Pollution Episodes in São Paulo's Metropolitan Area*, 24th. International Geographical Congress, Brasil, agosto 1982.
- VELASCO, F. R. D.; PRADO, L. O. C.; SOUZA, R. C. M. - *Sistema MAXVER. Manual do usuário*, São José dos Campos, INPE, julho de 1978 (INPE-1315-NTI/110).
- VILLAÇA, F. - *O uso do solo urbano*, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, mimeografado, 1973.
- VISKANTA, R. and DANIEL, R. A. - Radioactive Effects of Elevated Pollutant Layers on Temperature Structure and Dispersion in an Urban Atmosphere, *J. Appl. Meteor.*, 19, n° 1, 53-70, Jan., 1980.
- VUKOVICH, F. and DUNM - A Theoretical Study of the St. Louis Heat Island: Some Parameter Variations, *J. Appl. Meteor.*, 17, n° 11, 1585-1594, Nov. 1978.
- VUKOVICH, F. and KING, W. - A Theoretical Study of the St. Louis Heat Island: Comparisons Between Observed Data and Simulation Results on the Urban Heat Island Circulation, *J. Appl. Meteor.*, 19, n° 7, 761-853, July, 1980.
- W. M. O - World Meteorological Organization - *Symposium on Urban Climates and Building Climatology*, Brussels, Belgium, October, 1968.

- W. M. O. - World Meteorological Organization - *Urban Climates*, Publications 254, Genève, 1970.
- W. M. O. - World Meteorological Organization - *Urban and Building Climatology - World Climate Applications Programme*, Genève, 6-10 December, 1982.
- WILHEIM, J. - *Urbanismo no subdesenvolvimento*, Série Imagens do Brasil nº 11, Rio de Janeiro, Ed. Saga, 1969.
- WOOLUM, C. A. — Notes from Study of the Micro-climatology of the Washington, D.C. Area for the Winter and Spring Seasons, *Weatherwise*, 17, 263-271, 1964.
- ZANATTI, P. T.; OLIVEIRA, S. de; ALMEIDA, M. A. L. - *Sistema de previsão meteorológica aplicado à poluição do ar na região da Grande São Paulo*, 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Manaus, 1979, 13 pp., CETESB.
- YONETANI, T. - Enhancement and Initiation of a Cumulus by a Heat Island, *J. Meteorol. Soc. of Japan*, 61, 244-253, 1983.



SBD / FFLCH / USP	
SEÇÃO DE	Geografia
UBIÇÃO D/	Indústria
Alves da Silva	VALOR R\$ 30,00
ATA: 02-09-04	TOMBO 250383

APÊNDICE

Algoritmo para análise de imagens de satélites termais

Tomou-se como base o fato de que todo corpo negro a uma certa temperatura emite ondas eletromagnéticas. Uma onda é caracterizada por: f frequência; T período; λ comprimento; c velocidade. Estas variáveis estão relacionadas por $cT = \lambda$. Define-se número de onda ν como sendo $1/\lambda$.

As ondas eletromagnéticas (oscilações do campo elétrico e magnético) transportam energia. A energia transportada em cada metro quadrado de uma frente de onda eletromagnética que está se propagando dentro de um cone de um estereoradiano, é chamada radiância e medida em $W/m^2 \cdot SR$ (watts por metro quadrado por estéreo radiano).

Entende-se por radiância espectral I_ν , como radiância de uma onda eletromagnética de um número de onda ν , e é medida em $W/SR \cdot m^2 \cdot cm^{-1}$, onde o cm^{-1} é a unidade do número de onda.

Através da lei de Planck, descobriu-se que um corpo negro à temperatura T emite radiação eletromagnética cuja radiância espectral é dada por:

$$I_\nu(T) = \frac{C_1 \nu^3}{e C_2 \nu T_{-1}}$$

onde "e" é a constante de Euler e vale 2,7183,

$$C_1 \text{ vale } 1.190659 \times 10^{-5} \frac{\text{mW}}{\text{m}^2 \text{sterad cm}^{-4}}$$

$$C_2 \text{ vale } 1.438833 \text{ cm K}$$

T é a temperatura em graus Kelvin.

Um intervalo de números de onda indo de ν_1 a ν_n é chamado canal. A radiância num canal é dada por:

$$I(T) = \int_{\nu_1}^{\nu_n} I_\nu(T) d\nu$$

Ou seja, se $I_\nu(T)$ é dado pela curva da figura abaixo, $I(T)$ é a área abaixo da curva:

$$I_r(T)$$

Esta área pode ser calculada aproximadamente por:

$$I(T) = \left(\frac{I_{\nu_1}}{2} + I_{\nu_2} + I_{\nu_3} + \dots + \frac{I_{\nu_n}}{2} \right) \cdot \Delta\nu$$

O satélite permite aparelhos denominados sensores radiométricos para medir $I(T)$. Porém, a eficiência destes sensores varia com ν , ou seja, eles só conseguem medir uma porcentagem Φ da verdadeira radiância; sendo assim, temos um valor de Φ para cada ν . Portanto a radiância medida pelo satélite será:

$$I(T) = \frac{I_{\nu_1}}{2} \Phi(\nu_1) + I_{\nu_2} \Phi(\nu_2) + \dots + \frac{I_{\nu_n}}{2} \Phi(\nu_n) \Delta\nu$$

onde o $\Phi(\nu)$ é fornecido pelo manual do satélite e os I_ν são fornecidos pela lei de Planck.

Através da fórmula (3-1) pode-se construir uma tabela $T \times I$. Entretanto, esta tabela contém erros devido aos efeitos da atmosfera e ao fato de que a superfície da cidade não corresponde a um corpo negro.

$$I(T) = \left[\frac{I_{\nu_1}}{2} \Phi(\nu_1) + \Phi(\nu_2) + \dots + \frac{I_{\nu_n}}{2} \Phi(\nu_n) \right] \Delta\nu \quad (3-1)$$

Efeitos da atmosfera

Devido aos vários fatores que serão discutidos abaixo, a radiância recebida pelos sensores do satélite não é apenas a da superfície da cidade, mas a soma das radiâncias vindas de várias fontes, a saber:

$$I_\nu(\Theta) = I_{\nu,s}(\Theta) = I_{\nu,a}(\Theta) = I_{\nu,d}(\Theta) = I_{\nu,h}(\Theta)$$

onde:

I_ν é a radiância que chega ao satélite

$I_{\nu,s}$ é a radiância vinda da superfície

$I_{\nu,a}$ é a radiância vinda da atmosfera

$I_{\nu,d}$ é a radiância vinda da atmosfera refletida na superfície

$I_{\nu,h}$ é a radiância do sol refletida na superfície.

A radiância vinda do sol $I_{\nu,h}$ pode ser desprezada, pois segundo Chahine (1980) é absorvida. Quanto ao $I_{\nu,s}$, não é mais dado pela lei de Planck porque a superfície não é um corpo negro e só uma porcentagem $I_\nu(\Theta, Z_s)$ consegue atravessar a atmosfera sem ser absorvida por ela.

Nota-se que um corpo que não é negro só emite uma porcentagem $\epsilon_{\nu,s}(\theta)$ da radiação que ele emitiria se fosse negro, onde $\epsilon_{\nu,s}(\theta)$ é denominado emissividade.

Daí, conclui-se que:

$$I_{\nu,s}(\theta, Z_s) = \epsilon_{\nu,s}(\theta) B_{\nu}(T_s) \tau_{\nu}(\theta Z_s)$$

onde $B_{\nu}(T_s)$ é a radiância dada pela lei de Planck.

$$B_{\nu}(T_s) = \frac{C_1 \nu^3}{e C_2 \nu / T_s - 1} \quad (3-2)$$

e T_s é a temperatura da superfície

Z_s é a distância do satélite à superfície.

Segundo Chahine (1980) se a superfície foi lambertiana, isto é, se refletir igualmente em todas as direções, temos:

$$I_{s,d} = (1 - \epsilon_{\nu,s}) I_{\nu,a} \tau_{\nu}(Z_s)$$

Daí conclui-se que:

$$I_{\nu} = \epsilon_{\nu,s} B_{\nu}(T_s) \tau_{\nu}(\nu Z_s) + I_{\nu,a} + (1 - \epsilon_{\nu,s}) I_{\nu,a} \tau_{\nu}(Z_s)$$

e

$$B_{\nu}(T_s) = \frac{1}{\epsilon_s} \left[\frac{I_{\nu} - I_a(\nu)}{\tau_{\nu}(Z_s)} - (1 - \epsilon_s) I_a(\nu) \right] \quad (3-3)$$

O cálculo para se estimar a temperatura foi feito através dos seguintes passos:

Passo 1 — Para o cálculo da emissividade, usou-se fotografias aéreas 1:8.000 — terrafoto 1978, em amostras

com padrões diferenciados de uso do solo. Essas amostras foram importantes para o aprimoramento do algoritmo utilizado no estabelecimento das relações entre níveis de cinza das imagens de satélite meteorológico e temperatura. As amostras, com a dimensão de 1 km², foram ajustadas à resolução espacial das imagens NOAA-7 e NOAA-8, correspondente ao tamanho do "pixel".

Após a identificação das classes de uso do solo, a partir dos overlays, procedeu-se à contagem de áreas ocupadas por cada classe através de uma grade milimetrada.

Para cada classe mediu-se a emissividade dos materiais através de um termômetro FUESS e radiômetro PRT5. Considerou-se a média de três medidas para se extrair a emissividade integrada dos diferentes alvos, através de

$$\epsilon = \frac{T_c}{T_{cn}} \quad (\text{temperatura do corpo})$$

$$\quad \quad \quad (\text{temperatura do corpo negro})$$

Foram calculadas as emissividades de cada cobertura urbana.

$$\epsilon = \frac{P_1 \epsilon_1 + P_2 \epsilon_2 + P_3 \epsilon_3 + \dots}{100}$$

onde ϵ_1 é a emissividade do material 1, ϵ_2 é a emissividade do material 2, etc. P_1 é a porcentagem da superfície coberta pelo material 1, P_2 é a porcentagem coberta pelo material 2, etc...

Passo 2 — Utilizando-se de dados de radiossondagem, levantou-se perfis de temperatura e umidade relativa do ar em diferentes alturas. Através desses dados e da rotina LOWTRAN calculou-se o $I_a(\nu)$ e $\tau_p(Z_s)$ para diferentes frequências dentro do canal que varia de $\nu_1 = 840 \text{ cm}^{-1}$ a $\nu_n = 985 \text{ cm}^{-1}$.

Passo 3 — Da fórmula (3-3) extrai-se que a radiância I_ν que chega ao satélite é dada por:

$$I_\nu = \epsilon_s \tau_s B_\nu(T_s) + (1 + \tau_s - \tau_s \epsilon_s) I_{\nu,a} \quad (3-4)$$

A radiação captada pelo satélite no canal, é dada por (3-1), com I_v calculado por (3-4). Em (3-4), B_v é dado pela fórmula de Planck, ϵ_s é calculado no passo 1, e $I_{v,a}$ e τ_v são calculados no passo 2.

No cálculo das radiâncias captadas pelo satélite, incluem-se duas temperaturas de referências da superfície urbana (T_1 e T_2). Para isso, usa-se fórmula (3-1) e (3-4). Sejam AN_1 e AN_2 , as radiâncias correspondentes a T_1 e T_2 .

Passo 4 — A relação entre o nível de cinza X da imagem e a radiância captada pelo satélite é aproximadamente $I = G \times X + AI$.

Temos $AN_1 = G \times X_1 + AI$ e $AN_2 = G \times X_2 + AI$. Através de quantificação dos níveis de cinza X_1 e X_2 correspondentes às radiâncias AN_1 e AN_2 , calcula-se $G = (AN_1 - AN_2) / (X_1 - X_2)$ e $AI = AN_1 - G \times X_1$.

Passo 5 — Com a variação de temperatura T , de 0,5 em 0,5 graus centígrados e usando as fórmulas (3-1) e (3-4) constrói-se uma Tabela A de temperatura versus radiância.

Passo 6 — Fazendo a radiância variar de 0,5 e 0,5 e usando interpolação nos valores da Tabela A, constrói-se a tabela radiância versus temperatura.

Passo 7 — Usando — fórmula $RAD = G \times X + AI$ onde AI e G foram calculados no passo 4 e a tabela radiância versus temperatura constrói-se uma tabela de nível de cinza versus temperatura. Para isso, dado um nível de cinza X calcula-se a radiância correspondente RAD . Encontrada a radiância $R(I)$ da tabela radiância versus temperaturas mais próximas de RAD , acha-se a temperatura $TE(I)$ correspondente a $R(I)$ na tabela radiância versus temperatura. Multiplica-se $TE(I)$ por 2 para aumentar a precisão. Reduz-se $TE(I)$ o inteiro, devido a o terminal gráfico do computador trabalhar somente com inteiros. O resultado é armazenado em $TAB(J)$. Com esses dados, constrói-se a tabela temperatura versus nível de cinza.

Passo 8 — Usa-se a tabela construída no passo 7 para transformar todos os níveis de cinza em temperaturas.

Qual a influência da ilha de calor na saúde da população?

Que alterações provoca na flora e na fauna?

A diminuição acelerada de áreas verdes contribui para intensificar o contraste térmico nas metrópoles?

A ilha de calor reflete o desconforto térmico da metrópole?

Que relações existem entre ilha de calor, concentração de poluentes e enchentes nas cidades?

O aeroporto internacional de Cumbica tem tido freqüentes problemas de interdição de vôo; o que tem a ilha de calor a ver com isso?

Arquitetos, urbanistas, geógrafos, sanitaristas, biólogos, enfim todos os que se preocupam com a qualidade da vida, não podem ignorar essas questões, além de outras de igual importância respondidas neste oportuno livro — um brado de alerta dirigido à consciência da população da metrópole, cujo clima, cada vez mais, se assemelha ao de um deserto artificial.

EDITORA HUCITEC

Edição Patrocinada por

LALEKLA S.A. Comércio e Indústria
