

SENSORIAMENTO REMOTO NA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO  
ESPAÇO-TEMPORAL DA ESTRUTURA URBANA

M.S.S.Barros

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq  
Caixa Postal 515 - 12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

D.Dal Bianco

EMBRAER - Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A  
Caixa Postal 857 - 12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

O.B.Netto Jr.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT  
Cidade Universitária - SP - Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo para análise e projeção da estrutura espacial urbana, desenvolvido para cidades brasileiras de médio porte (200.000 a 600.000 habitantes). No processo de análise da cidade, os espaços são agregados em setores homogêneos através da utilização de aerofotos em escala de 1:10.000. Mosaicos aerofotográficos de várias épocas são usados para verificação de tendências de crescimento da cidade, sendo também um instrumento útil para a validação do modelo proposto. Considerando-se a localização industrial como definida "a priori" em planos diretores do uso do solo, o modelo busca a localização residencial e a localização das atividades de comércio e serviços. A localização residencial é formulada como sendo função da oferta de localização, da renda familiar, do padrão construtivo da residência a ser localizada e do nível de urbanização. Os valores dos parâmetros Padrão Construtivo e Nível de Urbanização são obtidos por submodelos "cross-section", gerados a partir de dados amostrais. A localização das atividades de comércio e serviços é equacionada em função do mercado potencial gerado pela população existente nas zonas residenciais e pela acessibilidade aos centros comerciais. A evolução espacial da estrutura urbana é simulada usando-se a técnica de Monte Carlo. A cidade de São José dos Campos, SP, foi utilizada como área teste.

ABSTRACT

This paper presents a model for analysis and planning of the urban spatial structure to be applied to medium sized Brazilian towns (200,000 to 600,000 inhabitants). To analyse the town, urban spaces are aggregated in homogeneous sectors through the utilization of 1:10,000 aerophotographs. To verify the growth tendencies of the town, as well as to validate the model, aerophotographic mosaics obtained at regular intervals of time are used. The industrial localization is an exogenous variable defined by the land use legislation; both location of household and activities of trade and services are also searched by the model. The household location is formulated as a function of: the land supply, the family income, the building standard, and the urbanization level. The values of the building standards and urbanization levels parameters are obtained by cross-section models through sample data. The location for trade and services is thought of as a function of the potencial market generated by the population of the residential area and by the accessibility to such trade and service areas. The spatial evolution of urban structure is simulated using the computer Monte Carlo technique. The test area has been Sao José dos Campos, SP, Brazil.

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem de um sistema dinâmico, como a da estrutura espacial urbana, em regiões de alta taxa de expansão populacional (taxas anuais maiores que 3%) é particularmente importante pelos benefícios obtidos com a projeção temporal do desenvolvimento urbano e pela simulação dos assentamentos populacionais, condicionados aos estoques de estruturas físicas.

Esta projeção permite um planejamento mais criterioso e preciso da infra-estrutura urbana e uma alocação próxima da ótima dos recursos da comunidade. Além de ser a base para este planejamento, a projeção da estrutura espacial urbana fornece aos decisores da política de ocupação do solo dados para a elaboração de leis que disciplinem as tendências naturais urbanas, sem a imposição de políticas que se tornem insustentáveis, a longo prazo, pela pressão social.

Segundo Echenique (1974), a primeira tentativa de formalizar uma teoria de localização foi feita por Von Thünen, em 1826, com o modelo de localização de atividades agrícolas "The Isolated State", onde procurou equacionar o tipo de produto agrícola que deveria ser cultivado a uma certa distância do centro da cidade, em função dos custos de transportes, da renda da terra, da produtividade e do preço da venda do produto. O mesmo enfoque foi, posteriormente, aplicado à localização industrial por Weber em 1909. Dentro da mesma universalidade, Clark, em 1951, propôs um modelo simples e elegante para a localização residencial. A teoria econômica aplicada a sistemas urbanos surgiu com Lösch em 1933, e foi retomada em 1961 por Wingo, o qual propôs um modelo baseado no trabalho de Von Thünen, integrando detalhadamente os custos de transporte e explicando as densidades populacionais. Alonso, em 1964, e posteriormente Muth, em 1969, expandiram ainda mais este enfoque e condicionaram todo o modelo ao contexto da teoria do comportamento do consumidor, baseada na maximização da sua função utilidade.

Lowry no seu trabalho "Model of Metropolis" propõe, em 1964, um modelo que tem exercido grande influência nos trabalhos subsequentes. Para ele, uma vez definidas as atividades básicas (predominantemente exportadoras), pode-se prever a localização da população que, por sua vez, condiciona a localização dos serviços, gerando a necessidade de maiores contingentes populacionais que possibilitem a realimentação da localização residencial (Echenique, 1974).

Trabalhos que visam uma análise sistêmica da estrutura urbana estão sendo desenvolvidos no Projeto URBES, na Divisão de Engenharia de Sistemas no Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE (Manso e Barros, 1975).

A técnica de interpretação visual de fotos aéreas a baixa altitude possibilitou a elaboração de critérios para o fracionamento da cidade em zonas de ocupação homogênea. Este procedimento tornou possível a elaboração de modelos urbanos compactos, o que reduziu os custos de sua elaboração e simulação. As zonas Homogêneas (ZH) são identificadas através da análise do tecido urbano nas fotos aéreas, em escala aproximada de 1:10.000. A estes espaços físicos homogêneos de mesma textura urbana correspondem agrupamentos humanos coerentes sócio-culturalmente (Manso et alii, 1979).

## 2. O MODELO URBANO

Os trabalhos teóricos sobre modelagem urbana, citados na introdução, foram todos formulados para países onde o nível de urbanização mínimo dos novos loteamentos já compreende toda a infra-estrutura e os serviços, o que resulta, então, serem outras variáveis relevantes destes modelos, comparativamente às características dos países em desenvolvimento. Como exemplo, cita-se o trabalho realizado para a região da Baía de São Francisco, California (USA), por Stucker em 1972, cujo resultado mostrou ser a localização residencial um bem inferior, não-correlacionada com a renda ou com as características da estrutura urbana (Echenique, 1974).

A realidade brasileira mostra, no entanto, que a implantação da infra-estrutura e dos serviços não acompanha a expansão da área urbana, havendo, normalmente, defazagens de muitos anos, o que torna restrita a oferta de áreas com alto nível de urbanização, áreas estas somente acessíveis à população com altos níveis de renda.

O modelo proposto neste trabalho considera a localização domiciliar como um bem superior, dada as condições de infraestrutura urbana característica dos países em desenvolvimento. O embasamento teórico é a teoria do consumidor, enfocada de modo análogo a de Alonso, definindo a unidade familiar, UF, como elemento decisor que, na escolha de sua localização, avalia três variáveis: o padrão da habitação (H), o nível de urbanização (L) e outros bens não residenciais (X), tais como: carro, alimentação, vestuário, etc.

O decisor, neste processo de escolha, está sujeito à restrição da renda familiar (Y). Deste modo, a UF procurará maximizar a sua função de utilidade  $U = U(H, L, X)$ .

O desenvolvimento deste conceito (Dal Bianco e Bueno Netto Jr., 1980) fornece uma função de localização dada pela probabilidade conjunta condicional  $P(L_j, H_m | Y_n)$ , onde os índices  $j$ ,  $m$  e  $n$  indicam os estados discretos de cada variável. Esta função irá fornecer a probabilidade de demanda de localização das UFs. O ponto de equilíbrio será alcançado quando a demanda for igual à oferta de localização das UFs.

O modelo de oferta de localização residencial no espaço urbano adotado é o proposto por Clark (1951), o qual associa a população urbana na uma maior densidade no DCC (Distrito Comercial Central), que decresce para a periferia. Este fenômeno, segundo Clark, obedece a uma função exponencial negativa, cuja expressão matemática é:

$$D_x = D_o e^{-\beta x} \quad (1)$$

onde:

$D_x$  - densidade residencial à distância  $x$  do DCC.

$D_o$  - densidade residencial no DCC.

$\beta$  - parâmetro representativo da variação de densidade em direção à periferia.

A aplicação deste modelo só é possível se houver o cuidado de excluírem-se as áreas de uso institucional.

A localização das atividades não residenciais é equacionada em dois segmentos. O primeiro propõe a localização das atividades de comércio e serviços (N) como uma função tanto da acessibilidade (A) da população residente ao ponto comercial central, quanto do tamanho do estabelecimento (E) e do mercado potencial (M) existente, ou seja:

$$N = N(A, E, M)$$

A localização das indústrias é tratada como uma variável exógena, dada por leis de uso do solo.

Na Figura 1 tem-se o esquema do modelo proposto para a projeção da estrutura espacial, cuja descrição vem a seguir.

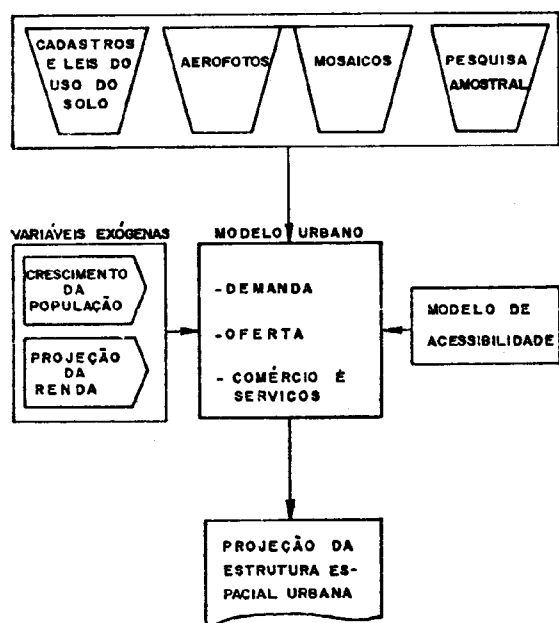


Fig. 1 - Modelo de projeção da estrutura espacial urbana.

## 2.1 - COLETA DE DADOS

Para a implementação do modelo escolheu-se a cidade de São José dos Campos, SP, cidade que, em 1978, contava com aproximadamente duzentos e quarenta mil habitantes.

Os dados de entrada para o modelo são de 3 tipos: a) aqueles conseguidos através de informações de cadastros e leis de zoneamento; b) aqueles fornecidos por pesquisa amostral de campo, e c) aqueles obtidos de aerofotos e mosaicos.

### 2.1.1 - CADASTRO E LEIS DE ZONEAMENTO

As informações obtidas de cadastros Predial e Territorial dão a localização das atuais residências já incorporadas à zona urbana. O cadastro de Imposto sobre serviços fornece a localização dos estabelecimentos por categoria e número de empregados.

Também são úteis aos modelos as informações dos consumidores de energia elétrica, bem como o número de alvarás de construção nos últimos anos, por bairros e tipo de atividade.

As leis de zoneamento são de grande importância para a projeção da estrutura urbana, pois são os meios que tem o poder público para normalizar a renovação e o crescimento urbano desordenados.

### 2.1.2 - PESQUISA AMOSTRAL

A pesquisa amostral foi executada para o levantamento de 43 variáveis características do perfil sócio-econômico dos moradores de uma dada ZH, do imóvel e da infra-estrutura desta zona urbana.

O método utilizado foi o da amostragem aleatória estratificada, com subamostragem, em dois estágios. Cada pesquisador recebia, ao sair em campo, um mapa da área a ser pesquisada, acompanhado de fotografia aérea, em escala de 1:10.000, na qual estavam demarcadas as quadras com o endereço completo da habitação a ser amostrada.

### 2.1.3 - AEROFOTOS E MOSAICOS

A fotografia aérea, com a indicação precisa da quadra a ser amostrada e das vias de acesso, foi um instrumental muito útil à pesquisa domiciliar e mostrou, indiretamente, a facilidade de seu uso também por leigos.

Esta pesquisa amostral foi simplificada pelo próprio uso das fotos aéreas, que possibilitaram a estratificação do espaço urbano em zonas de ocupação homogênea, o que permitiu, desta forma, a redução do número de elementos em cada amostra e uma compactação do número total de entrevistas realizadas na cidade, e em consequência, reduziu consideravelmente o custo da pesquisa.

A composição de várias fotos em um único fotograma, os mosaicos, também são de grande valia ao planejador urbano.

O mosaico, uma vez montado, fornece uma vi são panorâmica da cidade em estudo, numa esca la (geralmente igual à das fotos) que possibi lita a obtenção de dados e as análises que, de outra forma, seriam impossíveis, ou somente pos síveis com perda da qualidade e precisão.

Neste ponto, é importante ressaltar as van tagens do sensoriamento remoto no planejamento urbano. Graças aos mosaicos, podem ser feitos, além da citada definição das ZH, os seguintes estudos sobre a cidade:

- . eixos de desenvolvimento
- . obstáculos à urbanização
- . áreas em evolução
- . validação de modelos quantitativos
- . desequilíbrios setoriais
- . áreas de transição entre ZH
- . fontes geradoras de poluição
- . loteamentos clandestinos
- . loteamentos reservados para especulação
- . áreas verdes (preservação, aproveitamento).

A repetição de um mesmo estudo sobre mo saicos obtidos em épocas diferentes permite a elaboração de modelos analíticos "cross-section". Tais modelos possibilitam a análise temporal de variáveis relacionadas com o desenvolvimento da cidade e, conseqüentemente, a projeção des tas. Deste modo, a simulação do desenvolvimento urbano é mais facilmente realizada.

O método proposto neste trabalho permite o estudo do comportamento futuro da estrutura urbana, decorrente de hipóteses políticas (representadas no modelo por variáveis exógenas) adotadas em cada processo de simulação. Assim, após cada processo, ter-se-á uma estrutura urbana diferenciada, o que possibilita a análise da evolução sob cada uma das hipóteses iniciais.

Com relação às amplas possibilidades já mencionadas sobre o uso de mosaicos, são forne cidos, a seguir, detalhes da aplicação direta no modelo de evolução espacial aqui proposto.

Com relação aos eixos de desenvolvimento, a análise dos mosaicos de 1962, 1972 e 1977 re velou uma tendência de crescimento persistente em torno de eixos radiais, que partem do Distrito Comercial Central (DCC). A cidade deste mo do, foi dividida em setores radiais, cada um contendo um eixo, sem haver sobreposição entre eles. Para o traçado de um eixo tomam-se num sistema de eixos cartesianos, com centro no DCC, as densidades domiciliares de um setor radial e interpola-se uma reta passando pela origem, que será o eixo de desenvolvimento urbano.

Um eixo está quase sempre associado à acessi bilidade da região, compreendida pelo setor, ao DCC. O conjunto de eixos escolhidos deve ser imutável no tempo, para permitir à análise do pro cesso de evolução da cidade.

No processo de modelagem urbana deverão ser excluídas as áreas não-passíveis de urba nização, devido à topografia desfavorável ou a condições ambientais hostis ao assentamento de novas comunidades. O mosaico permite uma ava liação crítica global mais equilibrada dos pa râmetros do modelo, o que é difícil de se conse guir com outros meios, a não ser que se tenham dados históricos globais confiáveis e bem det alhados sobre a área urbana em estudo.

## 2.2 - VARIÁVEIS EXÓGENAS

O crescimento da população é obtido de pro jeções de organizações oficiais, ou pode ser calculada, usando-se o modelo geral de cre scimento populacional. A partir da população ini cial ( $P_0$ ), a população no ano  $t$  ( $P_t$ ), é dada pe la soma do componente vegetativo e do componen te migratório, ou seja:

$$P_t = P_0 e^{\int_0^t f(x) dx} + \sum_{y=c}^t I(y) e^{\int_y^t g(x) dx}$$

onde:

$f(x)$  = função de crescimento da população

$g(x)$  = função de crescimento dos saldos mi gratórios anuais

$I(y)$  = população migratória anual

A projeção da renda domiciliar é feita em duas fases: na primeira projeta-se o cre scimen to da renda média, a partir das expectativas de crescimento da renda nacional e da renda da mi cro região em estudo; na segunda projeta-se a distribuição relativa da renda entre os estra tos domiciliares, usando-se a curva de Lorenz, (Theil, 1971).

## 2.3 - MODELO DE ACESSIBILIDADE

As atividades de comércio e serviço cons tituem, em conjunto com a atividade industrial, o suporte econômico da população urbana.

Do ponto de vista dos usuários, a acessi bilidade e variedade dos produtos e dos servi ços constituem fatores de atração tão importan tes quanto a qualidade e o preço dos produtos.

Do ponto de vista do estabelecimento co mercial, uma boa localização é aquela que tem bom acesso a uma grande massa de clientes po tenciais.

Vê-se, deste modo, que a acessi bilidade é um fator importante para a localização de comér cio e serviços. Genericamente, pode-se afirmar que o número de estabelecimentos cresce com a acessi bilidade e decresce com o número de emp regados.

Para São José dos Campos, Silva (1977) con cluiu que o modelo gravitacional fornece me lhor ajuste à função de acessibilidade.

2.4 - IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS

A simulação do modelo foi executada usando-se a técnica de Monte-Carlo, pela qual é possível a implementação de modelos probabilísticos. Com base nas distribuições de probabilidades obtidas dos levantamentos amostrais, tem-se a faixa de renda do domicílio. A seguir, simulam-se as seleções do padrão de habitação (H) e do nível de urbanização (NU).

A interação entre a demanda e a oferta de espaço urbano é feita ao simular-se a decisão em eleger um dos eixos setoriais de desenvolvimento urbano para a localização da UF, em função do potencial de absorção de cada eixo ao nível desejado de urbanização da vizinhança.

A validação dos modelos aqui apresentados foi realizada, aplicando-os sobre a estrutura espacial urbana mostrada em mosaico de uma época anterior (15 anos atrás), do qual foram obtidos os valores de entrada, e simulando-se as condições exógenas condicionadoras da evolução urbana. A estrutura simulada resultante foi então comparada com a real, e obtiveram-se os desvios das projeções. A repetição deste processo forneceu a variância preditiva dos modelos.

3. CONCLUSÕES

A população urbana de São José dos Campos, em 1978, era da ordem de 240.000 habitantes. Inicialmente, foram analisadas fotos e mosaicos, determinando-se as zonas homogêneas e os eixos setoriais de desenvolvimento, mostrados na Figura 2. Com tais dados foi então

conduzida uma pesquisa amostral domiciliar (1549 domicílios amostrados) para determinação do perfil sócio-econômico de cada domicílio. O ajuste dos parâmetros dos modelos foi realizado usando-se mínimos quadrados e obtendo-se coeficientes de explicação da ordem de 0,70 considerados aceitáveis para o sistema em estudo.

A validação dos modelos foi fundamental e forneceu os dados para a projeção dos parâmetros do modelo de localização pela equação 1. A seguir, estes resultados são apresentados e comentados.

As curvas ajustadas correspondem à densidades médias para os valores obtidos pela contagem de domicílios nos mosaicos aerofotográficos de 1962, 1972 e 1977, abrangendo um período de 15 anos.

A análise dos parâmetros das equações (Tabela 1) mostra que a preferência pela localização de novos domicílios tende a se alternar de período a período, o que provoca oscilações na densidade de ocupação do solo. Os mosaicos da cidade, referentes aos anos de 1972 e 1977, foram comparados com a "reconstrução" da cidade a partir do mosaico de 1962, sendo observados desvios significativos (da ordem de 20%) apenas nas zonas de nível de urbanização mais alto, o que devido à pequena participação deste extrato no total da cidade, não chegou a alterar a configuração da projeção da realidade.

TABELA 1

EQUAÇÕES DAS CURVAS DE DENSIDADE POR EIXO SETORIAL DA CIDADE

EIXOS SETORIAIS \ ANO	1962	1972	1977
NORDESTE	$D_x = 30 e^{-0.35x}$	$D_x = 45 e^{-0.17x}$	$D_x = 45 e^{-0.29x}$
ESTE	$D_x = 13 e^{-0.20x}$	$D_x = 36 e^{-0.18x}$	$D_x = 40 e^{-0.11x}$
SUDESTE	$D_x = 14 e^{-0.26x}$	$D_x = 36 e^{-0.20x}$	$D_x = 45 e^{-0.14x}$
SUDOESTE	$D_x = 10 e^{-0.15x}$	$D_x = 36 e^{-0.14x}$	$D_x = 45 e^{-0.10x}$
OESTE SUDOESTE	$D_x = 16 e^{-0.23x}$	$D_x = 30 e^{-0.19x}$	$D_x = 54 e^{-0.19x}$
CIDADE/TOTAL	$D_x = 19 e^{-0.24x}$	$D_x = 33 e^{-0.15x}$	$D_x = 42 e^{-0.12x}$

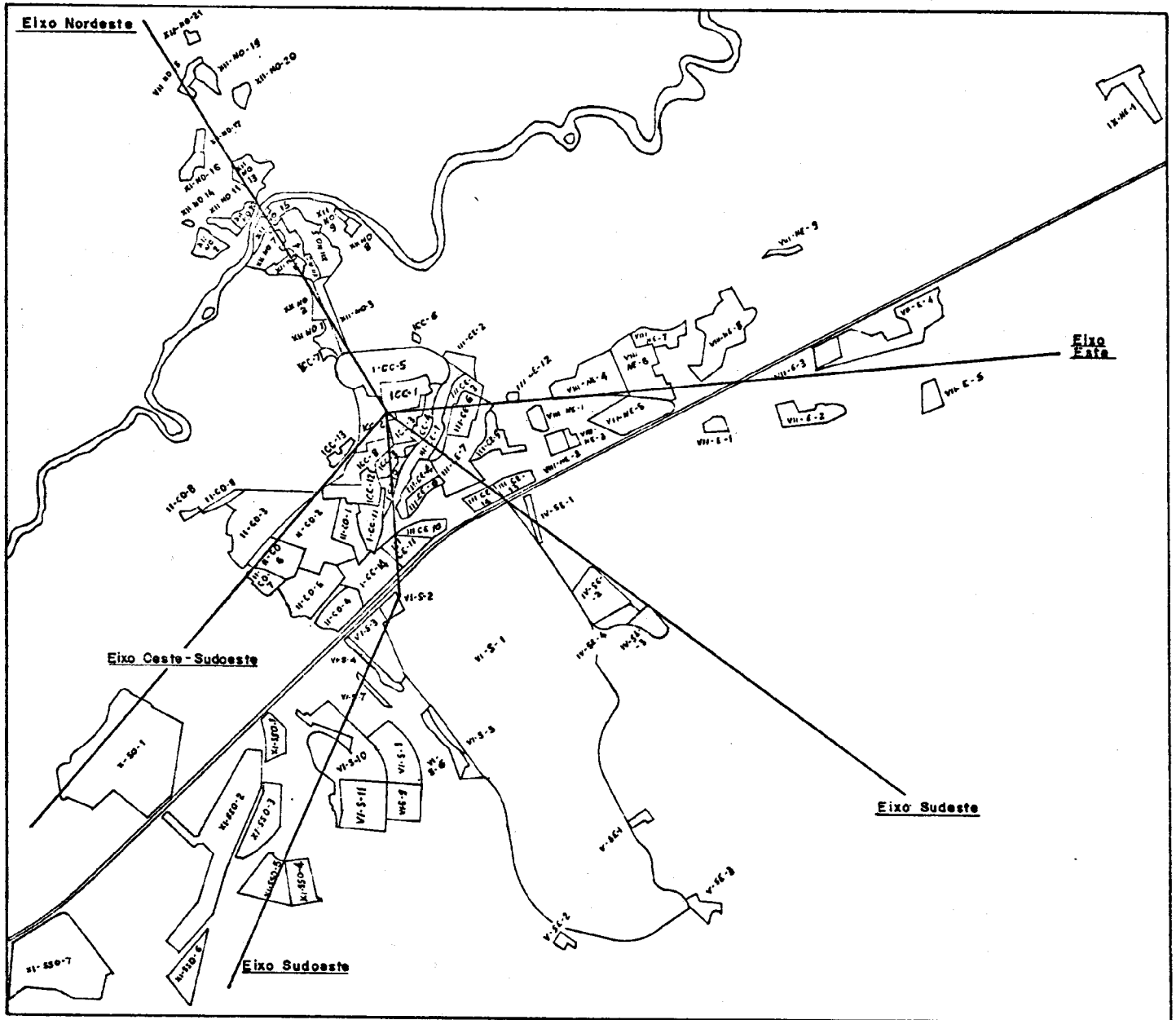


Fig. 2 - Mapa de Zonas Homôgenas e Eixos de Desenvolvimento.  
São José dos Campos - 1977

FONTE: Dal Bianco e Bueno Netto Jr. 1980.

Outro resultado importante foi o aparecimento, num período de 5 anos (1978 a 1983), de mais 10 zonas homogêneas, além das 99 existentes, para um crescimento de 35% da população. Estas novas ZHs correspondem a conjuntos habitacionais populares da periferia, exceto duas, que seriam de alto padrão. Tais resultados foram obtidos partindo-se da hipótese de que o perfil da distribuição de rendas não seria alterado.

Uma análise global dos resultados obtidos indicou uma consistência significativa entre as projeções obtidas pelos modelos e as expectativas de desenvolvimento da cidade. Em 1983 será possível uma verificação destas projeções.

Este modelo foi utilizado para o planejamento de centrais telefônicas urbanas de grande porte, porém pode ser utilizado para o planejamento de outras infra-estruturas urbanas (Dal Bianco e Bueno Netto Jr., 1980).

Finalmente o modelo não possui grandes limitações com relação ao tamanho de cidades a serem modeladas; porém sua aplicabilidade deve ser analisada pela complexidade dos dados exigidos.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CLARK, C. Urban population densities. *Journal of the Royal Statistical Society Series, A* 114 (2): 110 -116, 1951
- DAL BIANCO, D.; BUENO NETTO JR., O. *Um método para o planejamento de redes telefônicas urbanas de grande porte.* São José dos Campos, INPE, out. 1980. (INPE-1932-TDL/033).
- ECHENIQUE, M. History of regional and urban models. In: PERRATON, J.; BAXTER, R. *Models, Evolution and Information Systems for Planners, Pembroke College, Cambridge* July 3-7, 1972. Lancaster, MTP Construction, 1974. p. 31-46. (LUBFS Conference Proceedings, 1).
- MANSO, A.P.; BARROS, M.S.S. *Qualidade urbana: obtenção de dados de uma realidade e modelos para sua análise.* São José dos Campos, INPE, fev. 1975. (INPE-LAFE-608).
- MANSO, A.P.; BARROS, M.S.S.; OLIVEIRA, M.L.N. *Determinação de zonas homogêneas através de sensoriamento remoto.* São José dos Campos, INPE, abr. 1979. (INPE-1470-RPE/021).
- SILVA FILHO, J.F. *Discriminação entre modelos competitivos.* São José dos Campos, INPE, jul. 1977. (INPE-1077-TPT/051).
- THEIL, H. *Principles of econometrics.* New York, John Wiley, 1971.

