UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

PROCEDIMENTOS PARA TORNAR MAIS EFETIVO O USO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS EM PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

Engo CHARLIE WILLIAMS RENGIFO BOCANEGRA

Orientador: Prof. Associado Antônio Nélson Rodrigues da Silva

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração: Transportes.

São Carlos

2002

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca — EESC/USP

B664p

Bocanegra, Charlie Williams Rengifo

Procedimentos para tornar mais efetivo o uso das redes neurais artificiais em planejamento de transportes / Charlie Williams Rengifo Bocanegra. -- São Carlos, 2002.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.

Área: Transportes.

Orientador: Prof. Assoc. Antônio Nélson Rodrigues da Silva.

 Redes Neurais Artificiais. 2. Planejamento estratégico de transportes. 3. Acessibilidade. 4. Mobilidade. I. Título.

À minha família:

Meus pais, Doris e Willian, por terem me apoiado muito nos meus estudos, mesmo estando longe daqui;

Minha irmã, Karen, pelo total apoio, colaboração e ajuda dados desde o momento que surgiu em mim a idéia para prosseguir com meus estudos no Brasil.

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Ao Prof. Dr. Antônio Nélson Rodrigues da Silva, meu orientador, a pessoa que me deu a oportunidade de demonstrar que sou capaz de fazer coisas importantes, além de ser o grande motivador para meu trabalho;

Ao professor Eiji Kawamoto pela cessão dos dados da pesquisa O-D.

Aos Professores do Departamento de Transportes, que compartilharam seus conhecimentos de transportes e contribuíram em muito para meu desenvolvimento profissional;

A todos do pessoal administrativo do STT, que sempre me auxiliaram quando precisei de alguma ajuda com meus documentos, especialmente Heloisa, Beth, Lílian, Magaly, Suely;

Aos colegas do STT, especialmente: Pastor, Guilherme, Cida, Andréia, João Marcello, Laura, Ricardo, Rafael Moraes, Rafael Rorato, Mauro, Rômulo, Patrícia, Renato, Fabiana, Márcia, Marcos Vinícius, Adalberto, Alexandre, Adriana, e muitos outros, pela agradável convivência dentro e fora do departamento;

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Relevância do trabalho	2
1.2. Objetivos do trabalho	3
1.3. Estrutura do trabalho	3
2. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	4
2.1. Introdução	4
2.2. Histórico das Redes Neurais Artificiais	5
2.3. O neurônio artificial	7
2.4. Função de ativação	8
2.5. Topologia das Redes Neurais Artificiais	12
2.6. Tipos de treinamento	14
2.7. Redes Multilayer Perceptron	15
2.7.1. Noções gerais	16
2.7.2. Algoritmo de aprendizado para uma MLP	17
2.8. Aplicações das Redes Neurais Artificiais na engenharia de transportes	20
3. ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE	26
3.1. Acessibilidade	26
3.1.1. Indicadores de acessibilidade	27
3.2. Mobilidade	36
3.2.1. Indicadores de mobilidade	38
3.3 Avaliação conjunta de acessibilidade e mobilidade	39

4. MÉTODO	43
4.1. Abordagem adotada	43
4.1.1. Réplica da RNA treinada em planilha eletrônica	45
4.1.2. Réplica da RNA treinada através de um programa de computador	47
4.1.3. Desenvolvimento de ábacos	47
4.1.4. Introdução do modelo de RNA em um ambiente SIG	48
4.2. Obtenção de dados básicos	48
4.3. Atividades desenvolvidas	51
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	53
5.1. Avaliação dos modelos de Redes Neurais Artificiais	53
5.2. Réplica da RNA treinada em planilha eletrônica	57
5.3. Réplica da RNA treinada através de um programa de computador	68
5.4. Desenvolvimento de ábacos	69
5.5. Introdução do modelo de RNA em um ambiente SIG	75
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	79
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
8. LITERATURA CONSULTADA	92
ANEXO	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Modelo não linear de um neurônio, adaptado de HAYKIN (1994)	7
Figura 2.2:	Representação da função limiar	9
Figura 2.3:	Representação da função parcialmente linear	10
Figura 2.4:	Representação da função sigmóide	11
Figura 2.5:	Exemplo de uma RNA não recorrente	12
Figura 2.6:	Exemplo de uma RNA recorrente	13
Figura 2.7:	Arquitetura MLP com duas camadas intermediárias	16
Figura 2.8:	Ilustração das direções de propagação do sinal funcional e do erro	17
Figura 3.1:	Classificação dos indicadores de acessibilidade	29
Figura 3.2:	Relação entre mobilidade, acessibilidade e comportamento de	
	viagens, adaptado de JONES (1981) por RAIA JR. (2000)	41
Figura 4.1:	Sistema viário da cidade de Bauru, representado pelos eixos das	
	vias	49
Figura 4.2:	Setores censitários da cidade de Bauru, em 1996	50
Figura 4.3:	Distribuição dos domicílios pesquisados através da pesquisa O-D	
	de 1997	50
Figura 4.4:	Zonas de tráfego da cidade de Bauru para a pesquisa O-D de 1997	51
Figura 5.1:	Diversas arquiteturas de RNAs e os menores valores de EQM	
	para os conjuntos de validação (modelos com três e dez variáveis	
	de entrada)	55
Figura 5.2:	Relevância das variáveis de entrada no melhor modelo, segundo	
	GARSON (1991)	56
Figura 5.3:	Comparação dos melhores modelos originais de RAIA JR. (2000)	
	com aqueles obtidos nesta pesquisa	56

Figura 5.4:	Arquitetura da RNA selecionada	58
Figura 5.5:	Número de viagens reais versus estimadas obtidas tanto com o	
	software de Redes Neurais EasyNN como com o procedimento	
	em planilha eletrônica	59
Figura 5.6:	Interface com o usuário da planilha eletrônica desenvolvida	60
Figura 5.7:	Planilha eletrônica com as mensagens de alerta ao serem	
	ultrapassados os valores máximos das variáveis	63
Figura 5.8:	Variação da renda média mensal por domicílio, para diferentes	
	condições de acessibilidade (AC) e número de pessoas por	
	domicílio (NPD)	64
Figura 5.9:	Variação do número de pessoas por domicílio, para diferentes	
	condições de acessibilidade (AC) e renda média mensal por	
	domicílio (RMD)	65
Figura 5.10:	Variação do índice de acessibilidade (separação espacial média),	
	para diferentes condições de renda média mensal por domicílio	
	(RMD) e número de pessoas por domicílio (NPD)	66
Figura 5.11:	Tela do programa feito em Visual Basic visualizada pelo usuário	
	final	68
Figura 5.12:	Um exemplo de estimativa a partir do programa de computador	69
Figura 5.13:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com uma pessoa	70
Figura 5.14:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com duas pessoas	70
Figura 5.15:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com três pessoas	71
Figura 5.16:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com quatro pessoas	71
Figura 5.17:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com cinco pessoas	72
Figura 5.18:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com seis pessoas	72
Figura 5.19:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com sete pessoas	73

Figura 5.20:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com oito pessoas	73
Figura 5.21:	Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de	
	viagens geradas em domicílios com nove pessoas	74
Figura 5.22:	Macroregiões em que foram agregados os setores censitários para	
	fins de análise	76
Figura 5.23:	Relação entre as viagens estimadas após um incremento de 50%	
	na variável renda média domiciliar e aquelas viagens estimadas	
	originalmente	77
Figura 5.24:	Relação entre as viagens estimadas após um incremento de 30%	
	na variável número de pessoas por domicílio (para domicílios com	
	menos de 4 membros) e aquelas viagens estimadas originalmente	77
Figura 5.25:	Relação entre as viagens estimadas após incrementos de 50% na	
	variável renda média domiciliar e 30% na variável número de	
	pessoas por domicílio (para domicílios com menos de 4 membros)	
	e aquelas viagens estimadas originalmente	78

RESUMO

O objetivo deste trabalho é explorar procedimentos alternativos capazes de tornar mais efetiva a aplicação, em planejamento de transportes, de modelos desenvolvidos através de Redes Neurais Artificiais (RNA). Pensar, do ponto de vista prático, que um programa de computador seja imprescindível para a fase de treinamento da rede é aceitável, mas depender deste programa também para estimativas e simulações a partir da rede treinada é muito restritivo. Desta forma, o ideal seria obter instrumentos capazes de reproduzir, fora do *software* de RNA, o comportamento de redes treinadas, integrando a capacidade de predição das RNAs a outros ambientes e ferramentas. Isto ampliaria os recursos de diferentes ferramentas de planejamento, permitindo, por exemplo, análises de sensibilidade mais simples e diretas.

Este trabalho será baseado em um modelo já desenvolvido em outra pesquisa, na qual se treinou uma Rede Neural Artificial para estimar um Índice de Potencial de Viagens para planejamento estratégico de transportes. Trata-se de um caso típico em que, embora a rede treinada conduza a estimativas razoáveis de número de viagens por domicílio a partir de variáveis que caracterizam a mobilidade e a acessibilidade, não se pode realizar outras análises a partir dos resultados sem fazer uso do software em que a Rede Neural Artificial foi treinada e obviamente do arquivo com a rede já treinada. Daí a importância de desenvolver alternativas capazes de tornar mais efetivo o uso desse tipo de modelo. Dentre as alternativas aqui exploradas está a reprodução do modelo de RNA em uma planilha eletrônica, o desenvolvimento de um programa em Visual Basic, a construção de ábacos e a integração, de forma direta, do modelo de RNA a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para esse último caso, o modelo em ambiente SIG foi utilizado em uma aplicação na cidade de Bauru, a partir de dados agregados em zonas, onde se simulou alterações nos valores das variáveis de entrada, de forma a avaliar o seu impacto sobre as viagens estimadas em diferentes regiões da cidade. Todas as alternativas exploradas ilustram bem a ampliação das possibilidades de realização de análises de sensibilidade com os modelos de RNA, sobretudo quando combinados com os SIG, particularmente quando a localização dos valores estimados como saída é importante no contexto de análise e tomada de decisão. É importante destacar ainda que, além de permitir a condução de análises de sensibilidade, as alternativas apresentadas neste estudo podem, de certa forma, ajudar aos planejadores e tomadores de decisão a entender a lógica do modelo.

Palavras-chave: Redes Neurais Artificiais; planejamento estratégico de transportes, acessibilidade, mobilidade.

ABSTRACT

The objective of this work is to explore alternative procedures to make more effective the application of ANN (Artificial Neural Network) models in transportation planning. While the use of a specific computer program for training the networks is acceptable, the requirement of the same dedicated software also for predictions and simulations using the trained network is very restrictive from a practical point of view. An alternative to tackle this problem would be to reproduce the behavior of the trained ANN models out the training package through the integration of their estimation capabilities to other tools and environments. This could extend the resources of different planning tools, allowing, for instance, simpler and direct sensitivity analyses.

The present study is based on a model developed in previous research work, in which a particular ANN model has been developed to estimate a Trip Potential Index for transportation planning at a strategic level. This is a typical example of a model able to produce acceptable trip number estimations based on input variables associated to mobility and accessibility. Any further analyses, however, are usually dependent on the use of the same package used for training the network and the file with the trained network. This stresses the importance of developing alternatives to make more effective the use of this sort of model. Among the alternatives explored in this work are: the use of electronic spreadsheets, a computer program written in *Visual Basic*, graphs, and the direct integration of the ANN model into a Geographic Information System (GIS) commercial package. In the last case, the model in a GIS-environment has been used to run an application in the city of Bauru. Using data aggregated at the zonal level, changes in the input variables have been simulated in order to evaluate their impact on the trips estimated for different city regions. All alternatives explored here demonstrate the possibilities offered by the ANN models for sensitivity analyses. This is even more evident in the case of ANN models combined with GIS, particularly when the location of the predicted values is a relevant element in the analysis or decision making context. In addition, the procedures presented here may somehow help planners and decisionmakers in understanding the logic behind the models.

1. INTRODUÇÃO

A solução de diversos problemas de engenharia através de Redes Neurais Artificiais (RNAs) é bastante interessante, tanto pela forma como estes problemas são representados internamente pela rede, como também pelos resultados que gera, pois podem chegar a apresentar um desempenho superior ao dos modelos tradicionais, por exemplo, as análises de regressão. Em Redes Neurais Artificiais, o procedimento usual na solução de problemas passa inicialmente por uma fase de *aprendizagem*, em que um conjunto de exemplos é apresentado para a rede, que extrai automaticamente dos mesmos as características necessárias para representar a informação fornecida. Essas características são utilizadas posteriormente para gerar respostas a problemas com características similares às dos exemplos.

As possibilidades de *aprender* através de exemplos e de *generalizar* a informação aprendida são, sem dúvida, os atrativos principais na solução de problemas através de RNAs. A generalização, que está associada à capacidade da rede aprender através de um conjunto reduzido de exemplos e posteriormente dar respostas coerentes para dados não conhecidos, é uma demonstração de que a capacidade das Redes Neurais Artificiais vai muito além do que simplesmente mapear relações de entrada e saída. As Redes Neurais Artificiais são capazes de extrair informações não apresentadas de forma explícita, através dos exemplos.

No entanto, mesmo sendo razoavelmente conhecida em diversos ramos de atividades, somente nesta última década as Redes Neurais Artificiais passaram a ser utilizadas com mais freqüência na Engenharia de Transportes. De acordo com os resultados encontrados na literatura, desde então a técnica parece ter se mostrado adequada também para aplicações nesta área.

Os modelos construídos a partir de Redes Neurais Artificiais, no entanto, são em geral obscuros para o usuário final. Além de não ser fácil entender o processo de aprendizado, em que os dados de entrada tornam-se os resultados de saída, os "modelos" em geral dependem do *software* usado no processo de treinamento para produzir estimativas e simulações. Com os procedimentos propostos neste trabalho, espera-se poder aplicar efetivamente, em planejamento urbano e de transportes, modelos construídos com Redes Neurais Artificiais.

Uma vez concebidos e testados esses procedimentos, de forma a assegurar que a capacidade de predição dos modelos de RNAs não foi comprometida ao integrálos ou transferí-los para outro ambiente, os modelos podem ser então de fato explorados como ferramentas de análise, com forte apelo prático. Neste trabalho, como um exemplo do potencial desta integração de RNA com outros recursos computacionais, serão conduzidas análises de sensibilidade com a alteração dos valores das variáveis de entrada de um modelo elaborado por RAIA JR. (2000), destinado a estimar um Índice de Potencial de Viagens a partir de variáveis de mobilidade e acessibilidade. Além disso, o modelo de RNA será inserido em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica para promover estimativas de viagens de uma cidade inteira, de forma dinâmica.

1.1. Relevância do trabalho

A relevância deste trabalho de pesquisa está na oportunidade de se desenvolver novos métodos que possibilitem utilizar de forma mais direta e clara modelos gerados a partir de Redes Neurais Artificiais. O desenvolvimento de procedimentos que sejam capazes de aplicar de maneira efetiva modelos elaborados com Redes Neurais Artificiais facilitaria, aos planejadores e tomadores de decisão, a condução de análises sem exigir o *software* onde foi treinada a rede e, por conseguinte, dos arquivos da rede treinada. Esses fatos alentam a pesquisa e o desenvolvimento de novos métodos que possam ser utilizados no planejamento urbano e de transportes. Além disso, embora a aplicação do presente projeto seja específica para a área de transportes, alguns métodos a serem desenvolvidos poderão ser utilizados em outras áreas do conhecimento que empregam as Redes Neurais Artificiais.

1.2. Objetivos do trabalho

- Desenvolver procedimentos capazes de permitir a aplicação direta, em planejamento de transportes, de um modelo desenvolvido em Redes Neurais Artificiais
- Conduzir algumas análises a partir da alteração dos valores das variáveis de entrada do modelo considerado, verificando os impactos nos valores de saída estimados.
- Aplicar o modelo, já inserido em um Sistema de Informação Geográfica, para estimar viagens em uma cidade inteira.

1.3. Estrutura do Trabalho

Para atingir os objetivos propostos para o trabalho, dois eixos teóricos são fundamentais: um que trata da principal ferramenta explorada na pesquisa, que são as Redes Neurais Artificiais, e outro que trata da base conceitual do modelo que será utilizado para aplicação dos procedimentos propostos. Neste último aspecto, os conceitos de acessibilidade e mobilidade precisam então estar claros para o leitor. À luz destas considerações, este trabalho é composto por sete capítulos. O segundo capítulo é a primeira parte da revisão bibliográfica, apresentando uma breve introdução às Redes Neurais Artificiais e suas aplicações na área de transportes. O terceiro capítulo apresenta, por sua vez, alguns conceitos e indicadores de acessibilidade e mobilidade, que constituem os conceitos básicos para a compreensão do modelo explorado nesta pesquisa. No quarto capítulo é apresentado o método empregado para o desenvolvimento do trabalho: a preparação do material básico para dar início à aplicação em questão e a definição dos procedimentos desenvolvidos na seqüência.

No quinto capítulo são mostrados os resultados encontrados e, na sequência, são conduzidas algumas análises a eles relacionados. O sexto capítulo contém as conclusões mais importantes, assim como recomendações para trabalhos futuros. Finalmente, no sétimo capítulo, encontram-se as referências bibliográficas citadas ao longo desta dissertação.

2. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Este capítulo apresenta uma breve introdução sobre os conceitos básicos e um histórico das Redes Neurais Artificiais. Fala-se ainda sobre o neurônio artificial, sobre as diferentes funções de ativação e as diversas topologias das Redes Neurais Artificiais, além dos processos de treinamento. Também se apresenta neste capítulo a definição e noções gerais das redes *Multilayer Perceptron*, bem como o algoritmo de aprendizado utilizado por estas.

2.1. Introdução

As Redes Neurais Artificiais (RNAs), terminologia genérica que abrange uma grande quantidade de arquiteturas e paradigmas, têm como objetivo compreender o funcionamento do cérebro humano e, de alguma forma, procurar reproduzí-lo. Elas são compostas de um número grande de elementos de processamento, denominados neurônios (DOUGHERTY, 1995).

Segundo BRAGA *et al.* (1998) as Redes Neurais Artificiais são sistemas paralelos distribuídos, compostos por unidades de processamento simples (nós) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não-lineares). Essas unidades geralmente são conectadas por canais de comunicação que estão associados a determinado peso. As unidades fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento "inteligente" de uma Rede Neural Artificial vem das interações entre as unidades de processamento da rede.

As Redes Neurais Artificiais podem apresentar uma ou mais camadas intermediárias ou escondidas de neurônios. No tipo de rede denominada MLP (*Multilayer Perceptron*) pode-se, por exemplo, segundo CYBENKO (1989), implementar qualquer função contínua em uma rede com uma camada intermediária. Já

a utilização de duas camadas intermediárias permite a aproximação de qualquer função (CYBENKO, 1988).

Do ponto de vista prático, as RNAs tem como vantagem o fato de não necessitar de conhecimentos de especialistas para tomar decisões; elas se baseiam unicamente nos exemplos que lhes são fornecidos: não é necessário informar porque tal situação resultou em tal decisão no passado, ou porque tal decisão resultou em tal consequência.

As RNAs podem ser utilizadas na solução de uma grande quantidade de problemas encontrados nas mais diversas áreas de aplicação: classificação, diagnóstico, análise de sinais e de imagens, otimização e controle. As redes têm se mostrado de fácil implementação e robustas no tratamento de dados com ruídos. São eficientes, particularmente, na resolução de problemas em que não se tem formulação analítica, não se tem conhecimento explícito acessível, os dados estão contaminados por ruídos e/ou o próprio problema modifica-se com o passar do tempo (OLIVEIRA, 2000).

Dependendo do tipo de problema ao qual são submetidas, as RNAs têm apresentado um desempenho considerado superior aos métodos estatísticos utilizados para o mesmo fim (FALAS, 1995). SUBRAMANIAN *et al.* (1993), por exemplo, desenvolveram uma pesquisa onde compararam as Redes Neurais com determinados métodos estatísticos de classificação. Concluíram, nas diversas circunstâncias estudadas, incluindo pequenos tamanhos de amostras e funções de maior complexidade, que as RNAs apresentaram melhores soluções.

2.2. Histórico das Redes Neurais Artificiais

A história das Redes Neurais Artificiais é relativamente recente. Conta com pouco mais de meio século, se considerarmos como pioneiros os trabalhos dos neurofisiologistas Donald Hebb e Karl Lashley, por volta de 1940, quando as primeiras simulações foram feitas com papel e lápis (LOESCH & SARI, 1996). No artigo clássico intitulado *A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity* (Um cálculo lógico das idéias imanentes na atividade nervosa), publicado em 1943, McCulloch e Pitts propuseram um modelo simplificado de neurônios biológicos. O modelo baseia-se no fato de que, em dado instante de tempo, o neurônio ou está ativo ou está inativo (LOESCH & SARI, 1996). O trabalho de McCulloch e Pitts propiciou uma rápida

disseminação do entendimento de possíveis modelos neurais, atraindo e influenciando muitos pesquisadores famosos.

Rossenblatt, em seu livro *Principles of neurodynamics* (Princípios da neurodinâmica), em 1958, forneceu várias idéias a respeito dos *Perceptrons*, que são modelos de neurônios baseados nos conceitos de McCulloch e Pitts (LOESCH & SARI, 1996). Uma das principais idéias de Rosenblatt foi a elaboração da arquitetura *back-coupled Perceptron* e do algoritmo *back-coupled error correction algorithm* (algoritmo de correção do erro *back-coupled*), que é capaz da adaptar os pesos de um conjunto de entradas de uma unidade de associação de acordo com uma saída desejada.

Widrow e Hoff desenvolveram o ADALINE (*ADAptive LINear Element*) e o MADALINE (*Many* ADALINE) *Perceptron* como dispositivos práticos para resolver tarefas de reconhecimento de padrões. O ADALINE/MADALINE usou saídas analógicas ao invés das binárias originalmente propostas por McCulloch e Pitts.

Minsky e Papert fizeram um estudo cuidadoso desses algoritmos e publicaram, em 1969, seu livro *Perceptrons*. Provaram formalmente que uma rede formada de uma única camada de neurônios, independente do algoritmo de aprendizagem, é capaz de resolver o problema de associação de padrões apenas quando os conjuntos são linearmente separáveis. Estes resultados e observações feitas por Minsky e Papert foram devastadores, e a abordagem conexionista ficou relegada a um plano secundário durante toda a década de 70 e início da década de 80.

A impotência das redes *perceptron* na resolução do problema de associação de padrões para um conjunto de padrões não-linear foi eliminada por Rumelhart, Hinton e Willians. A solução encontrada foi a *Regra Delta Generalizada*, mais conhecida como *Algoritmo de Correção de Erros de Retropropagação*, em 1986, para redes *Perceptron* de várias camadas de neurônios, com entradas e saídas analógicas.

Essas Redes Neurais com várias camadas (*Multilayer Perceptron*) são majoritariamente indicadas como ferramenta de análise devido à sua elevada capacidade de reconhecimento de padrões. Sendo que até aqui se falou sobre o histórico das Redes Neurais, faz-se agora necessário um esclarecimento dos componentes envolvidos nestas, a partir do seu elemento fundamental: o neurônio artificial, que é de certa forma baseado no funcionamento do neurônio biológico (ver BRONDINO, 1999, e RAIA JR, 2000).

2.3. O Neurônio Artificial

O Neurônio Artificial é a unidade fundamental de processamento de uma RNA, o qual recebe uma ou mais entradas, transformando-as em saídas. Segundo TUBB (1993) cada entrada tem um peso associado, que determina sua intensidade. O esquema de neurônio artificial pode ser visualizado na Figura 2.1.

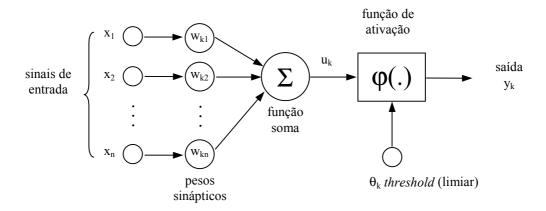


Figura 2.1: Modelo não linear de um neurônio; adaptado de HAYKIN (1994).

Com base na figura 2.1 é possível distinguir alguns elementos considerados importantes na estrutura de um neurônio:

- Sinapses, caracterizadas por um peso (w), que pode representar a sua intensidade. O papel do peso w_{kj} é multiplicar o sinal x_j na entrada da sinapse j, conectada a um neurônio k. O peso w_{kj} é positivo se a sinapse associada é excitatória e negativo se a sinapse associada é inibitória;
- Somatório, adiciona as entradas ponderadas pelos seus pesos respectivos, ou seja,

$$u_k = \sum_{j=1}^n w_{kj} x_j (2.1)$$

limiar (threshold), θ_k, tem um papel determinante na saída de neurônio. Sua função é controlar a intensidade da função de ativação para se obter o desempenho desejado na rede. Se o valor de u_k for menor que este limiar, então, a saída do neurônio fica inibida. Caso contrário, o neurônio fica ativo;

- função de ativação, que funciona como um limitante à amplitude da saída do neurônio, ou seja, a entrada é normalizada dentro de um intervalo fechado, geralmente [0,1] ou [-1,1];
- saída do neurônio, *y_k*, sendo:

$$y_k = \varphi \left(u_k - \theta_k \right) \tag{2.2}$$

onde φ é a função de ativação.

A seguir, são apresentados alguns tipos de função de ativação.

2.4. Função de Ativação

Segundo HAYKIN (1994), a função de ativação denotada por ϕ (.) define a saída de um neurônio de acordo com o nível de atividade da sua entrada. Ele mesmo identifica três tipos básicos de função de ativação:

1. Função Limiar - para este tipo de função de ativação, mostrada na figura 2.2, tem-se que:

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \ge 0 \\ 0 & \text{se } v < 0 \end{cases}$$
 (2.3)

Correspondentemente, a saída do neurônio k que utiliza a função limiar é expressa como:

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{se } v_k \ge 0 \\ 0 & \text{se } v_k < 0 \end{cases}$$
 (2.4)

Onde v_k é o nível de atividade interna do neurônio; isto é,

$$v_{k} = \sum_{j=1}^{p} w_{kj} x_{j} - \theta_{k}$$
 (2.5)

Tal neurônio é citado na literatura como o modelo McCulloch-Pitts, em reconhecimento ao trabalho pioneiro feito por McCulloch e Pitts no ano de 1943. Neste modelo, a saída do neurônio recebe o valor de 1 se o nível total de atividade interna desse neurônio é não negativo, e 0 se é o contrário.

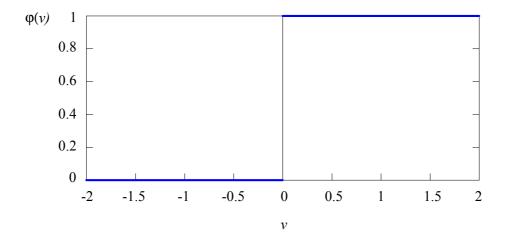


Figura 2.2: Representação da função limiar.

2. Função Parcialmente Linear - no caso desta função, representada graficamente na figura 2.3, utiliza-se um valor unitário para apresentar o fator de graduação do sinal de saída em uma região de comportamento linear. Excluindo esta região, a função assume características similares a Função Limiar.

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \ge 1/2 \\ v + 1/2 & \text{se } -1/2 < v < 1/2 \\ 0 & \text{se } v \le -1/2 \end{cases}$$
 (2.6)

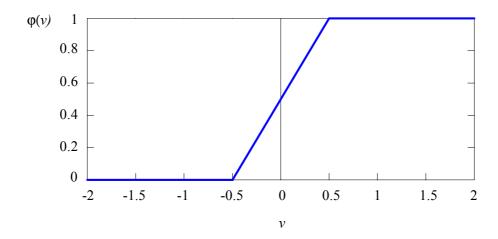


Figura 2.3: Representação da função parcialmente linear.

3. Função Sigmóide - esta é para muitos a forma mais comum de função de ativação usada na construção de Redes Neurais Artificiais. É definida como uma função de caráter estritamente crescente, que mostra propriedades homogêneas e assintóticas. Um exemplo é a função logística, definida por:

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + exp(-av)} \tag{2.7}$$

onde *a* é o parâmetro de inclinação da Função Sigmóide. Variando o parâmetro *a*, são obtidas funções sigmóides de diferentes inclinações, como ilustrado na figura 2.4. No limite, o parâmetro de inclinação se aproxima tanto do infinito, que a Função Sigmóide torna-se uma Função Limiar. Enquanto que uma função limiar assume o valor de 0 ou 1, uma função sigmóide assume valores em uma faixa contínua entre 0 e 1. Além disso, a função sigmóide é diferenciável, enquanto que a função limiar não.

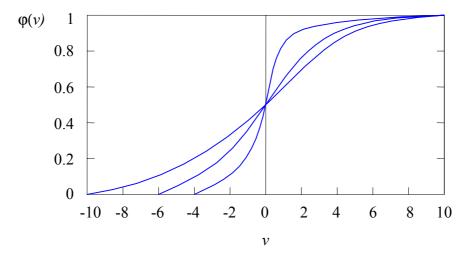


Figura 2.4: Representação da função sigmóide.

As funções de ativação definidas nas equações (2.3), (2.6) e (2.7) estão na faixa de 0 a 1. Algumas vezes é desejável ter a faixa da função de intervalo de -1 a 1, caso em que a função de ativação assume uma forma anti-simétrica com respeito à origem. Especificamente, a Função Limiar da equação (2.3) pode ser redefinida como em (2.8), geralmente citada como Função Signo.

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1 & \text{se } v > 0 \\ 0 & \text{se } v = 0 \\ -1 & \text{se } v < 0 \end{cases}$$
 (2.8)

No caso da Função Sigmóide, a equação (2.7) pode ser substituída pela Função Tangente Hiperbólica, definida como em (2.9).

$$\varphi(v) = tg\left(\frac{v}{2}\right) = \frac{1 - exp(-v)}{1 + exp(-v)}$$
(2.9)

Assim como a Função Logística, a Função Tangente Hiperbólica também pode assumir valores unipolares (0 e 1) ou bipolares (-1, 1). A diferença entre estes dois tipos de função está no fato de que a Função Hiperbólica se trata de uma Função Logística Modificada.

2.5. Topologias de Redes Neurais Artificiais

As várias topologias de redes neurais podem ser agrupadas, basicamente, em duas classes:

- Não-Recorrentes
- Recorrentes

As RNAs não-recorrentes são aquelas que não possuem realimentação de suas saídas para suas entradas e por isso são também ditas "sem memória". A estrutura das RNAs ditas não-recorrentes é em camadas, podendo estas RNAs serem formadas por uma (RNA de camada única) ou mais camadas (RNA multicamadas). Redes Neurais Multicamadas contêm um conjunto de neurônios de entrada, uma camada de saída e uma ou mais camadas escondidas. Segundo WASSERMAN (1989) a entrada não é considerada uma camada da rede, pelo fato de apenas distribuir os padrões. A camada com os neurônios que fornecem a saída da rede é chamada camada de saída. Na figura 2.5 é apresentado um exemplo de uma RNA não recorrente.

As RNAs de uma só camada, também chamadas de "perceptrons" (segundo HERTZ *et al.*, 1991), não serão tratadas neste trabalho, por possuírem um espectro limitado de representações. As Redes Neurais Multicamadas, por suprirem as deficiências das redes de uma única camada, são utilizadas neste trabalho e serão estudadas com mais detalhes na seção 2.7.

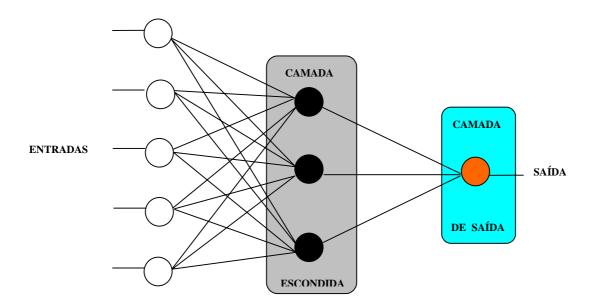


Figura 2.5: Exemplo de uma RNA não recorrente.

As RNAs recorrentes são redes mais gerais, que contêm realimentação das saídas para as entradas, sendo suas saídas determinadas pelas entradas atuais e pelas saídas anteriores. Além disso, suas estruturas não são obrigatoriamente organizadas em camadas. Quando o são, estas redes podem possuir interligações entre neurônios da mesma camada e entre camadas não consecutivas, gerando interconexões bem mais complexas que as RNAs não-recorrentes, como mostrado na figura 2.6.

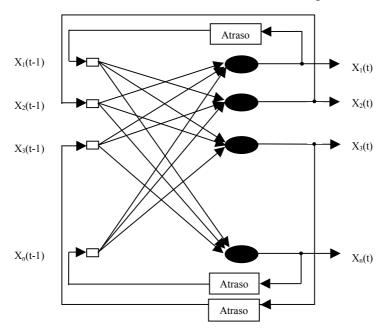


Figura 2.6: Exemplo de uma RNA recorrente.

Nas RNAs recorrentes os neurônios têm conexões com eles mesmos e com outros neurônios, excitadores ou inibidores. Depois de um certo intercâmbio de sinais, os neurônios que têm uma saída ativa ganham e permitem aos neurônios do seu mesmo grupo atualizar seus pesos. Para as redes estáveis, este processo é repetido várias vezes, produzindo pequenas mudanças nas saídas, até estas ficarem constantes. Ainda, as RNAs recorrentes nem sempre são estáveis, mesmo com entradas constantes. O fato de não se conseguir prever quais redes seriam estáveis foi um problema que preocupou os pesquisadores até o início da década de 80, quando Cohen e Grossberg provaram um teorema para definir quando as RNAs eram estáveis (WASSERMANN, 1989). Este teorema determina que para as RNAs recorrentes alcançarem um estado estável é necessário que possuam conexões simétricas. Contribuições importantes também foram dadas por HOPFIELD (1984), tanto para a teoria como para a prática, sendo que algumas configurações passaram a ser chamadas de redes de Hopfield, em sua

homenagem. HINTON & SEJNOWSKI (1986) também tiveram méritos neste campo, introduzindo regras gerais de treinamento para redes, denominadas por eles de máquina de Boltzmann, devido ao cálculo das saídas dos neurônios artificiais ser efetuado através de probabilidades segundo a distribuição de Boltzmann.

2.6. Tipos de Treinamento

De todas as propriedades interessantes das Redes Neurais Artificiais, nenhuma "captura" tão bem uma característica humana como a habilidade de aprender. Ao invés de especificar todos os detalhes de uma computação, tem-se a possibilidade de treinar uma rede para fazer esta computação. Isto significa que se pode tratar problemas onde regras apropriadas são muito difíceis de se conhecer a priori. O objetivo do treinamento de uma RNA é fazer com que a aplicação de um conjunto de entradas produza um conjunto de saídas desejado ou no mínimo um conjunto de saídas consistentes. Cada conjunto de entrada ou saída é chamado de vetor.

O treinamento é realizado pela aplicação seqüencial dos vetores de entradas (e em alguns casos também os de saída), enquanto os pesos da rede são ajustados de acordo com um procedimento de treinamento pré-determinado. Durante o treinamento, os pesos da rede gradualmente convergem para determinados valores, de maneira tal que a aplicação dos vetores de entrada produza as saídas necessárias. Os procedimentos de treinamento que levam as RNAs a aprender determinadas tarefas podem ser classificados em duas classes de treinamento:

- Supervisionado
- Não Supervisionado

O treinamento *supervisionado* necessita de um par de vetores composto do vetor de entrada e do vetor alvo que se deseja como saída. Juntos, estes vetores são chamados de par de treinamento ou vetor de treinamento, sendo interessante ressaltar que geralmente a rede é treinada com vários vetores de treinamento.

O procedimento de treinamento funciona da seguinte forma: o vetor de entrada é aplicado. A saída da rede é calculada e comparada com o correspondente vetor alvo. O erro encontrado é então realimentado através da rede e os pesos são atualizados de acordo com um algoritmo determinado a fim de minimizar este erro. Este processo

de treinamento é repetido até que o erro para os vetores de treinamento tenha alcançado níveis bem baixos.

O treinamento *não supervisiona*do, por sua vez, não requer vetor alvo para as saídas e, obviamente, não faz comparações para determinar a resposta ideal. O conjunto de treinamento modifica os pesos da rede de forma a produzir saídas que sejam consistentes, isto é, tanto a apresentação de um dos vetores de treinamento, como a apresentação de um vetor que é suficientemente similar, irão produzir o mesmo padrão nas saídas. O processo de treinamento extrai as propriedades estatísticas do conjunto de treinamento e agrupa os vetores similares em classes. A aplicação de um vetor de uma determinada classe à entrada da rede irá produzir um vetor de saída específico, mas não existe maneira de se determinar, antes do treinamento, qual o padrão que será produzido na saída para um vetor de entrada de uma determinada classe. Desta forma, a saída de algumas RNAs deve ser transformada em uma forma compreensível após o processo de treinamento, o que é um simples problema de identificação das relações entrada-saída estabelecidas pela rede.

No que diz respeito aos algoritmos de treinamento usados, existe uma grande variedade, tanto para o treinamento supervisionado, como para o não supervisionado. Entre esses, um dos mais difundidos com certeza é o algoritmo utilizado neste trabalho, conhecido por algoritmo *backpropagation* (retro-propagação).

2.7. Redes Multilayer Perceptron

As arquiteturas do tipo *perceptron* de múltiplas camadas (MLP) constituem os modelos neurais artificiais mais utilizados e conhecidos atualmente. Tipicamente, esta arquitetura consiste de um conjunto de unidades sensoriais que formam uma camada de entrada, uma ou mais camadas intermediárias (ou escondidas) de unidades computacionais e uma camada de saída. Os sinais de entrada são propagados camada a camada pela rede em uma direção positiva, ou seja, da entrada para a saída. Esta arquitetura representa uma generalização do *perceptron* apresentado anteriormente

As redes do tipo MLP tem sido utilizadas com sucesso para a solução de vários problemas envolvendo altos graus de não-linearidade. Seu treinamento é do tipo supervisionado e utiliza um algoritmo muito popular chamado retro-propagação do erro

(error backpropagation). Este algoritmo é baseado numa regra de aprendizagem que "corrige" o erro durante o treinamento (HAYKIN, 1994).

Basicamente, o processo de retro-propagação do erro é constituído de duas fases: uma fase de propagação do sinal funcional (feedforward) e uma de retro-propagação do erro (backpropagation). Na fase positiva, os vetores de dados são aplicados às unidades de entrada, e seu efeito se propaga pela rede, camada a camada. Finalmente, um conjunto de saídas é produzido como resposta da rede. Durante a fase positiva, os pesos das conexões são mantidos fixos. Na retro-propagação do erro, por outro lado, os pesos são ajustados de acordo com uma regra de correção do erro. Especificamente, a resposta da rede em um instante de tempo é subtraída da saída desejada (target) para produzir um sinal de erro. Este sinal de erro é propagado da saída para a entrada, camada a camada, originando o nome "retro-propagação do erro". Os pesos são ajustados de forma que a "distância" entre a resposta da rede e a resposta desejada seja reduzida.

2.7.1. Noções Gerais

A figura 2.7 apresenta uma arquitetura do tipo MLP com duas camadas intermediárias. A rede apresentada aqui possui todas as conexões, o que significa que um neurônio em qualquer camada da rede está conectado a todas as outras unidades (neurônios) na camada anterior. O fluxo de sinais através da rede é feito positivamente, da esquerda para a direita, camada a camada.

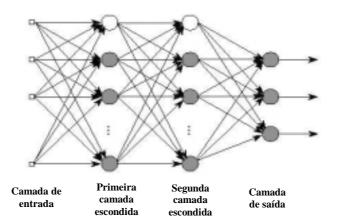


Figura 2.7: Arquitetura MLP com duas camadas intermediárias.

A figura 2.8 mostra apenas uma parte da rede. Nesta rede, dois tipos de sinais podem ser identificados:

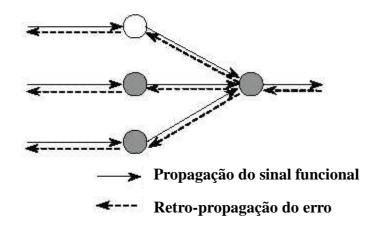


Figura 2.8: Ilustração das direções de propagação do sinal funcional e do erro.

- Sinal funcional: um sinal funcional é um sinal de entrada (estímulo) que chega na entrada e é propagado positivamente (neurônio a neurônio) através da rede, e aparece na saída como um sinal de saída.
- *Sinal de err*o: os sinais de erro originam-se nas saídas e são retro-propagados (neurônio a neurônio) através da rede.

A camada de entrada geralmente é composta por neurônios sensoriais, ou seja, unidades que não modificam os sinais externos, apenas os distribuem para a primeira camada intermediária. As unidades de saída constituem a camada de saída da rede e as demais unidades constituem as camadas intermediárias. As camadas intermediárias são todas aquelas que não fazem parte da entrada e nem da saída.

Cada unidade intermediária ou de saída é responsável por duas tarefas:

- Calcular o sinal na saída da unidade, que geralmente é expresso como uma função não-linear do sinal de entrada e pesos sinápticos associados; e
- Calcular uma estimativa instantânea do vetor gradiente, que é necessário para a retro-propagação do erro através da rede.

2.7.2. Algoritmo de Aprendizado para uma rede MLP

A regra de aprendizado utilizada para treinar uma rede *Multilayer Perceptron* é denominada Regra Delta Generalizada ou, mais comumente, *backpropagation*, já discutida

anteriormente. Segundo HERTZ *et al.* (1991) o algoritmo *backpropagation* é primordial para muitos trabalhos atuais sobre aprendizado em redes neurais.

O treinamento usando esta regra consiste em fornecer à rede um conjunto de pares de entradas e saídas, onde a cada entrada do treinamento tem-se uma saída desejada. Este algoritmo é um método de gradiente descendente, que não garante chegar ao mínimo erro global, e que pode ser dividido em 5 passos segundo FILHO *et al.*¹ *apud* BREGA (1996):

Passo 1: Apresente um padrão de entrada e a saída desejada.

Utilizando uma determinada estratégia de apresentação coloque um dos padrões de entrada na camada de entrada e saída desejada nas suas respectivas camadas, então ative o passo *calcule saída*.

• Passo 2: Calcule saída

A partir da primeira camada, permita que cada camada produza os valores de saída até atingir a camada de saída e, então ative o passo *ajuste pesos da camada de saída*.

Passo 3: Ajuste dos pesos da camada de saída

Para cada neurônio j da camada de saída, atualize todos os pesos w_{ij} conforme equação 2.10, então ative o passo *ajuste pesos das camadas escondidas*.

$$\Delta w_{ij} = \eta \delta_i o_i \tag{2.10}$$

onde:

η: taxa de aprendizado

o_i: saída do neurônio

¹ FILHO, E.C.B.C.; LUDERMIR, T.B.; JUNIOR, W.R.O.; FRANÇA, F.G. (1994) *Minicurso: modelagem, aplicações e implementações de redes neurais*. I Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Itajubá, MG.

 δ_j : diferença (erro) entre a saída computada e a saída desejada do neurônio j, que pode ser calculada segundo equação 2.11:

$$\delta_{i} = o_{i} (d_{i} - o_{i}) (1 - o_{i})$$
(2.11)

Onde:

d_i: saída desejada de n_i

Passo 4: Ajuste de pesos das camadas escondidas

Para ajustar os pesos de todas as camadas escondidas, atualize o peso w_{ki} de um neurônio n_i de uma camada escondida que está ligado a outro neurônio n_k na camada anterior conforme equação 2.12

$$\Delta w_{ki} = \eta \, \delta/i \, o_k \tag{2.12}$$

Onde:

η: taxa de aprendizagem

δ/i: erro relativo do neurônio n_i, dado pela equação 2.13

$$\delta/i = o_i (1 - o_i) \sum w_{ii} \delta_i$$
 (2.13)

 o_k : saída do n_k , que estimula n_i via w_{ki}

Depois que todas as conexões tenham sido ajustadas ative o passo *cheque* magnitude do erro.

• Passo 5: Cheque magnitude do erro

Para se checar a magnitude o erro, pode-se adotar várias estratégias diferenciadas quanto à forma de aceitar o erro como desprezível. Uma regra muito comum é verificar se o erro global de saída da rede em relação à saída desejada é menor que um dado erro predefinido. Se a condição adotada é satisfeita, então a rede aprendeu o conjunto de treinamento, caso contrário volte a ativar o passo *apresente um padrão de entrada e a saída desejada*.

• Fim do algoritmo

Este algoritmo pode ser utilizado em uma arquitetura com qualquer número de camadas. O passo 4 deve ser ativado recursivamente até atingir a camada de entrada. Para se aumentar a velocidade de convergência é possível introduzir na equação (2.11) um multiplicador chamado de *momentum*, onde este valor representa o efeito dos ajustes anteriores no ajuste atual.

2.8. Aplicações das Redes Neurais Artificiais na Engenharia de Transportes

Para sistematizar as aplicações das Redes Neurais na Engenharia de Transportes foi adotada neste trabalho a classificação proposta por FAGHRI & HUA (1992a). Segundo eles, os problemas de transporte podem ser divididos em quatro categorias: planejamento, operação e controle, administração e finanças, e construção e manutenção. É com base nestes grupos que são descritas a seguir algumas aplicações encontradas na literatura.

Planejamento

O planejamento de transportes envolve a identificação de ações que podem ser implementadas para se atingir um conjunto de objetivos dados. A previsão de tráfego é o principal ponto abordado neste setor. Existem aplicações de RNA envolvendo os seguintes aspectos:

Geração e Distribuição de Viagens

FAGHRI & HUA (1992b) estabeleceram um modelo de geração de viagens com a utilização de dez indicadores socioeconômicos. KIKUCHI *et al.* (1993) empregaram as RNAs para determinar uma matriz O-D considerando as relações de causa-efeito quando muitos grupos de dados, para a causa e o efeito, são avaliados. Já CHIN *et al.* (1994) geraram uma matriz O-D com base no volume de tráfego observado em uma rotatória e suas aproximações para três horários de pico diários. FAGHRI & ANEJA (1996) propuseram a utilização das RNAs na estimativa de geração de viagens com base no princípio de que a decisão humana é inerentemente não linear.

NIJKAMP *et al.* (1996) apresentaram um estudo onde desenvolvem análises comparativas entre o Modelo Logit e Redes Neurais, para a modelagem do

fluxo de viagens interurbanas na Itália. SHMUELI *et al.* (1996), por sua vez, exploraram a aplicação de RNAs na avaliação de ferramentas para previsão de viagens, comparando o padrão de viagens entre homens e mulheres, em Israel. MOZOLIN *et al.* (2000) fizeram uma comparação entre a previsão de distribuição de viagens feita com Redes Neurais e usando o Modelo de Máxima Verossimilhança Duplamente Restringido.

RAIA JR. (2000) utilizou as RNAs e Sistemas de Informação Geográfica para estimar um índice de potencial de viagens utilizando variáveis de acessibilidade e mobilidade. Já DANTAS *et al.* (2000) integraram as RNAs, os Sistemas de Informação Geográfica e Sensoriamento Remoto para a previsão da demanda de viagens no contexto do planejamento estratégico. RUIZ & MEDINA (2000), por sua vez, utilizaram as RNAs para obter modelos de geração de viagens e compará-los com os modelos obtidos através de regressão linear múltipla.

• Sistemas de Transporte

HUA & FAGHRI (1994) utilizaram RNAs para estimar tempos de viagem considerando três condições observadas em rodovias "inteligentes": condição normal, bloqueio da faixa esquerda e bloqueio da faixa direita.

VITELA et al. (1996) propuseram RNA para controlar distâncias entre veículos em sistemas de transporte "inteligentes". Já VUKADINOVIC et al. (1996) desenvolveram, com ajuda das RNAs, um sistema de apoio à decisão para poder diminuir a carga de trabalho dos despachantes que realizam o controle do tráfego no sistema de trens suburbanos da cidade de Belgrado, Iugoslávia. O trabalho de WERMERSCH & KAWAMOTO (1999) estudou a viabilidade de caracterizar o comportamento dos usuários dos sistemas de transportes em relação ao modo de viagem. MARTINELLI & TENG (1996) usaram RNAs para otimizar as operações de trens.

Reconhecimento e Contagem de Tráfego

BULLOCK *et al.* (1993) aplicaram RNAs como método de detecção de veículos para efeito de contagem.

• Projetos de Transporte

FURTADO (1998) apresentou uma nova abordagem na análise de projetos de transporte, usando as RNAs como técnica para avaliar e ordenar alternativas.

Operação e Controle

Envolve a identificação de ações que tratam de problemas relacionados com o tráfego rodoviário (diagnóstico e controle), transporte de materiais perigosos, controle de tráfego aéreo e operações com semáforos. Os seguintes trabalhos foram encontrados:

Controle de Semáforos

Um dos primeiros estudos de aplicação de RNAs nesta área é o de NAKATSUJI & KAKU (1989), que procuraram resolver temas relacionados com a engenharia de tráfego. Eles mesmos, NAKATSUJI & KAKU (1991), fizeram uma aplicação de redes neurais para resolver problemas de organização de controles semafóricos nos Estados Unidos, cujos resultados foram considerados superiores quando comparados com aqueles obtidos pelos métodos analíticos tradicionais.

HUA & FAGHRI (1993) adaptaram uma RNA para cruzar volumes de tráfego, tempo e ligações a fim de determinar o controle dinâmico dos parâmetros utilizados em um semáforo (tamanho do ciclo e fases). CHANG & SU (1995) foram capazes de estimar a espera numa intersecção com ajuda de RNAs.

Definição de Zonas de Dilema

HUANG & PANT (1994) determinaram uma zona de dilema (área onde o motorista, vendo a luz amarela, toma a decisão de parar ou seguir no cruzamento) com base em três tipos de comportamentos examinados (passar do sinal vermelho, parar abruptamente ou acelerar no amarelo). Com base nas observações realizadas, a RNA estimou o tamanho da zona. Trabalho similar foi desenvolvido por PANT & BALAKRISHNAN (1994), que propuseram o uso da RNA para estabelecer o intervalo de aceitação admitido por motoristas em cruzamentos sem semáforos.

• Detecção de Acidentes

IVAN et al. (1995) e IVAN (1997), utilizaram as RNAs para fazer a análise da probabilidade de ocorrência de acidentes de trânsito a partir de parâmetros como o fluxo, a concentração e velocidades dos veículos nas vias. STEPHANEDES & XIAO (1995) propuseram reduzir o número de alarmes falsos sobre acidentes em rodovias através do uso das RNAs para reconhecer ondas de compressão, pulsos de tráfego e detectar mal funcionamento de equipamentos. CHEU & RITCHIE (1995) usaram as RNAs para a detecção automática de incidentes ocorridos em vias expressas devido ao bloqueio de faixas. DIA & ROSE (1997) desenvolveram e avaliaram modelos em RNAs de detecção de incidentes ocorridos em vias expressas, usando dados de campo. Também ABDULHAI & RITCHIE (1999) usaram as RNAs para a detecção de incidentes ocorridos em vias expressas.

MUSSONE *et al.* (1996) e MUSSONE *et al.* (1999) aplicaram Redes Neurais para analisar e estimar a probabilidade de acidentes de trânsito em cidades italianas. Já ABDEL-ATY & ABDELWAHAB (2001a) e (2001b) empregaram as Redes Neurais para predizer a severidade dos ferimentos dos motoristas em acidentes de trânsito, examinado a relação entre a severidade dos ferimentos e o motorista, o veículo, a rodovia e características ambientais.

• Controle de Congestionamentos

HSIAO *et al.* (1994) descreveram o desenvolvimento de um sistema que combina lógica difusa (*fuzzy logic*) com a capacidade de aprender/adaptar das RNAs para aprimorar o processo de detecção de incidentes em rodovias expressas.

Administração e Finanças

Envolve a identificação de ações referentes à origem e distribuição de recursos utilizados para financiar sistemas de transportes e seus melhoramentos. Neste setor, pode-se citar o trabalho de WEI & SHONFELD (1994) sobre a utilização das RNAs para propor o tempo de construção de novos trechos de uma rede de transportes, com base na análise benefício/custo realizada em função do tráfego projetado e com base nos recursos disponíveis para atender a todas as demandas observadas no sistema.

Construção e Manutenção

Envolve a identificação de ações relacionadas a processos construtivos, incluindo-se a preparação de superfícies, pesquisas sobre novos materiais e sistemas de gerência de pavimentos:

Sistema de Gerência de Pavimentos

FWA & CHAN (1993) compararam o desempenho das RNAs com diversos índices subjetivos utilizados em um sistema de gerência de pavimentos, e concluíram que o modelo proposto foi capaz de determinar, com maior segurança, índices não lineares e lineares. TAHA & HANNA (1995) combinaram as RNAs com algoritmos genéticos para selecionar as melhores redes utilizadas na resolução de problemas de manutenção de pavimentos. RANDOLPH (1996) usou as RNAs para desenvolver modelos de previsão que possam ajudar aos encarregados da manutenção de vias nas operações que realizam, como por exemplo: distribuição de grupos de trabalhadores, determinação de custos diários de operações de manutenção de vias, etc. PANT *et al.* (1996) compararam a técnica *Delphi*, utilizada para determinar ações a serem tomadas na manutenção de pavimentos urbanos, com as RNAs.

O trabalho de BREGA (1997) foi demonstrar que as RNAs podem ser utilizadas para a avaliação da condição do pavimento e a determinação do tipo de restauração a ser empreendida.

RODGHER & ODA (1997) realizaram um trabalho que trata da previsão de defeitos nas estradas através da utilização de RNAs, com base nos fatores que influenciam a formação dos defeitos (características geotécnicas, climáticas, geométricas e tráfego). RODGHER *et al.* (1998) apresentaram um método que utiliza as RNAs para seleção de atividades de manutenção e reabilitação de estradas não-pavimentadas.

• Superficies e Materiais Utilizados

KASEKO & RITCHIE (1993) utilizaram uma aplicação baseada no processamento de imagens para detectar, classificar e quantificar os vários defeitos observados em pavimentos flexíveis. ATTONH-OKINE (1994) utilizou as RNAs para determinar a deformação estrutural dos pavimentos flexíveis, verificando que este recurso computacional apresenta mais vantagens de que os métodos estatísticos

tradicionais. OWUSU-ABABIO (1995) considerou a relação [pavimento]-[veículo]- [fatores ambientais], para, através das RNAs, determinar a resistência aos fenômenos de derrapagem. RODGHER *et al.* (1997) apresentaram um estudo para a aplicação da técnica das Redes Neurais Artificiais para previsão da classe MCT dos solos pertencentes às regiões tropicais.

Embora na maioria dos estudos acima citados o desempenho das RNAs tenha sido bom e alguns autores cheguem mesmo a afirmar que a interface dos *software* com os usuários pode não ser ruim, as Redes Neurais podem ser vistas como "caixas pretas", nas quais quase não se sabe porque a rede chega a um determinado resultado, uma vez que os modelos não apresentam justificativas explícitas para suas respostas. Neste sentido, pesquisas são necessárias visando a extração de conhecimento de Redes Neurais Artificiais, e na criação de procedimentos explicativos, onde se tente entender o comportamento da rede em determinadas situações.

Este tipo de pesquisa poderia contribuir sobremaneira para aprimorar pesquisas e aplicações já realizadas, como é o caso do estudo desenvolvido por RAIA JR. (2000), que treinou uma Rede Neural Artificial para estimar um Índice de Potencial de Viagens para planejamento estratégico de transportes. No modelo proposto, embora a rede treinada possa fornecer estimativas razoáveis do número de viagens por domicilio a partir de variáveis que caracterizam a mobilidade (renda e número de pessoas no domicílio) e a acessibilidade, é muito difícil para o planejador e para o tomador de decisões conduzir outras análises, a não ser que ele disponha do *software* em que a rede foi treinada (e obviamente do arquivo com a rede treinada). Este fato também pode ser observado em outras aplicações de RNAs semelhantes à de RAIA JR. (2000), como em DANTAS *et al.* (2000) e RUIZ & MEDINA (2000).

O ideal seria que se dispusesse de outros instrumentos que fossem capazes de reproduzir o comportamento da rede treinada sem o uso do *software* em que este procedimento foi realizado, de preferência integrando os modelos de RNAs a outros recursos computacionais, que é justamente a proposta desta pesquisa. Como isto será feito a partir do trabalho de RAIA JR. (2000) é importante rever os conceitos que fundamentam os modelos originais, discutidos no próximo capítulo.

3. ACESSIBILIDADE E MOBILIDADE

Considerando—se a importância dos conceitos de acessibilidade e mobilidade para o desenvolvimento deste trabalho, no presente capítulo são apresentadas algumas das diversas definições encontradas na literatura sobre ambos os tópicos, além dos seus principais indicadores.

3.1. Acessibilidade

Acessibilidade em transportes é um tema que, apesar de estar sendo discutido desde o século XIX, foi sempre um assunto de grande importância para o planejamento urbano, por ser um instrumento que possibilita identificar áreas com desigualdades na oferta de infra-estrutura básica. Algumas das definições clássicas encontradas na literatura são apresentadas na seqüência.

INGRAM (1971) definiu a acessibilidade como a característica inerente de um lugar com respeito à superação de alguma forma de obstáculo espacial. Ele também introduziu duas subdivisões para acessibilidade: a) acessibilidade relativa (grau de conexão entre dois lugares ou pontos dentro da mesma área); b) Acessibilidade integral (grau de conexão entre um ponto e todos os outros pontos dentro da mesma área). Já VICKERMAN (1974) afirmava não ser fácil definir acessibilidade em termos precisos e quantitativos, complementando que, de maneira mais abstrata, a acessibilidade envolve uma combinação de dois elementos: a localização de superfície relativa para destinações satisfatórias e as características de rede de transporte ou ligações de pontos daquela superfície.

DAVIDSON (1977) definiu a acessibilidade como a facilidade com que uma pessoa em um ponto pode ter acesso, através do sistema de transportes, a todos os

outros pontos em uma área definida, levando em conta a atratividade e o custo percebido. Na mesma época, PIRIE (1979) tentou esclarecer algumas das divergências sobre a definição de acessibilidade examinando as limitações, aspectos positivos e conceitos básicos das medidas de acessibilidade de distância, topológicas, gravitacionais e de oportunidades cumulativas.

Uma visão bastante simples de acessibilidade no transporte público urbano é aquela apresentada por FERRAZ (2001), que afirma que a acessibilidade está associada à distância percorrida para iniciar e finalizar a viagem por transporte público e à comodidade experimentada nesses percursos. VASCONCELLOS (1996a) definiu a acessibilidade - vista como a facilidade de atingir os destinos desejados - como a medida mais direta (positiva) dos efeitos de um sistema de transporte. E ainda VASCONCELLOS (1996b)subdividiu acessibilidade dois a em tipos: macroacessibilidade, que se refere à facilidade relativa de atravessar o espaço e atingir as construções e equipamentos urbanos desejados; e microacessibilidade, que se refere à facilidade relativa de ter acesso direto aos veículos ou aos destinos desejados.

DAVIDSON (1995) definiu a acessibilidade como a facilidade com que pessoas em um ponto podem adquirir acesso, por meio de um sistema de transporte (ou qualquer modo ou subsistemas), para todas as outras localidades de uma determinada área, levando em conta sua atratividade e o custo percebido para obtê-lo. Uma localidade com alta acessibilidade tenderá, para a maioria dos fins, a ser mais atraente do que uma com baixa acessibilidade e deste modo tenderá a ser mais valorizada.

Mas recentemente, SCHOON *et al.* (1999) definiram acessibilidade como a facilidade e conveniência de alcançar algum destino, ao se concentrarem em viagens que requerem o uso de veículos. No mesmo ano, VAN DER WAERDEN *et al.* (1999) realizaram um estudo na cidade de Eindhoven, Holanda, para verificar as correlações entre medidas de acessibilidade e uma avaliação subjetiva da acessibilidade. Os escores da avaliação foram obtidos a partir de um questionário aplicado a uma amostra da população da cidade (cerca de 18750 domicílios) em 1995.

3.1.1. Indicadores de Acessibilidade

Os diferentes tipos de indicadores de acessibilidade poderiam ser agrupados da seguinte forma, de acordo com GIANNOPOULOS & BOULOUGARIS (1989):

- a) **Indicadores de separação espacial** refletem características de separação espacial de uma rede de transportes, tais como: distância, custo, custo generalizado etc.;
- b) Indicadores de oportunidade são diretamente relacionados aos conhecidos modelos de oportunidade e refletem o número de atividades (ou oportunidades) que podem ser atingidas a partir de um ponto de origem dentro de um certo tempo limite;
- c) **Indicadores do tipo gravitacional** são muito conhecidos e largamente utilizados em planejamento de transportes, e são derivados do modelo gravitacional;
- d) Indicadores do tipo engenharia de tráfego a principal diferença dos indicadores desta categoria para os das outras três mencionadas anteriormente, é que eles são mais propriamente relacionados com o tráfego veicular do que com o movimento de pessoas. Estes indicadores explicam a facilidade de movimentação de um veículo de um ponto a outro em uma área urbana; e
- e) Indicadores baseados em abordagem desagregada/comportamental se referem a abordagens inicialmente sugeridas por BEN-AKIVA & LERMAN (1979). Eles consideram que se há muitas opções de avaliação para um indivíduo, pela definição mutuamente excludente, uma e somente uma opção pode ser escolhida pelo indivíduo em uma única decisão. Também é assumido que existe uma "utilidade" que um indivíduo associa com cada alternativa avaliada por ele, e que o indivíduo seleciona a opção que maximiza essa utilidade.

ARRUDA (1997) afirma que a acessibilidade é o resultado da complexa interação entre o sistema de atividades e o sistema de transportes em uma área em estudo, envolvendo a compatibilidade entre vários aspectos, tais como o custo generalizado de viagem de um indivíduo para alcançar um equipamento urbano dado, a disponibilidade da atividade no tempo, a disponibilidade temporal do indivíduo para tomar parte na atividade e se ele tem condições financeiras de participar da mesma.

O trabalho de ARRUDA (1997) ainda sugere que os indicadores de acessibilidade poderiam ser classificados em dois grandes grupos:

- a) Medidas agregadas se relacionam essencialmente a um espaço físico, não envolvendo qualquer referência ao indivíduo, e
- b) Medidas desagregadas estão relacionados ao espaço comportamental do indivíduo e, por isso, são mais adequadas para refletir o comportamento do indivíduo no seu ambiente. No entanto, são mais difíceis de operacionalizar.

A classificação dos indicadores de acessibilidade apresentada na figura 3.1 e comentada a seguir, é um resumo feito a partir de classificações de diversos autores, tais como VICKERMAN (1974), MORRIS *et al.* (1979), JONES (1981), RICHARDSON & YOUNG (1982), GIANNOPOULOS & BOULOUGARIS (1989), BARTOLOME & CACERES (1992), SALES FILHO (1998) e JOAQUIM (1999).

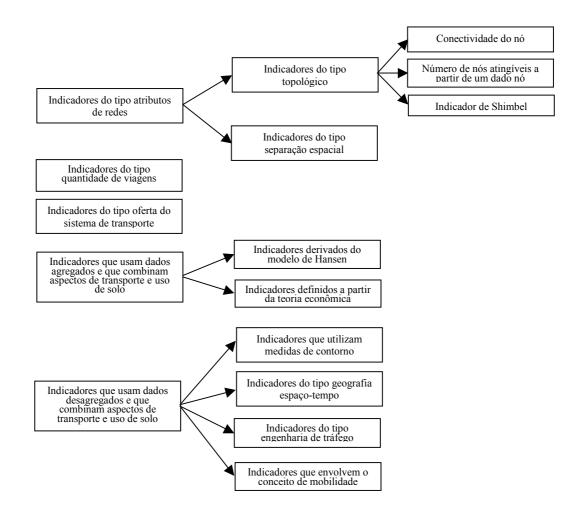


Figura 3.1: Classificação dos indicadores de acessibilidade.

a) Indicadores do tipo atributos de redes

Esta primeira categoria de indicadores está relacionada com a separação espacial de pontos ou com a ligação entre pontos como resultado de suas localizações relativas na rede. Indicadores de rede estão associados somente com a rede de transporte e seus atributos e baseados na Teoria dos Grafos; são compostos por arcos (*links*) e nós. Os nós têm o significado de pontos ou locais de interesse, enquanto que os arcos representam as ligações entre nós. Os indicadores de redes podem ser desmembrados em outros dois: indicadores simples ou topológicos e indicadores do tipo separação espacial.

• Indicadores do tipo topológico

Indicadores topológicos simplesmente explicam se dois pontos no espaço estão fisicamente conectados por um sistema de transporte, permitindo assim o deslocamento entre eles (RICHARDSON & YOUNG, 1982). A rede é normalmente descrita como sendo composta de *links* que se encontram nos nós.

Várias propriedades de redes têm sido propostas como indicadores de acessibilidade, sendo aqui apresentadas três delas: conectividade do nó, número de nós atingíveis e indicador do tipo Shimbel.

- Conectividade do nó a medida mais primitiva de acessibilidade é obtida diretamente da matriz de conectividade. A somatória individual de linhas produz uma coluna de valores. O valor da soma de cada linha é igual ao número total de links diretos de um dado centro (nó) para um conjunto de todos os outros centros na rede (TAAFFE & GAUTHIER, 1973).
- ➤ Número de nós atingíveis a partir de um dado nó dentro de uma dada distância ou tempo de viagem na rede (JONES, 1981).
- ➤ Indicador de Shimbel considera o custo de viagem de um determinado nó para todos os outros nós, tal como nos trabalhos de SHIMBEL (1953) e GIULIANO (1995).

GUTIÉRREZ & MONZÓN (1998) formularam um indicador que sintetiza um único valor das condições de acessibilidade de cada nó em termos de eficiência da rede, enfatizando o efeito da infra-estrutura. O indicador proposto oferece um valor em unidade significativa, ou seja, o quanto a impedância da rede sobrepõe a impedância dada por distâncias Euclidianas. Os resultados são interpretados em escala inversa, ou seja, o menor valor obtido corresponde ao local mais acessível em termos relativos, e vice-versa. Quando a infra-estrutura que conecta os nós para vários centros de atividades econômicas é eficiente, os nós recebem um valor de acessibilidade que se aproxima de 1. Um valor igual a 2, por exemplo, significa que a impedância da rede é o dobro da impedância Euclidiana.

LINDEMANN *et al.* (1998) desenvolveram um indicador que levou em conta os parâmetros tempo de viagem, número de rotas e capacidade destas rotas, considerando automóveis particulares. Este indicador passou posteriormente a compor um *Índice de Desenvolvimento* de uma região, que considerou, além da própria acessibilidade, a quantidade de área livre desta região como potencialidade para o seu desenvolvimento.

• Indicadores do tipo separação espacial

Este grupo de indicadores é composto particularmente pela medida de acessibilidade de INGRAM (1971), que generalizou a medida de SHIMBEL (1953), propondo que a simples medida de distância entre pontos seja substituída por uma função impedância de forma curvilínea, baseada na curva normal ou em uma forma modificada da função Gaussiana. Mais tarde, ALLEN *et al.* (1993) criaram um indicador de acessibilidade que considera o *nível de acesso global de transporte* de uma área, índice formulado como uma extensão natural das medidas de acessibilidade integrais e relativas existentes.

As medidas do tipo separação espacial, segundo SALES FILHO (1998), apresentam como vantagem o aspecto da simplicidade, isto é, utilizam poucos dados e são mais precisas no cálculo da impedância; como limitação é apontada a ausência da distribuição espacial de atividades.

b) Indicadores do tipo quantidade de viagens

Dentro dos indicadores de quantidade de viagens encontramos dois importantes grupos: o primeiro reflete as viagens observadas, e o segundo, as viagens previstas. Estes dois estão relacionados e levam em conta a medição de viagens, isto é, estão ligados com aspectos de comportamento de viagens.

c) Indicadores do tipo oferta do sistema de transporte

Neste grupo estão enquadrados os indicadores que são de alguma forma definidos por aspectos relacionados à oferta de transportes, tais como: assentos ofertados, freqüência do sistema de transporte, número de rotas, etc. Um estudo desenvolvido para a cidade de Londres, mencionado por BRUTON (1979), por exemplo, utilizou como parâmetros o número de linhas que servem determinada zona, a freqüência do sistema de ônibus, além da área da região.

Com esta abordagem, KRALICH (1996) desenvolveu um estudo utilizando a acessibilidade como indicador de nível de qualidade de vida. O estudo se baseou na Região Metropolitana de Buenos Aires e sua metodologia considerou o parâmetro *lugares ofertados* nas diversas linhas radiais de transporte público por ônibus e ferroviário, relacionando-os com indicadores demográficos quantitativos e qualitativos.

Na mesma linha de indicadores, AKINYEMI (1998) diz que o nível de acessibilidade por um modo, de uma localidade a outra, é uma função de duas variáveis principais: i) o máximo custo generalizado do movimento pelo modo de transporte entre duas localidades, e ii) a capacidade produtiva, do modo de transporte da rede entre duas localidades. A acessibilidade se incrementa quando o custo generalizado diminui e com o incremento da capacidade produtiva da rede.

Também do mesmo grupo, a metodologia proposta por SATHISAN & SRINIVASAN (1998) para avaliar a acessibilidade de redes urbanas para as necessidades de transportes de áreas urbanas, faz uso das potencialidades computacionais do Sistema de Informações Geográficas, relacionando-as com o tradicional processo de planejamento urbano de transportes de quatro etapas (geração de viagens, distribuição de viagens, divisão modal e alocação de tráfego à rede).

d) Indicadores que usam dados agregados e que combinam aspectos de transportes e uso de solo

Fazem parte deste grupo dois subgrupos compostos por indicadores dos mais utilizados e difundidos na literatura especializada, ou seja, os derivados do tradicional modelo de Hansen, e aqueles indicadores que foram fundamentados a partir da Teoria Econômica.

Indicadores derivados do modelo de Hansen

A abordagem destes tipos de indicadores, utilizados no cálculo da acessibilidade de uma determinada zona, é agregar as oportunidades disponíveis em cada uma das demais zonas, ponderadas por uma função de resistência (impedância) para atingir essas zonas, ou seja, as oportunidades disponíveis em cada zona são descontadas ou deduzidas de acordo com a dificuldade para se atingir essa zona (JONES, 1981).

A dificuldade com o indicador do tipo Hansen, segundo JONES (1981), é que a sua medida de impedância de viagem (distância) é feita por uma função potência inversa. JONES (1981) alega que a distância não é necessariamente a melhor forma para representar dificuldade de viagem, e o efeito da impedância poderia ser medida por outras funções ao invés da função potência inversa proposta por Hansen.

DALVI & MARTIN (1976) fizeram uma análise de acessibilidade por transporte particular, usando dados da cidade de Londres, apresentando uma comparação do padrão de acessibilidade associado a quatro medidas de atratividade da zona (total de empregos, empregos no varejo, residências e população). A função custo de viagem utilizada foi a exponencial negativa.

Uma medida proposta por SALES FILHO (1998) levou em consideração os efeitos combinados das atratividades da origem e dos destinos das viagens. O indicador considera o efeito *exclusividade*, significando que nas interações casatrabalho, cada indivíduo ocupa somente uma vaga de trabalho e cada vaga é ocupada somente por um indivíduo. O efeito *agrupamento* de atividades em certos tipos de interação, por exemplo, no caso de *shopping centers*, considera interações casacompras/lazer/serviços.

A consideração de efeitos combinados da atratividade de origens e destinos, proposta por SALES FILHO (1998), merece especial relevância, pois permite

desenvolver uma nova matriz de tratamento para esses indicadores, além de uma nova metodologia de avaliação de redes de transportes.

• Indicadores definidos a partir da Teoria Econômica

Os indicadores deste subgrupo foram desenvolvidos a partir de conceitos extraídos da teoria econômica, ou seja, o conceito de *excedente do consumidor* ou dos benefícios que se obtêm do sistema de transporte quando a pessoa busca a *maximização da utilidade* ou o *benefício total* em tempo ou em termos financeiros.

Um primeiro exemplo deste subgrupo é o trabalho desenvolvido por JONES (1981), que usou a abordagem de excedente do consumidor para a localização de residência e trabalho, e o modo pelo qual eles estão relacionados para definir um padrão de jornada ao trabalho, sugerindo que o diferencial de aluguel e renda pode ser considerado como medida de acessibilidade.

Muitas dessas medidas de acessibilidade foram desenvolvidas usando argumentos intuitivos, porém, cuidados têm sido tomados para que elas tenham um embasamento teórico seguro, usando conceitos subtraídos da teoria econômica, mostrando que uma derivação do indicador de acessibilidade de Hansen é essencialmente uma medida de excedente do consumidor (JONES, 1981).

Essas medidas, baseadas na teoria econômica, apresentam como fator limitante a visão individual da pessoa, não considerando os impactos na sociedade; por outro lado, estas medidas apresentam uma fundamentação teórica consistente (SALES FILHO, 1998).

e) Indicadores que usam dados desagregados e que combinam aspectos de transportes e uso do solo

Fazem parte deste grupo os indicadores que usam medidas de contorno, aqueles que consideram aspectos relacionados à engenharia de tráfego, aqueles do tipo geografía espaço-tempo, além daqueles que associam ao indicador medidas que envolvem o conceito de mobilidade. Apenas dois destes subgrupos serão comentados a seguir, antes de se tratar do tópico mobilidade em si.

• Indicadores que utilizam medidas de contorno

Este subgrupo de indicadores é a família mais comum e conhecida de indicadores que usam dados desagregados do sistema de transporte e uso do solo. Normalmente, define-se para cada zona uma série de custos de viagem – em geral tempo de viagem – definindo uma linha de contorno.

A vantagem deste tipo de medida, segundo MOWFORTH (1989), é a sua simplicidade, podendo ser entendida por muitas pessoas. Estes indicadores também são conhecidos como *medidas isócronas* (ARRUDA, 1999). A expressão numérica destes indicadores poderia ser considerada como um caso particular do tipo gravitacional (KOENIG, 1980).

Um indicador de acessibilidade deste tipo foi obtido por BLACK & CONROY (1977) a partir de um estudo desenvolvido na maior cidade australiana, Sydney. O indicador sugerido foi a área sob a curva de distribuição acumulada de oportunidades atingíveis dentro de um tempo especificado.

Um trabalho teórico nesta linha foi desenvolvido por DOMANSKI (1979), onde a acessibilidade espacial e os custos foram usados como medidas para representar equidade espacial e eficiência econômica. Foram simuladas quatro diferentes alternativas de crescimento de uma micro-região, com variação de oportunidades (empregos, moradia e serviços). A acessibilidade foi medida de cinco maneiras: i) área (em km²) acessível em até 1 hora; ii) número de pessoas residentes em uma área acessível em até 1 hora; iii) média ponderada da população que reside na área acessível em até 1 hora; iv) custo de transporte por habitante; e v) potencial do local, definido como sendo a acessibilidade de uma cidade ou vilarejo para oportunidades de um centro regional. Para todas estas cinco medidas de acessibilidade foram construídas figuras com linhas isócronas.

SALES FILHO (1998) aponta a visualização dos resultados e a facilidade computacional nos cálculos como as grandes virtudes dessas medidas; por outro lado, as dificuldades na agregação dos dados e os valores relativos, são mencionados como as maiores desvantagens.

• Indicador do tipo geografia espaço-tempo

Poucas têm sido as abordagens de indicadores de acessibilidade baseadas no conceito de geografia espaço-tempo; esta é uma abordagem da sociedade que considera o tempo tão importante quanto o espaço. É fundamental para a abordagem o conceito de "caminho de vida" das pessoas, isto é, o conjunto de localidades no espaço e no tempo que as pessoas ocupam. Se somente uma restrição fixa do tempo de uma pessoa é considerada, então pode-se desenhar um "prisma espaço-tempo", para indicar onde será possível ela estar em outros momentos. (RAIA JR., 2000).

O prisma de espaço-tempo é a medida de autonomia de um indivíduo, que mostra as possibilidades no espaço e tempo que estão abertas para a pessoa, dadas certas restrições; é usualmente definido em um diagrama, que visualmente define os limites exteriores de possibilidades em uma situação específica (HANSON, 1995).

Segundo SALES FILHO (1998), uma das vantagens deste tipo de indicador é levar em conta a possibilidade dos indivíduos tomarem parte em atividades, incorporando restrições de horário na vida cotidiana das pessoas. E ainda o autor afirma que uma das limitações deste tipo de indicador é a necessidade de um grande volume de dados e informações muito detalhadas, tendo em vista o nível muito desagregado da análise do padrão de vida de cada indivíduo.

3.2. Mobilidade

O conceito de mobilidade urbana é usualmente associado e, muitas vezes, confundido com o conceito de acessibilidade. Considerando que isto seja apenas uma questão de definição, isto é, o modo com que ele é estipulado para entender este ou aquele conceito, e considerando a literatura atual, assume-se que a mobilidade está relacionada com os deslocamentos diários (viagens) de pessoas no espaço urbano. Não apenas sua efetiva ocorrência, mas também sua facilidade ou possibilidade de ocorrência (SALES FILHO, 1998).

Para CARRUTHERS & LAWSON (1995), é necessário fazer a distinção entre acesso e mobilidade. Muitas viagens são feitas com os mais diversos motivos para acessar o local de trabalho, compras, educação, recreação etc. Mobilidade, por sua vez, é a demanda para o movimento e surge como resultado do desejo de acesso.

O conceito de mobilidade, segundo TAGORE & SIKDAR (1995), é interpretado como sendo a capacidade dos indivíduos se moverem de um lugar para outro e depende da performance do sistema de transportes (disponibilidade, freqüência, tempo de espera etc.) e características do indivíduo (renda, veículo próprio, recursos que ele pode gastar na viagem etc.).

CMSP (1990), por sua vez, define *índice de mobilidade* como sendo, inicialmente, a relação entre o número de viagens motorizadas e o número de habitantes, por exemplo, de uma cidade. Posteriormente, foram acrescentadas também as viagens a pé ao índice de mobilidade. MORENO (1998) analisa a mobilidade da região de Madri considerando os deslocamentos diários realizados através de veículos privados (bicicleta, automóvel - como motorista ou acompanhante, motocicleta e outros), transporte público (ônibus, metrô e trem de subúrbio) e táxi.

Muitos pesquisadores têm definido mobilidade como sendo a facilidade de viajar, isto é, o número de viagens que um indivíduo faz durante um dia, aproveitando as oportunidades econômicas e sociais disponibilizadas pela cidade. Para STEMERDING (1996), mobilidade é a capacidade de se movimentar livremente de um ponto de origem a um destino desejado e é uma das maiores realizações para o bemestar do cidadão. Já para MEYER & MILLER (1984), um pensamento que é muito comum e pode ser encontrado em muitos trabalhos, é o de que a mobilidade está diretamente relacionada à capacidade que o indivíduo tem de possuir e dirigir um automóvel.

AKINYEMI & ZUIDGEEST (1998), por sua vez, consideram mobilidade como sendo muito mais uma variável de oferta do que uma variável de demanda. Em vez de significar viagens atuais ou viagens feitas, caracterizadas por medidas tais como quilômetros por viagem por pessoa, número de viagens por dia ou por ano por pessoa etc., mobilidade pode ser definida como um termo qualitativo que representa a capacidade que um grupo de pessoas tem para viajar a partir de uma zona, por diversos modos de transporte.

A mobilidade, para FERRANDIZ (1990), pode ser entendida como a maior ou menor facilidade de se deslocar entre dois pontos. Quando esse deslocamento tem lugar, em tudo ou em parte, em âmbito urbano, fala-se de "mobilidade urbana". O autor ainda diz que dentro do conceito de mobilidade está não só a possibilidade de realizar um determinado deslocamento, mas também as condições (segurança, regularidade, freqüência, velocidade, conforto, etc.) nas quais o deslocamento se realiza.

A interpretação mais comum do termo mobilidade, segundo AKINYEMI (1998), é aquela na qual se relaciona o conceito de mobilidade às viagens atuais ou viagens feitas, utilizando - por exemplo - as seguintes medidas relacionadas às viagens: i) número de quilômetros por viagem por pessoa; ii) número de viagens por pessoa por

dia; iii) número de quilômetros percorridos diariamente por pessoa por modo; e iv) número de viagens por dia por pessoa por modo.

Transporte e mobilidade têm se tornado conceitos-chave no moderno estado de bem-estar, de tal forma que eles são considerados praticamente como valores básicos na sociedade atual. Por conseguinte, taxas de mobilidade são, muitas vezes, tomadas com indicadores de performance de um sistema econômico. Contrastando à idéia de mobilidade como um indicador de bem-estar, é necessário mencionar que ao mesmo tempo aspectos negativos são proporcionados pelo aumento do movimento geográfico. Por exemplo, aumento excessivo da mobilidade causa conseqüências intoleráveis para o ambiente urbano, e resulta em aumento no consumo de combustíveis, conduz a inaceitáveis alterações no ambiente físico, enquanto que a mobilidade por automóvel vem a conflitar diretamente com outros critérios de planejamento físico (NIJKAMP & BLAAS², 1994 *apud* RAIA JR, 2000).

Pensando em soluções para que as cidades sejam mais viáveis do ponto de vista da qualidade de vida de seus cidadãos, CARRUTHERS & LAWSON (1995) sugeriram que a mobilidade deve ser gerenciada de forma que conduza à manutenção de uma cidade sustentável, permitindo a coexistência de diferentes formas de viagens.

3.2.1. Indicadores de Mobilidade

Tal como ocorre com os indicadores de acessibilidade, os indicadores de mobilidade não possuem uma linha limitante bem definida, no sentido de se enquadrar uma determinada medida de mobilidade neste ou naquele grupo (RAIA Jr., 2000). Apesar disto, uma divisão de indicadores foi construída levando-se em consideração àquelas apresentadas por SALES FILHO (1998):

• Indicadores de mobilidade do tipo deslocamentos efetuados

Estes indicadores têm como característica parâmetros de viagens diárias (médios por pessoa). São medidas cuja formulação se baseia na extensão, tempo ou quantidade de viagens por pessoa. Estas medidas podem considerar dados desagregados por categoria sócio-econômica, por exemplo.

² NIJKAMP, P. & BLAAS, E. (1994) *Impact assessment and evaluation in transportation planning*.. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

• Indicadores de mobilidade do tipo facilidade de deslocamentos

Estes indicadores têm, em geral, características associadas às facilidades proporcionadas pelo sistema de transporte. São medidas em termos de estatísticas operacionais das operadoras, relação do tipo *volume/capacidade*, no caso de rodovias. Estas medidas podem considerar a quantidade de movimento, em *passageiro x velocidade*, por exemplo. Estes indicadores apresentam certas limitações, são mais eficazes em estudos localizados, podendo ter alguma utilidade em análises mais abrangentes quando considerados em conjunto com outras formas de abordagem (SALES FILHO, 1998).

Indicadores de mobilidade do tipo potencial de deslocamentos

Os indicadores do tipo potencial de viagens abordam a possibilidade de ocorrência de deslocamento por parte dos indivíduos. São baseados nos tradicionais indicadores de acessibilidade e nas medidas de espaço-tempo. Algumas aplicações típicas são as análises de equidade urbana e estudos de qualidade de vida das cidades. Assim, mobilidade de viagem pode ser caracterizada como a capacidade de viajar.

• Outros indicadores de mobilidade

Muitos têm sido os trabalhos teóricos sobre mobilidade que não tratam especificamente de seus indicadores. Dentre eles pode-se citar o trabalho de CERVERO (1988), que avaliou a influência do uso misto do solo em áreas suburbanas na mobilidade das pessoas e o de STAHL (1987), que estudou a mudança do padrão de mobilidade e o envelhecimento da população, na Suécia. ANGELL (1989) sugeriu que ainda um eficiente e efetivo sistema de transportes deve ser baseado em uma mistura viável de opções de mobilidade; enquanto que o estudo de POL *et al.* (1994) avaliou como as políticas de mobilidade, na Holanda, proporcionam oportunidades de participação no trabalho e outras atividades, para homens e mulheres.

3.3. Avaliação conjunta de acessibilidade e mobilidade

Os termos acessibilidade e mobilidade são objeto de inúmeras confusões na literatura relativa ao planejamento de transportes. JONES (1981) apresenta definições que procuram esclarecer essas diferenças, conforme apresentado a seguir:

- Acessibilidade está relacionada com a oportunidade que um indivíduo, em um dado local, possui para tomar parte em uma atividade particular ou uma série de atividades. Ela está relacionada à mobilidade do indivíduo ou tipo de pessoa, à localização espacial de oportunidades relativas ao ponto de partida do indivíduo, às vezes em que o indivíduo está disponível para participar das atividades e, às vezes em que as atividades estão disponíveis (ver figura 3.2). Assim, acessibilidade está relacionada não com o comportamento propriamente dito, mas com a oportunidade ou potencial, disponibilizados pelo sistema de transporte e uso de solo, para que diferentes tipos de pessoas desenvolvam suas atividades.
- *Mobilidade* é a capacidade de um indivíduo ou tipo de pessoa de se deslocar. Isto envolve dois componentes: o *primeiro*, depende da performance do sistema de transporte, e que é afetado por onde a pessoa está, da hora do dia e a direção na qual se deseja deslocar; o *segundo* componente depende das características do indivíduo, tais como: se ele tem carro próprio, disponibilidade de recursos para pagar táxi, ônibus, trem ou avião; se tem a possibilidade de caminhar ou usar o transporte público e mesmo se tem conhecimento das opções disponíveis para ele. Em outras palavras, o *primeiro* elemento está relacionado com a efetividade do sistema de transporte em conectar localidades especialmente separadas, e o *segundo* elemento está associado com "até que ponto" um determinado indivíduo ou tipo de pessoa é capaz de fazer uso do sistema de transporte.

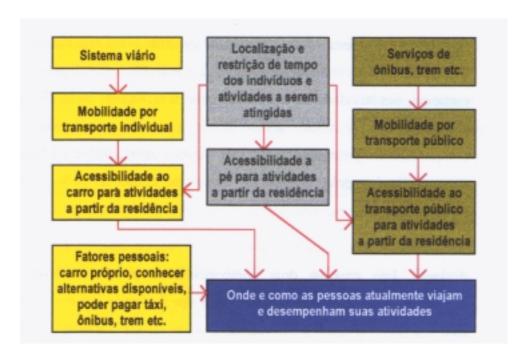


Figura 3.2: Relação entre mobilidade, acessibilidade e comportamento de viagens, adaptado de JONES (1981) por RAIA JR. (2000).

O interesse de profissionais pelos aspectos relacionados à mobilidade e acessibilidade em áreas urbanas tem aumentado significativamente, especialmente nos últimos dez anos. Isto parece ser devido ao aumento da consciência das relações entre mobilidade, acessibilidade e qualidade de vida em áreas urbanas (AKINYEMI, 1998).

Para LINDEMANN *et al.* (1998), os conceitos de acessibilidade e mobilidade, em vários casos, se confundem, principalmente quando os dois estão relacionados tão somente com a facilidade de deslocamento. No entanto, na maioria dos casos, outras variáveis, além da facilidade ou dificuldade de deslocamento, são associadas tanto na quantificação da acessibilidade quanto da mobilidade. No primeiro as variáveis associadas se relacionam a aspectos especiais de distribuição de atividades; no segundo as variáveis estão associadas com as características socioeconômicas da pessoa que realiza o deslocamento.

Segundo HANSON (1995) os conceitos que são centrais para se entender o transporte são exatamente a acessibilidade e a mobilidade. A autora fornece definições que tentam eliminar qualquer confusão sobre os dois assuntos: *acessibilidade* se refere ao número de oportunidades, também chamado de local de atividades, disponível dentro

de determinadas distâncias ou tempos de viagem; *mobilidade* se refere à capacidade para se mover entre diferentes locais de atividades.

A avaliação conjunta dos conceitos de mobilidade e acessibilidade é essencial nas políticas urbanas, segundo PINHEIRO (1994). O leque de oportunidades oferecidas ao cidadão, que define a qualidade e a densidade de sua inserção urbana, é delimitado principalmente pelos seus recursos pessoais, tais como capacidade física e econômica (aspectos da mobilidade) e a disponibilidade de infra-estrutura, incluindo, dentre outras, a rede de transporte coletivo (aspecto de acessibilidade, na concepção de PINHEIRO, 1994).

Mobilidade e acessibilidade são fatores que influenciam a capacidade do cidadão realizar as atividades que preencham as condições necessárias à vida. Nesse enfoque se identificam como aspectos da qualidade de vida urbana, na proporção em que, juntos, tornam viável a inserção do cidadão na reprodução social. (JOAQUIM, 1999).

WACHS & KOENIG (1979) observam que talvez não fossem necessários os dois conceitos distintos – acessibilidade e mobilidade – já que possuem algo em comum. No entanto, vão além ao sugerir que os dois conceitos poderiam ser fundidos ou combinados. A capacidade para usar um modo de transporte (mobilidade) não é uma medida útil a não ser que destinos desejados possam ser atingidos por aqueles modos; e de modo recíproco, acesso para satisfazer destinos desejados por um dado modo se torna sem sentido se este modo não é acessível ao "viajante" potencial.

Ao longo de todo este capítulo pôde-se observar que existem diversos pontos de vista sobre o que são acessibilidade e mobilidade. Isto se reflete nos diversos indicadores de mobilidade e acessibilidade que existem na literatura, que, no entanto, apesar da sua diversidade e quantidade, ainda deixam margem para novas investigações sobre ambos os temas. A partir daqui, e depois de ter também visto a fundamentação teórica relativa às Redes Neurais Artificiais, é possível tratar do método com o qual se desenvolverá a presente pesquisa, o qual será apresentado no próximo capítulo.

4. MÉTODO

Apresenta-se neste capítulo um resumo da abordagem adotada para o desenvolvimento de procedimentos que podem tornar mais efetivo o uso do modelo de Redes Neurais no planejamento urbano e de transportes. Será discutido o caso particular aqui estudado, que se refere a um modelo para estimar um Índice de Potencial de Viagens, os dados básicos utilizados no processo, e um roteiro das etapas necessárias para a realização deste trabalho.

4.1. Abordagem adotada

O desenvolvimento da pesquisa partirá do estudo conduzido por RAIA JR. (2000), que utilizou Redes Neurais Artificiais para estimar um Índice Potencial de Viagens a partir de variáveis de mobilidade e acessibilidade, com vistas ao planejamento estratégico de transportes.

A primeira etapa deste projeto consiste em avaliar se ainda cabem alterações nos modelos propostos por RAIA JR. (2000), à luz da bibliografia mais recente, e com base em novos "filtros" a serem aplicados aos conjuntos de dados empregados no estudo do caso original. Isto poderia inclusive conduzir à seleção de novas variáveis de entrada e saída e treinamento de novas redes. Uma variável que se poderia incluir, por exemplo, seria a idade, obtendo-se a partir daí novos modelos, eventualmente com melhor desempenho que os originais, e com os quais se poderia desenvolver a etapa seguinte com melhores resultados. Se o desempenho dos modelos com muitas variáveis continuar não apresentando melhora significativa, no entanto, uma alternativa poderia ser continuar empregando o modelo simplificado original, no qual se utilizam somente três variáveis de entrada, sejam eles os originais ou versões melhoradas do mesmo.

Dentre as medidas de avaliação que podem ser empregadas para identificar o(s) modelo(s) de melhor desempenho, estão:

- Comparação gráfica neste tipo de avaliação de desempenho apenas são plotados lado a lado, em um mesmo gráfico, tanto os resultados observados como os previstos pelas RNAs e, em seguida, confrontados através de uma análise visual.
- ➤ Scattergram nesta medida de avaliação os dados também são plotados como pontos em um gráfico, com o propósito de tornar explícito o quão próximo estão as previsões dos valores alvo correspondentes. Neste caso, no eixo x pode-se plotar o valor previsto pelas RNAs e no eixo y o valor alvo (valor observado) correspondente. De maneira ideal, os pontos devem formar uma linha de 45° que passa pela origem dos eixos. A razão disso é obvia, pois quando se possui um valor alvo x₁ deseja-se que a estimativa seja a mais precisa possível, o que significa que y₁ = x₁, logo, para todo o conjunto de observações o resultado ideal seria um conjunto de pares cartesianos (xi, yi), onde todo yi = xi.
- ➤ Erro quadrático médio (EQM) esta é uma medida de desempenho fácil de computar e que possui um apelo intuitivo muito forte. O EQM é, na realidade, uma medida de exatidão da previsão em termos de valores absolutos ou relativos. O cálculo desta medida é feito da seguinte maneira:

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} (observado_t - estimado_t)^2$$
 (4.1)

➤ Coeficiente de determinação (R²) - nesta medida de desempenho, cujo valor varia entre 0 e 1, são comparados os valores reais (X) e estimados (Y), de forma semelhante ao processo empregado em análises de regressão. Se for igual a 1, existirá uma correlação perfeita na amostra — não haverá diferença entre os valores estimados e os valores reais. Por outro lado, se o coeficiente de determinação for igual a 0, a equação de regressão (ou o modelo de RNA,

neste caso) não terá utilidade para prever um valor de X. A fórmula para o cálculo de R^2 é a seguinte:

$$R^{2} = \left(\frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{\left[n\sum X^{2} - (\sum X)^{2}\right]\left[n\sum Y^{2} - (\sum Y)^{2}\right]}}\right)^{2}$$
(4.2)

Onde:

X = valor real

Y = valor estimado

Com base nas medidas acima citadas podem ser selecionadas as redes de melhor desempenho para, na etapa seguinte, dar início ao processo de desenvolvimento de procedimentos que visam tornar mais efetiva a utilização dos modelos de RNAs para gerar Índices de Potencial de Viagens, transferindo-os e integrando-os a outros ambientes computacionais.

4.1.1 Réplica da RNA treinada em planilha eletrônica

O primeiro procedimento consiste em reproduzir, em uma PLANILHA ELETRÔNICA, o modelo obtido através das RNAs para gerar Índices de Potencial de Viagens, a exemplo do que fez GUAHYBA (2001) na área veterinária. Para tal, o primeiro passo é identificar qual função de ativação foi utilizada para encontrar os valores de saída. No caso estudado, o simulador empregado, o *software EasyNN*³, usa a função sigmóide logística para encontrar o modelo analisado.

Inicialmente encontra-se, com essa função, o valor de saída entre a camada de entrada e a camada oculta e, usando esse resultado, volta-se a usar a função logística para achar os valores após a camada de saída. As equações (4.3) e (4.4) mostram as características da função logística empregada para cada caso.

$$F(u_j) = \frac{1}{1 + e^{-u_j}} \tag{4.3}$$

 3 Software desenvolvido e comercializado por Stephen Wolstenholme. Página na internet em www.easynn.com.

Onde, u_i é igual a:

$$u_{j} = a_{0j} + \sum_{i=1}^{I} a_{ij} X_{i}$$

Onde:

a_{ij} = Pesos do nó de entrada i para o nó oculto j

x_i = Valor de entrada do nó i

 $a_{0i} = Bias$ do nó oculto j

I = Número de nós de entrada

$$F(v_k) = \frac{1}{1 + e^{-v_k}} \tag{4.4}$$

Onde, v_k é igual a:

$$v_k = b_{0k} + \sum_{j=1}^{J} b_{jk} y_j$$

Onde:

b_{ik} = Pesos do nó oculto i para o nó de saída k

y_j = Valor de saída para o nó oculto j

b_{0k} = Bias do nó de saída k

J = Número de nós ocultos

O emprego das equações (4.3) e (4.4) pressupõe que os dados estejam normalizados entre 0 e 1. Para tal, emprega-se a equação (4.5):

$$Y_{i} = \left(\frac{\left(X_{i} - X_{min}\right) \times \left(Y_{max} - Y_{min}\right)}{X_{max} - X_{min}}\right) + Y_{min}$$

$$(4.5)$$

Para i = 1...n

Onde:

 Y_i = valor normalizado

 X_i = valor a ser normalizado

X_{min} = menor valor do intervalo de origem de normalização

X_{max} = maior valor do intervalo de origem de normalização

Y_{min} = menor valor do intervalo de destino de normalização (zero)

Y_{max} = maior valor do intervalo de destino de normalização (um)

n = quantidade de valores a serem normalizados

Assim, uma vez normalizados os dados de entrada é possível, dispondo de uma rede previamente treinada, conhecer os valores de pesos e *bias* requeridos para o emprego das equações (4.3) e (4.4), pois o *software* informa estes valores ao usuário, se solicitado a fazê-lo. Com estes elementos, estas equações podem ser facilmente inseridas em outros ambientes tais como, por exemplo, uma planilha eletrônica.

Assim, os resultados de saída obtidos com as equações podem ser então confrontados com os resultados gerados pelo *software* em que a rede foi treinada. Esta verificação, por sinal, deve ser feita com todo os procedimentos aqui propostos. Se o procedimento foi realizado corretamente, os resultados devem ser idênticos, conforme foi verificado com o modelo que apresentou o melhor desempenho para previsão do Índice de Potencial de Viagens, aqui estudado.

4.1.2. Réplica da RNA treinada através de um programa de computador

Um segundo procedimento que pode facilitar o uso de modelos construídos a partir de Redes Neurais Artificiais é a elaboração de PROGRAMAS DE COMPUTADOR, desenvolvidos especificamente para estimar os resultados a partir dos dados de entrada, tendo por base os parâmetros do(s) modelo(s) obtido(s) da rede treinada. No caso aqui estudado, em exemplo deste tipo de solução foi desenvolvido com recursos do *software Visual Basic*⁴. Mesmo com um programa elaborado por técnicos sem grande experiência de programação é possível obter um produto final que permite realizar análises de sensibilidade de forma rápida e simples. Além disto, pode ser usado por pessoas sem grande conhecimento desse *software*, pois a interface é totalmente predefinida pelo programador.

4.1.3. Desenvolvimento de ábacos

O terceiro procedimento consiste em construir um grupo de ÁBACOS, cujo número dependerá das variáveis de entrada do modelo. Se uma destas variáveis é o número de pessoas por domicilio, por exemplo, isto significa que existem 9 ábacos

⁴ Software desenvolvido pela empresa Microsoft Corporation. http://www.microsoft.com/Brasil/vbasic/

(para domicílios com uma pessoa, com duas pessoas, com três pessoas, com quatro pessoas, com cinco pessoas, com seis pessoas, com sete pessoas, com oito pessoas e finalmente com nove pessoas).

4.1.4. Introdução do modelo de RNA em um ambiente SIG

O último procedimento a ser desenvolvido consiste na introdução do modelo de RNA em um ambiente de SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG), para a geração dinâmica de Índices de Potencial de Viagens e visualização espacial imediata. No caso estudado, é proposta uma aplicação na cidade de Bauru a partir dos limites dos setores utilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística na Contagem Populacional de 1996, embora com dados extraídos da pesquisa O-D feita na mesma cidade em 1997.

4.2 Obtenção de dados básicos

O material básico necessário para dar início ao desenvolvimento deste trabalho inclui: o mapa digitalizado do sistema viário da cidade de Bauru, os limites dos setores censitários do Recenseamento Geral de 1991, dados de renda média do domicílio por setor censitário (1991), dados de número de pessoas por domicilio por setor censitário (1991) e diversos dados de uma pesquisa O-D realizada em 1997. Os dados relativos aos limites dos setores censitários de 1991 foram cedidos pela Secretaria de Planejamento de Bauru, os dados sobre renda mensal e número de pessoas por domicilio por setor censitário (1991) foram adquiridos junto ao Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística (IBGE), e todos os demais dados, bem como os modelos de Redes Neurais Artificiais para a estimativa de um Índice de Potencial de Viagens, foram os mesmos empregados no trabalho de RAIA JR. (2000).

O mapa digitalizado do sistema viário (figura 4.1) foi produzido no *software* TransCAD⁵. Os limites dos setores censitários foram obtidos em um mapa em papel, o que exigiu a digitalização de cada um desses setores. Isto foi feito diretamente no *software* TransCAD, sendo os setores censitários tratados como áreas (figura 4.2). Foi também necessário georeferenciar os domicílios entrevistados na pesquisa O-D de

_

⁵ *Software* desenvolvido pela empresa Caliper Corporation. 1172 Beacon Street, Newton, Massachussets, USA. Página na *internet* em www.caliper.com.

1997, como mostrado na figura 4.3, bem como digitalizar as zonas de tráfego em que foi dividida a cidade de Bauru para o desenvolvimento da pesquisa O-D (figura 4.4).



Figura 4.1: Sistema viário da cidade de Bauru, representado pelos eixos das vias.

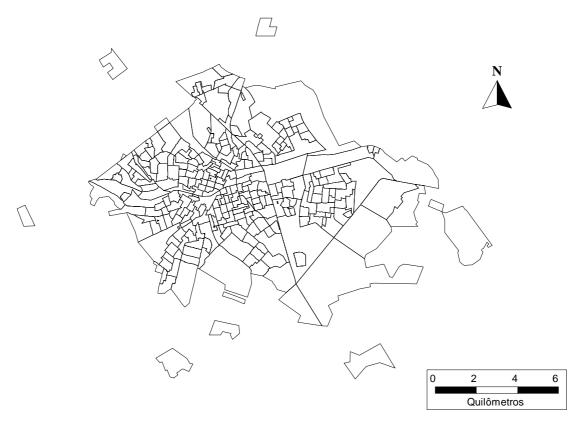


Figura 4.2: Setores censitários da cidade de Bauru, em 1996.

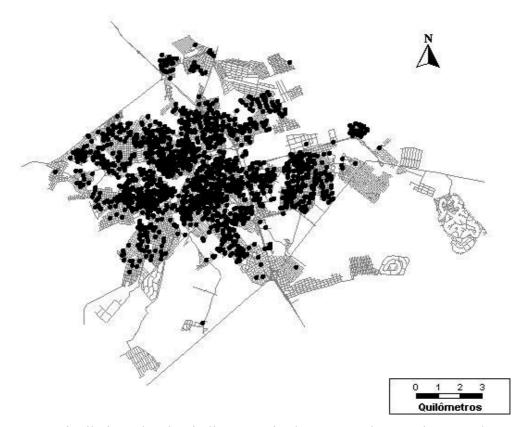


Figura 4.3: Distribuição dos domicílios pesquisados através da pesquisa O-D de 1997.

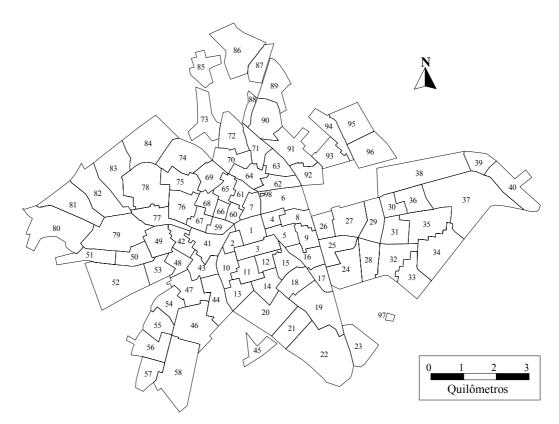


Figura 4.4: Zonas de tráfego da cidade de Bauru para a pesquisa O-D de 1997.

Os modelos de RNAs obtidos do trabalho de RAIA JR. (2000) já estavam em arquivos do *software* EasyNN, o que permitiu uma análise cuidadosa dos mesmos, para verificar se deveriam ou não ser refeitos. Neste caso, a reconstrução dos modelos poderia ser feita diretamente a partir dos dados originais da pesquisa O-D, obtidos em arquivos de planilha eletrônica.

4.3. Atividades Desenvolvidas

A integração/introdução dos modelos de RNA nos ambientes propostos torna possível conduzir algumas análises bastante particulares e interessantes, como será apresentado mais adiante. Para que isto se dê de forma satisfatória, no entanto, torna-se necessário o planejamento de uma seqüência de atividades com a finalidade de direcionar o estudo para alcançar os objetivos propostos. Estão descritas a seguir essas atividades, para uma melhor compreensão do desenvolvimento dos procedimentos realizados no próximo capítulo.

- 1. Obtenção do mapa, em formato digital, da cidade de Bauru com sua rede viária, atualizado até 1999;
- 2. Obtenção dos limites dos setores censitário da cidade de Bauru, em 1991;
- 3. Obtenção de dados de renda média domiciliar por setor censitário, referentes ao censo de 1991;
- 4. Obtenção de dados do número médio de pessoas por domicilio por setor censitário, referentes ao censo de 1991;
- Obtenção dos dados da pesquisa O-D da cidade de Bauru do ano de 1997, em formato digital;
- 6. Digitalização das áreas dos setores censitários de 1991 no software TransCAD;
- 7. Obtenção dos modelos em Redes Neurais Artificiais obtidos por RAIA JR. (2000);
- 8. Análise dos modelos de RAIA JR. (2000) para eventual melhoramento;
- Identificação e seleção do melhor modelo de RNAs para estimar um Índice de Potencial de Viagens;
- 10. Obtenção dos procedimentos alternativos capazes de tornar mais efetivo o uso do modelo do item 9:
 - a) Réplica do modelo de RNA em planilha eletrônica;
 - b) Réplica do modelo de RNA em um programa desenvolvido em Visual Basic;
 - c) Construção de ábacos com as variáveis de entrada do modelo de RNA, tendo como saída o Índice de Potencial de Viagens;
 - d) Introdução do modelo de RNA em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica;
- 11. Aplicação na cidade de Bauru do procedimento do item 10(d):
 - a) Estimativa do número de viagens com base nos limites dos setores censitários de 1996, embora com dados extraídos da pesquisa O-D de 1997;
 - b) Simulação de novos números de viagens, a partir de alterações nos valores das variáveis de entrada, de forma a avaliar o seu impacto em diferentes regiões da cidade;
 - c) Análise dos resultados do item 11(b).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento dos procedimentos descritos no capítulo anterior, assim como algumas análises dos mesmos. Também é mostrada, com mais detalhes, a aplicação realizada na cidade de Bauru, de um dos procedimentos desenvolvidos, aquele em que as RNAs são integradas a um SIG.

5.1. Avaliação dos modelos de Redes Neurais Artificiais

Conforme se detalhou no capítulo anterior, após a obtenção dos dados básicos teve início a primeira etapa do trabalho de análise, que consistia em avaliar se ainda eram necessárias alterações nos modelos propostos por RAIA JR. (2000). Depois de analisar cuidadosa e exaustivamente os modelos originais, constatou-se que não se podia mais melhorá-los simplesmente pela variação de parâmetros internos dos modelos de Redes Neurais, tais como: número de camadas intermediárias e seus neurônios, *momentum* e taxa de aprendizado. Mais importante do que isto seria promover uma reorganização dos conjuntos de dados usados para treinamento da rede, pois, apesar de RAIA JR. (2000) ter descartado uma série de registros inconsistentes ou incorretos, ainda era possível observar a presença de casos desta natureza nos dados por ele utilizados nos modelos. Um exemplo deste tipo de problema era a existência de idades incompatíveis com as atividades desenvolvidas pelos entrevistados, como o caso de um indivíduo de 3 anos de idade que realizava viagens por motivo trabalho.

Para uma nova separação dos dados para treinamento das Redes Neurais, trabalhou-se então com os dados originais da pesquisa O-D de 1997 utilizada por RAIA JR. (2000), fazendo-se uma filtragem dos dados duvidosos nela encontrados, com o auxílio

de uma planilha eletrônica. Uma vez concluída esta filtragem, foram criados novamente três conjuntos de dados, aleatoriamente selecionados, para treinamento das RNA.

Foram também consideradas variáveis de entrada referentes à idade, em grupos (até 13 anos, entre 14-60 anos e mais de 60 anos), que não haviam sido testadas inicialmente nos modelos de RAIA JR. (2000). Tal como no modelo original, em outros conjuntos de dados foram consideradas somente três variáveis de entrada (renda familiar, número de pessoas por domicilio e índice de acessibilidade do tipo separação espacial). Em todos os casos, seja naqueles que consideravam inúmeras variáveis de entrada (renda média, número de pessoas, instrução até o 1º grau, até o 2º grau, 2º grau completo ou superior incompleto, superior completo, idades até 13 anos, entre 14 e 60 anos, mais de 60 anos, habilitação para dirigir e acessibilidade), seja naqueles que consideravam apenas três variáveis de entrada, uma só variável de saída (número de viagens) foi adotada.

Uma vez definidos os novos conjuntos de dados, teve início o treinamento no simulador de RNAs, para o qual se separou cada conjunto de dados em três subconjuntos, da seguinte maneira: 50% para treinamento, 25% para validação e 25% para teste. O Erro Quadrático Médio (EQM) foi usado como indicador de performance do modelo. Neste caso, quanto menor o valor de EQM no conjunto de validação, melhor a arquitetura de RNA a ele associada.

Depois de avaliar o desempenho de redes com diferentes configurações, a melhor opção encontrada foi a arquitetura que continha apenas uma camada oculta, tendo esta camada 4 neurônios. Este modelo apresentava apenas três variáveis de entrada (renda média mensal, número de pessoas por domicílio e índice de acessibilidade do tipo separação espacial) e uma de saída (número total de viagens por domicilio). Algumas das diferentes arquiteturas consideradas e os respectivos valores de EQM são mostrados na figura 5.1. As indicações associadas a cada coluna no eixo x têm o seguinte significado: número de neurônios na camada de entrada, seguida pelo(s) número(s) de neurônio(s) na(s) camada(s) intermediária(s) e pelo número de neurônios na camada de saída.

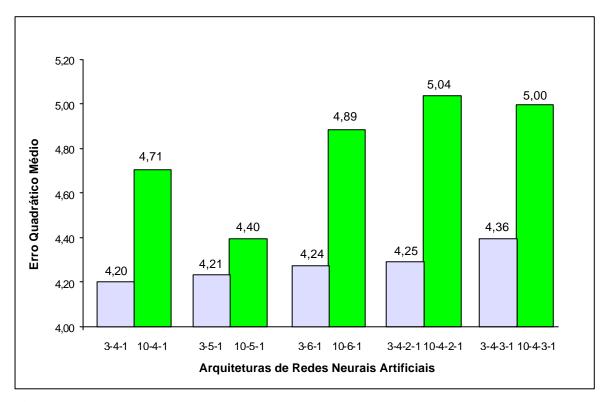


Figura 5.1: Diversas arquiteturas de RNAs e os menores valores de EQM para os conjuntos de validação (modelos com três e dez variáveis de entrada).

Uma vez identificada a rede com a melhor arquitetura, esta passou a ser adotada como modelo de referência para os procedimentos posteriores. Avaliando o conjunto de teste deste modelo com três variáveis de entrada, o mesmo apresentou um R² de 0,69 e um EQM igual a 3,86.

A partir da definição do melhor modelo foi avaliada a influência das variáveis de entrada na saída, através do método proposto por GARSON (1991). Este método particiona os pesos sinápticos entre a camada intermediária e a de saída em componentes associados com cada nó de entrada. Assim o peso resultante associado com cada entrada é um reflexo de sua importância. Na figura 5.2 se mostra a relevância das variáveis do melhor modelo obtido. Através desta figura se pode perceber que o número de pessoas é a variável mais relevante do modelo, com quase 65% do total, sendo que o índice de acessibilidade de tipo separação espacial média é a de menor relevância, com algo em torno de 6,5%.

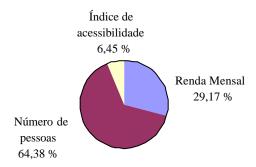


Figura 5.2: Relevância das variáveis de entrada no melhor modelo, segundo GARSON (1991).

Também foram comparados os melhores modelos obtidos por RAIA JR. (2000) com aqueles aqui encontrados, sendo esta comparação, em termos do valor de R², resumida na figura 5.3 (tomando-se como exemplo os três melhores modelos), onde fica evidente a superioridade do desempenho dos modelos revisados. A explicação para que os modelos desenvolvidos nesta pesquisa tenham superado em praticamente 100% o desempenho dos modelos originais deve-se provavelmente à exclusão de dados pouco confiáveis da base de dados original.

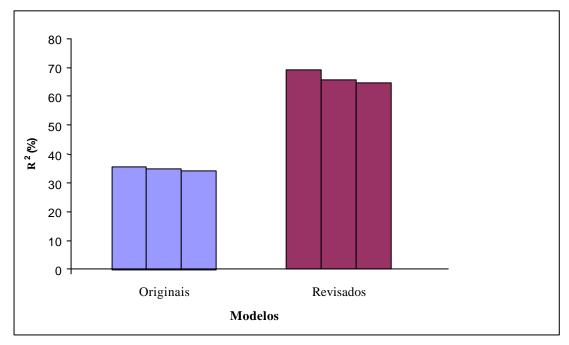


Figura 5.3: Comparação dos melhores modelos originais de RAIA JR. (2000) com aqueles obtidos nesta pesquisa.

Concluída esta primeira etapa, em que a reavaliação dos modelos originais de RNA conduziu a resultados muito bons, foi possível dar seqüência ao desenvolvimento dos procedimentos para tornar mais efetivo o uso de modelos de RNA para estimar um Índice de Potencial de Viagens.

5.2. Réplica da RNA treinada em planilha eletrônica

Para replicar uma RNA treinada o primeiro passo é identificar qual a função de ativação utilizada no simulador. No caso estudado, o programa *EasyNN* usa a função sigmóide logística para encontrar o modelo analisado. De posse desta informação, da arquitetura da rede selecionada e dos valores dos pesos nas conexões entre nós e dos *bias* associados a cada nó, é possível reconstruir o modelo em outros ambientes que não o *software* que foi usado para treinamento da rede. Isto será demonstrado para o caso da rede aqui selecionada após treinamento, cujos principais elementos aparecem resumidos na figura 5.4. Nesta figura os valores dos *bias* são representados em itálico, os valores dos pesos entre nós em negrito, e as variáveis de entrada e saída sem destaque na grafia.

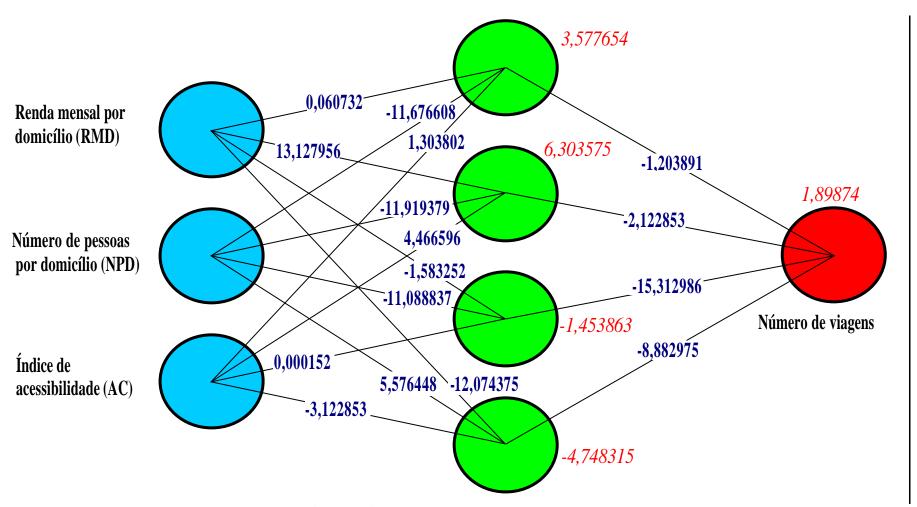


Figura 5.4: Arquitetura da RNA selecionada.

Seguindo os passos apresentados no capítulo 4 (item 4.1) é possível replicar a RNA treinada em uma planilha eletrônica sem grande dificuldade. O gráfico da figura 5.5 ilustra a distribuição dos resultados obtidos para o conjunto de teste, tanto com o *software* de Redes Neurais como para o modelo construído em planilha eletrônica. A distribuição ideal dos pontos no gráfico seria sobre a linha reta representada, o que dá uma idéia dos erros da estimativa do modelo. A comparação dos resultados das estimativas comprovou que o procedimento alternativo replicou perfeitamente o modelo gerado no *software* de Redes Neurais.

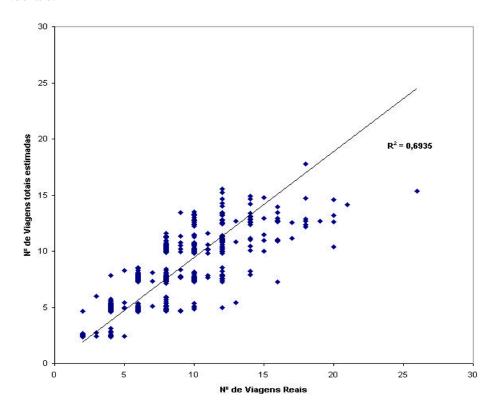


Figura 5.5: Número de viagens reais *versus* estimadas obtidas tanto com o *software* de Redes Neurais *EasyNN* como com o procedimento em planilha eletrônica.

Na figura 5.6 se mostra a planilha eletrônica desenvolvida, onde se pode comprovar que a interface com o usuário é bastante simples: as variáveis de entrada aparecem no canto esquerdo da tela e a variável de saída à direita. Basta alterar qualquer um dos valores de entrada (células D5, D7 e D9 no exemplo da figura 5.6) para que a estimativa do número de viagens (célula H7) seja automaticamente refeita. Para que isto ocorra, foi inserida na célula H7 da planilha a expressão a seguir, que resume todo o processamento que ocorre na Rede Neural treinada com o modelo proposto. A simbologia

dos componentes da modelo (valores de entrada e saída, *bias* e pesos) segue o mesmo padrão (texto normal, itálico e negrito, respectivamente) empregado na figura 5.4.

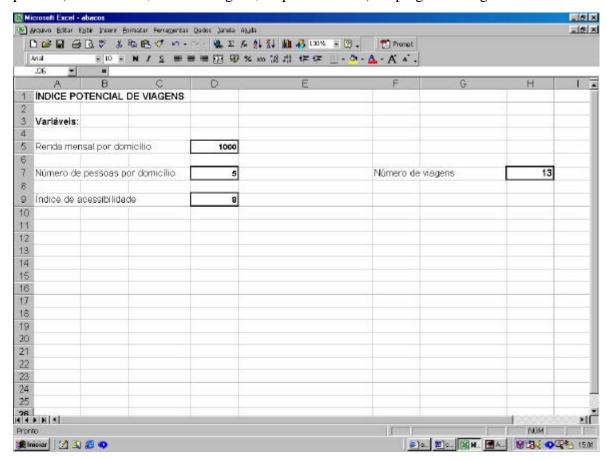


Figura 5.6: Interface com o usuário da planilha eletrônica desenvolvida.

```
 ((1/(1+\text{EXP}(-((((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*0,060732)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,676608)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*1,303802)+3,577654))))*-1,203891)+ \\ ((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*13,127956)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,919379)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*4,466596)+6,303575))))*-2,122853)+((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*-1,583252)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,088837)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*-0,000152)-1,453863))))*-15,312986)+((1/(1+\text{EXP}(-((((RMD-0)/(14000-0))*-12,074375))+(((NPD-1)/(9-1))*5,576448)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*-3,122853)-4,748315))))*-8,882975)+1,898874))))*28)+2
```

Embora pareça complexa, a expressão anterior é uma sequência de alguns poucos procedimentos que se repetem. Por exemplo, algumas parcelas da expressão são

destinadas à normalização dos valores de entrada, como se pode ver nos trechos em destaque a seguir:

Em seguida, aparecem as transformações através da função de ativação, sendo o primeiro trecho assinalado referente ao trecho da rede entre a camada intermediária e o neurônio de saída:

```
 ((\frac{1}{(1+EXP}(-(((\frac{1}{(1+EXP}(-((((RMD-0)/(14000-0))*0,060732)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,676608)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*1,303802)+3,577654))))*-1,203891)+ \\ ((\frac{1}{(1+EXP}(-((((RMD-0)/(14000-0))*13,127956)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,919379)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*4,466596)+6,303575))))*-2,122853)+((\frac{1}{(1+EXP}(-((((RMD-0)/(14000-0))*-1,583252)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,088837)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*0,000152)-1,453863))))*-15,312986)+((\frac{1}{(1+EXP}(-((((RMD-0)/(14000-0))*-12,074375))+(((NPD-1)/(9-1))*5,576448)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*-3,122853)-4,748315))))*-8,882975)+1,898874))))*28)+2
```

Outros trechos são destinados à multiplicação pelos pesos associados às conexões, como mostrado a seguir:

```
(14000-0))*-1,583252)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,088837)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*
0,000152)-1,453863))))*-15,312986)+((1/(1+EXP(-((((RMD-0)/(14000-0))*-12,074375)+
(((NPD-1)/(9-1))*5,576448)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*-3,122853)-4,748315))))*-
8,882975)+1,898874))))*28)+2
```

Outros ainda são relativos à inserção dos valores de bias:

```
 ((1/(1+\text{EXP}(-((((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*0,060732)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,676608)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*1,303802)+3,577654))))*-1,203891)+\\ ((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*13,127956)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,919379)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*4,466596)+6,303575))))*-2,122853)+((1/(1+\text{EXP}(-((((RMD-0)/(14000-0))*-1,583252)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,088837)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*\\ 0,000152)-1,453863))))*-15,312986)+((1/(1+\text{EXP}(-((((RMD-0)/(14000-0))*-12,074375)+(((NPD-1)/(9-1))*5,576448)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*-3,122853)-4,748315))))*-8,882975)+1,898874))))*28)+2
```

Por fim se dá a obtenção dos valores de saída, passando pelo processo de desnormalização. Neste caso, os valores assinalados correspondem aos números máximo (28) e mínimo (2) de viagens reais:

```
 ((1/(1+\text{EXP}(-((((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*0,060732)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,676608)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*1,303802)+3,577654))))*-1,203891)+ \\ ((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*13,127956)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,919379)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*4,466596)+6,303575))))*-2,122853)+((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*-1,583252)+(((NPD-1)/(9-1))*-11,088837)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*-0,000152)-1,453863))))*-15,312986)+((1/(1+\text{EXP}(-(((((RMD-0)/(14000-0))*-12,074375)+(((NPD-1)/(9-1))*5,576448)+(((AC-4,99)/(10,78-4,99))*-3,122853)-4,748315))))*-8,882975)+1,898874))))*28)+2
```

Deve-se observar, no entanto, que novos dados que venham a ser inseridos no modelo para estimar números de viagens futuras terão que estar dentro do intervalo do máximo e mínimo valor para cada variável considerada no modelo. Neste caso, por exemplo, para a variável renda familiar, quaisquer novos dados tem que estar entre 14000 e 0, que são os valores máximo e mínimo, respectivamente. Para evitar que os usuários da planilha venham a inserir valores fora das faixas recomendadas pode-se utilizar ferramentas da própria planilha para limitar os valores de entrada, produzindo simultaneamente uma mensagem para informação do usuário, tal como indicado na figura 5.7.

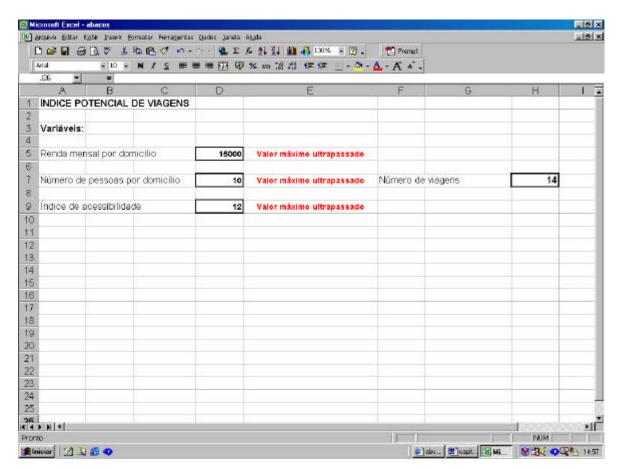


Figura 5.7: Planilha eletrônica com as mensagens de alerta ao serem ultrapassados os valores máximos das variáveis.

Uma vez construído e validado o modelo em planilhas eletrônicas, torna-se fácil verificar o comportamento dos valores de saída frente a variações nos dados de entrada, como pode ser observado nos gráficos das figuras 5.8, 5.9 e 5.10.

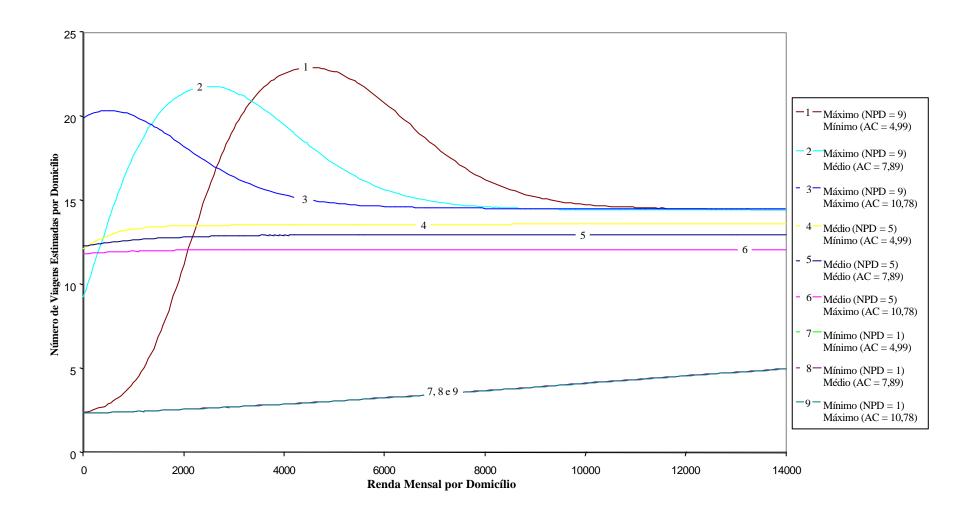


Figura 5.8: Variação da renda média mensal por domicílio, para diferentes condições de acessibilidade (AC) e número de pessoas por domicílio (NPD).

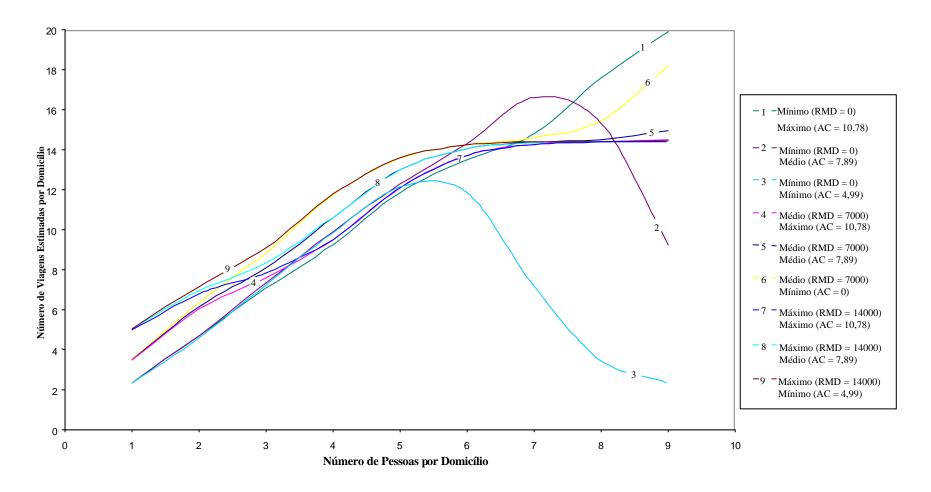


Figura 5.9: Variação do número de pessoas por domicílio, para diferentes condições de acessibilidade (AC) e renda média mensal por domicílio (RMD).

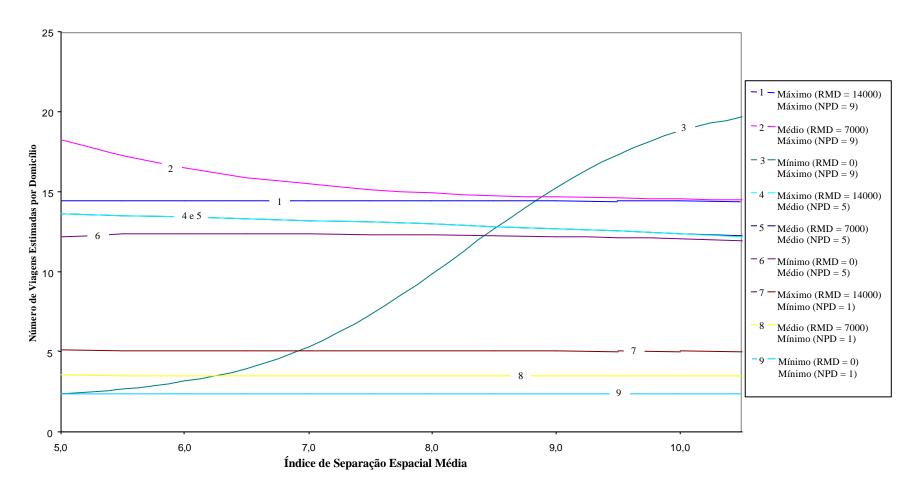


Figura 5.10: Variação do índice de acessibilidade (separação espacial média), para diferentes condições de renda mensal por domicílio (RMD) e número de pessoas por domicílio (NPD).

No caso da renda mensal por domicilio (figura 5.8), foram feitos vários testes usando valores constantes para as variáveis número de pessoas por domicílio e índice de acessibilidade. Do gráfico apresentado pode-se extrair o seguinte: adotando-se valores médios dessas variáveis como constantes (Curva 5) observa-se uma tendência de que, quanto maior a renda, maior o número de viagens. Isto ocorre, no entanto, até um certo valor, depois do qual a tendência se inverte, embora de maneira muito suave, diminuindo ligeiramente o número de viagens enquanto aumenta a renda mensal. Esta mesma tendência se repete com a Curva 6, que reflete o valor médio de número de pessoas e o valor máximo de índice de acessibilidade (pior condição de acessibilidade), valor máximo de número de pessoas e valor mínimo de índice de acessibilidade (Curva 4), valor máximo de número de pessoas e valor médio de índice de acessibilidade (Curva 2) e, finalmente, valor máximo de número de pessoas e valor médio de índice de acessibilidade (Curva 2) e, finalmente, valor máximo de número de pessoas e valor médio de índice de acessibilidade (Curva 1).

Nos três últimos casos citados a tendência é muito evidente, o que talvez seja uma indicação da complexidade do modelo e de como as variáveis devem de fato ser consideradas simultaneamente. Ou talvez este aparente paradoxo seja uma indicação de que o modelo não deveria ser usado nas faixas de renda muito elevadas, uma vez que os dados usados para treinamento são poucos e sujeitos a grande imprecisão, seja porque as viagens são tantas que o entrevistado não declarou todas para o pesquisador, seja porque houve uma informação distorcida quanto à renda.

Já na Curva 7, com valor mínimo de número de pessoas e valor mínimo de índice de acessibilidade, na Curva 8, com valor mínimo de número de pessoas e valor médio de índice de acessibilidade, e na Curva 9, com valor mínimo de número de pessoas e valor máximo de acessibilidade, a tendência é homogênea, onde quanto maior a renda, maior o número de viagens. Além disso, os resultados das estimativas do número de viagens são praticamente idênticas para as três curvas.

No caso do número de pessoas por domicilio (figura 5.9) foi feito o mesmo que para renda mensal, observando-se uma tendência mais definida: para a maior parte das curvas, quanto maior o número de pessoas, maior o número de viagens. As exceções são as Curvas 2, com valor mínimo de renda e valor médio do índice de acessibilidade, e 3, com valor mínimo de renda e valor mínimo do índice de acessibilidade, que têm a mesma

tendência que as outras curvas até um certo valor, após o qual se inverte a tendência. Cumpre observar que mesmo para as curvas com comportamento semelhante, a linha de tendência é irregular, o que é um aparente benefício de se estar modelando o fenômeno através de Redes Neurais Artificiais.

Finalmente, no caso do índice de acessibilidade (figura 5.10) observou-se que duas curvas (a de valor mínimo de renda e valor máximo de número de pessoas por domicílio - Curva 3 - e a de valor mínimo de renda e valor médio de número de pessoas por domicílio - Curva 6) têm uma tendência diferente da maioria das curvas, as quais têm a tendência de que quanto maior (neste caso, pior) o índice de acessibilidade, maior o número de viagens. Há, no entanto, uma significativa diferença entre o comportamento destas duas curvas (3 e 6).

É importante observar que nas curvas com tendências irregulares das figuras 5.9 e 5.10, está sempre presente a variável renda mínima por domicílio.

5.3. Réplica da RNA treinada através de um programa de computador

Outro procedimento desenvolvido para tornar mais imediata a aplicação dos modelos, permitindo diversas análises, foi a elaboração de um programa de computador escrito em *Visual Basic*. Este tipo de programa (ver Anexo), embora simples, permite a construção de interfaces bastante amigáveis para o usuário final, tal como aquela mostrada na figura 5.11.

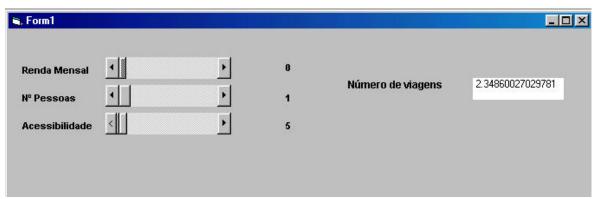


Figura 5.11: Tela do programa feito em Visual Basic visualizada pelo usuário final.

Neste caso, para obter uma estimativa do número de viagens (visualizada no canto direito da tela) basta selecionar os valores de cada variável de entrada (renda mensal, número de pessoas e acessibilidade), deslocando as barras de rolagem associadas à cada

uma delas, mostradas no canto esquerdo da figura 5.11. Um exemplo de variação destes valores pode ser visto na figura 5.12, para uma renda mensal de R\$1000, 4 pessoas por domicílio e um índice de acessibilidade igual a 7,5 km, conduzindo a uma estimativa de 10 viagens.

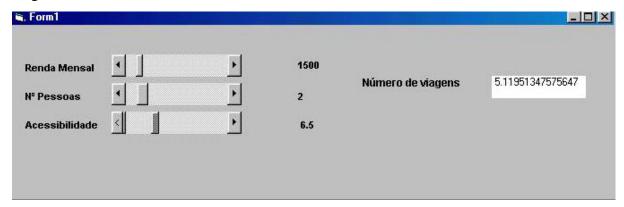


Figura 5.12: Um exemplo de estimativa a partir do programa de computador.

5.4. Desenvolvimento de ábacos

Outro procedimento aqui explorado foram ábacos, construídos a partir do modelo de Rede Neural replicado na planilha eletrônica. Foram construídos gráficos que ilustram a relação entre as três variáveis de entrada (renda mensal, número de pessoas por domicílio e índice de acessibilidade do tipo separação espacial) e a variável de saída (número total de viagens por domicílio). Nas figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 pode-se avaliar o impacto da renda e acessibilidade na geração de viagens para domicílios com diferentes números de pessoas (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 pessoas).

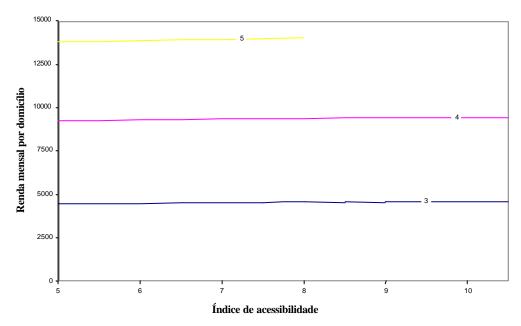


Figura 5.13: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com uma pessoa.

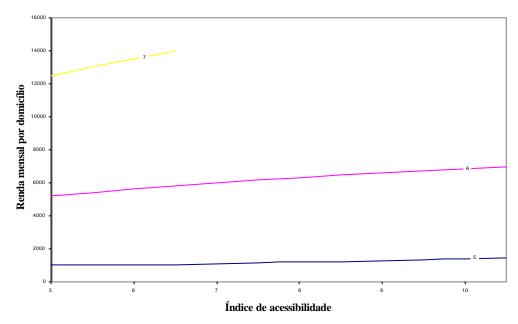


Figura 5.14: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com duas pessoas.

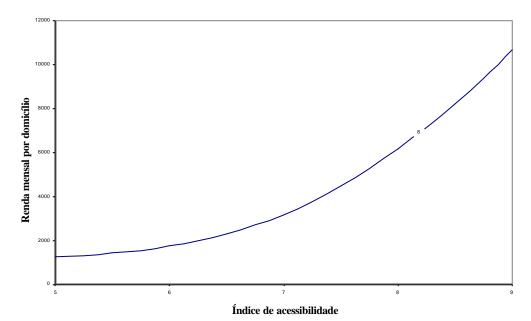


Figura 5.15: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com três pessoas.

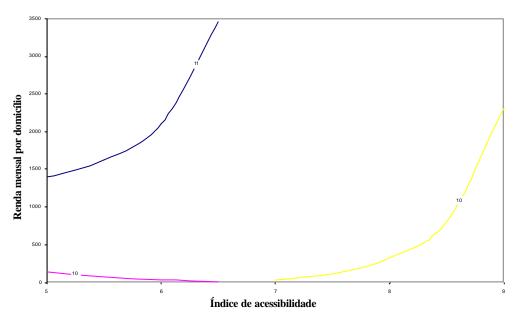


Figura 5.16: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com quatro pessoas.

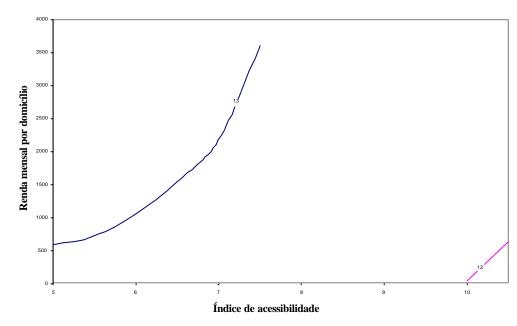


Figura 5.17: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com cinco pessoas.

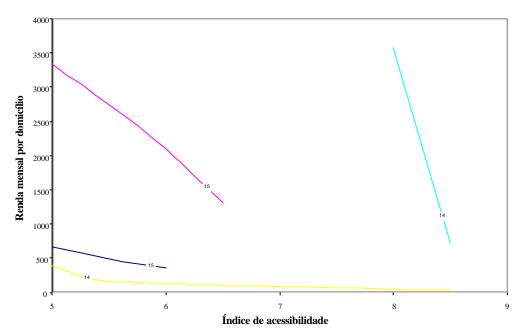


Figura 5.18: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com seis pessoas.

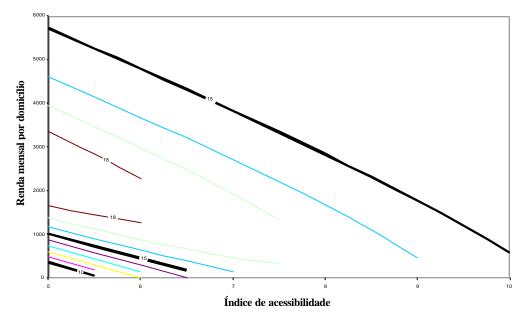


Figura 5.19: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com sete pessoas.

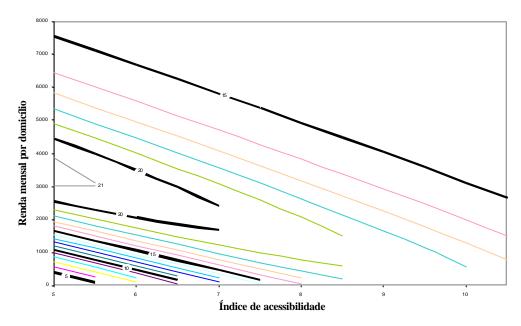


Figura 5.20: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com oito pessoas.

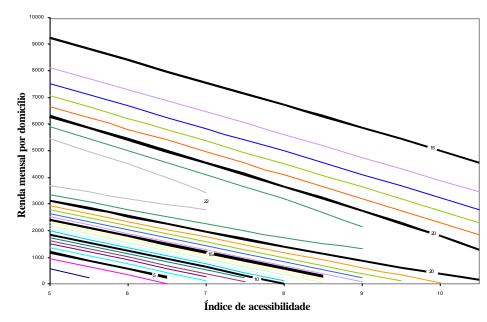


Figura 5.21: Impacto da renda e do índice de acessibilidade no número de viagens geradas em domicílios com nove pessoas.

Pode-se observar na figura 5.13 que o que mais influi no número de viagens é a renda mensal por domicílio, já que, para maior renda mensal maior número de viagens (neste caso, 5 viagens). No entanto, para um mesmo valor de acessibilidade (inclusive para o melhor índice) pode-se obter, para diferentes faixas de renda, tanto o maior número de viagens (5 viagens) como o menor número de viagens (3 viagens).

Nas figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 observa-se que um mesmo número de viagens pode ser estimado para indivíduos com diferentes acessibilidades, desde que às piores acessibilidades correspondam maiores valores de renda. Isto poderia ser explicado pelo fato de que maiores rendas facilitam o uso de modos de transporte motorizado. Há apenas uma excepção a esta tendência no gráfico da figura 5.16, para estimativas de 10 viagens.

Nos gráficos das figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 pode-se notar tendências opostas às das curvas anteriores, o que pode ser explicado pelo fato destes gráficos estarem refletindo dados de domicílios de menor renda e com muitos membros, muitas vezes forçados a realizar viagens por motivo de trabalho mesmo residindo na periferia da cidade (daí os altos valores do índice de acessibilidade).

5.5. Introdução do modelo de RNA em um ambiente SIG

O melhor modelo de RNA foi também introduzido em um ambiente SIG. Através de uma opção encontrada no *software* TransCAD, que consiste em uma "fórmula dinâmica", é possível que qualquer mudança nas variáveis de entrada altere automaticamente os resultados estimados em uma outra coluna da base de dados, de forma semelhante ao que acontece nas planilhas eletrônicas. Para explorar este recurso foi desenvolvida uma aplicação na cidade de Bauru, a partir dos limites dos setores utilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística na Contagem Populacional de 1996, embora com dados extraídos da pesquisa O-D feita na mesma cidade em 1997 (a proposta original era a de utilizar os dados do Censo Demográfico de 1991, mas o IBGE forneceu, por engano, dados agregados ao nível dos municípios). Cabe destacar aqui que algumas áreas ficaram sem dados em virtude da área abrangida pelas zonas de tráfego (em que foram agrupados os dados da pesquisa O-D de 1997) não ser igual à área dos setores censitários da contagem populacional de 1996.

A partir dos dados originais foram feitas simulações de alterações nos valores das variáveis de entrada, de forma a avaliar o impacto das mesmas nos valores de viagens estimadas em diferentes regiões da cidade. Para fins desta análise os setores censitários da cidade foram então agrupados em duas grandes regiões: centro e periferia (figura 5.22). Assim promoveu-se um aumento de 50% na renda média por domicílio para todos os setores censitários da cidade, observando-se o resultado das estimativas de forma imediata na base de dados e construindo-se em seguida mapas temáticos mostrando a variação no número de viagens estimadas antes e depois da alteração na variável de entrada (figura 5.23). De forma análoga, o valor médio da variável de entrada número de pessoas por domicílio para cada setor censitário foi também alterado. Neste caso, todos os setores que tinham menos de 4 pessoas por domicílio (valor médio do setor) foram majorados em 30%. O mapa temático com os resultados da variação no número de viagens aparece na figura 5.24. Em seguida, as duas alterações anteriores foram realizadas de forma simultânea e os resultados aparecem na figura 5.25.

Uma análise dos resultados apresentados nas figuras anteriores aponta que, por exemplo, quando se aumentou somente a variável renda média em 50%, observou-se que o incremento máximo no número de viagens foi do 5% na região central da cidade e de 3% na periferia. As relações entre as viagens estimadas antes e depois do incremento

podem ser observadas na figura 5.23. O maior incremento na zona central deve ser explicado pela concentração de setores com maior renda nesta região. Mais do que isto, um ponto que merece destaque são os valores dos incrementos no número de viagens, que foram pouco expressivos, donde se pode concluir que a variável em questão de fato pouca influência tem no número de viagens produzidas.

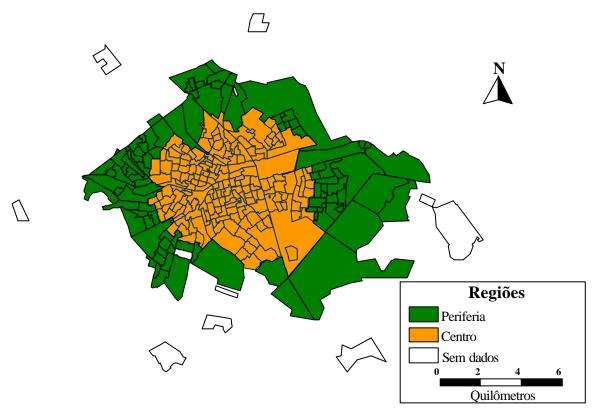


Figura 5.22: Macroregiões em que foram agregados os setores censitários para fins de análise.

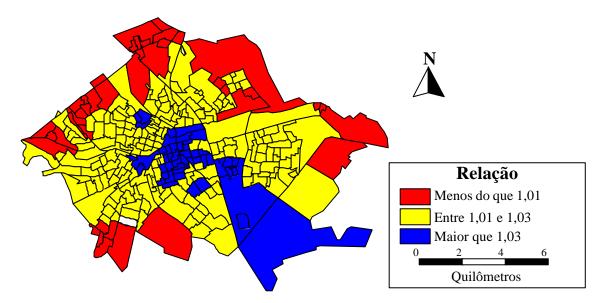


Figura 5.23: Relação entre as viagens estimadas após um incremento de 50% na variável renda média domiciliar e aquelas viagens estimadas originalmente.

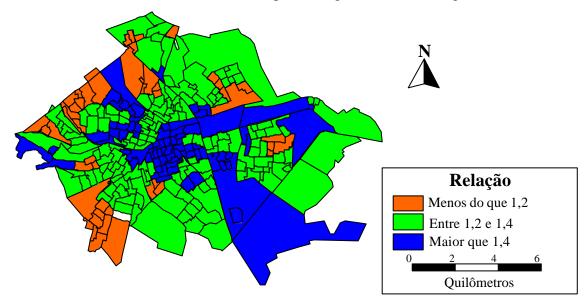


Figura 5.24: Relação entre as viagens estimadas após um incremento de 30% na variável número de pessoas por domicílio (para domicílios com menos de 4 membros) e aquelas viagens estimadas originalmente.

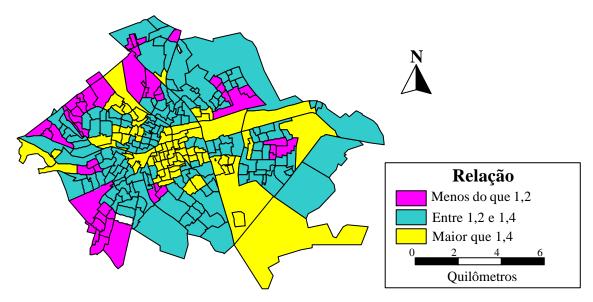


Figura 5.25: Relação entre as viagens estimadas após incrementos de 50% na variável renda média domiciliar e 30% na variável número de pessoas por domicílio (para domicílios com menos de 4 membros) e aquelas viagens estimadas originalmente.

Por outro lado, ao aumentar em 30% o número de pessoas nos domicílios com menos de quatro membros, notou-se que o incremento máximo no número de viagens na região central da cidade foi de 58% e na periferia de 55%. As relações entre as viagens estimadas antes e depois do incremento podem ser observadas na figura 5.24. Cabe destacar aqui a importância da variável número de pessoas, pois a mesma afeta significativamente o número de viagens. É novamente na região central onde se dá o maior incremento, embora não de maneira tão concentrada como no caso da renda.

Mais ainda, quando as duas variáveis foram majoradas ao mesmo tempo, notou-se um incremento máximo no número de viagens de 62% na região central e de 58% na periferia, como se poderia antever a partir da análise isolada dos casos anteriores. As relações entre as viagens estimadas antes e depois do incremento podem ser observadas na figura 5.25. Este resultado se aproxima bastante daquele obtida somente com a alteração da variável número de pessoas, o que reforça a pequena influência da variável renda neste caso.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de procedimentos capazes de tornar mais efetivo o uso de um modelo de Redes Neurais Artificiais gerado para estimar um índice de potencial de viagens. Mais do que isso, no entanto, os procedimentos aqui apresentados podem ser utilizados para quaisquer outros modelos que tenham sido desenvolvidos a partir de Redes Neurais Artificiais, sejam eles ou não para planejamento de transportes.

Na revisão bibliográfica que se conduziu a princípio, tentando identificar procedimentos semelhantes aqueles aqui propostos, somente três trabalhos mereceram destaque, sendo um deles uma tese de Doutorado desenvolvida no Brasil, na área de Veterinária (GUAHYBA, 2001), e dois outros trabalhos realizados por pesquisadores que atuam na área de Transportes nos Estados Unidos (ABDEL-ATY & ABDELWAHAB, 2001a e 2001b). No caso brasileiro o modelo foi replicado em uma planilha eletrônica, enquanto que no caso americano os autores exploraram o uso de gráficos.

Uma vez constatada a relevância da proposta inicial teve início o presente estudo, tendo como base os modelos originalmente desenvolvidos por RAIA JR. (2000) com Redes Neurais Artificiais para estimar viagens urbanas. Os modelos utilizavam como dados de entrada algumas variáveis socioeconômicas obtidas na cidade de Bauru, localizada no estado de São Paulo, Brasil, capazes de caracterizar a mobilidade dos domicílios, e uma medida de acessibilidade, calculada com auxílio de recursos do próprio Sistema de Informações Geográficas que serviu como plataforma para o estudo. Como, no entanto, os modelos originais não apresentavam um desempenho muito bom, o primeiro passo da presente pesquisa foi uma reavaliação dos mesmos, através do

treinamento e verificação de várias arquiteturas de RNA, tomando como referência medidas de avaliação tais como o erro médio quadrático (EMQ) e o coeficiente de determinação (R²). Após uma série de tentativas, que envolveram inclusive novas filtragens dos dados da pesquisa O-D que serviu de base para os modelos originais de RAIA JR. (2000), novos modelos foram obtidos, com desempenho superior ao dos originais.

Com o modelo reformulado de melhor desempenho teve início a fase de identificação de procedimentos alternativos capazes de tornar mais efetiva a aplicação dos modelos desenvolvidos através de Redes Neurais Artificiais (RNA). Dentre as alternativas aqui exploradas estava a reprodução do modelo de RNA em uma planilha eletrônica, o desenvolvimento de um programa em *Visual Basic*, a construção de ábacos e a integração, de forma direta, do modelo de RNA a um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os procedimentos desenvolvidos neste trabalho parecem ser ferramentas rápidas e de fácil manuseio, sobretudo para tomadores de decisão, que muitas vezes não estão acostumados a trabalhar com *software* muito sofisticados.

Todos os procedimentos aqui desenvolvidos (planilha eletrônica, programa em *Visual Basic*, ábacos e introdução do modelo em um ambiente SIG) apresentaram bom desempenho como ferramentas para uso prático, tendo sido demonstrada, através de exemplos, a viabilidade de uso dos mesmos. Um ponto importante é que todas as alternativas se mostraram flexíveis e de fácil adaptação para outras aplicações na área de transportes. Além da capacidade de realizar estimativas, o uso das ferramentas desenvolvidas permite observar de forma clara, por exemplo, o comportamento dos valores de saída como conseqüência de variações nos dados de entrada, ou seja, análises de sensibilidade.

No caso da inserção dos modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) a um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) há ainda outros benefícios imediatos e significativos. Por um lado, os modelos podem utilizar, como variáveis de entrada, atributos de natureza espacial extraídos diretamente do SIG. Além disso, os dados de saída dos modelos, que em geral caracterizam previsões (para cenários futuros, por exemplo), podem ser visualizados tanto na forma numérica como através de mapas temáticos. Estes últimos apresentam grande capacidade de síntese e transmissão da informação mesmo para indivíduos sem formação técnica. Além disso, os mapas temáticos gerados a partir dos resultados encontrados também podem ser considerados

dinâmicos, pois respondem imediatamente à alterações nos dados de entrada com alterações dos valores de saída representados nos mapas.

Para explorar este último recurso foi desenvolvida uma aplicação na cidade de Bauru, a partir dos limites dos setores utilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística na Contagem Populacional de 1996 e dados extraídos da pesquisa O-D de 1997. A proposta original era a de utilizar os dados (tanto os limites dos Setores Censitários quanto as variáveis a eles associadas) do Censo Demográfico de 1991, mas o IBGE enviou, por engano, dados agregados ao nível dos municípios. A substituição dos dados, embora prometida pelo órgão, iria comprometer o prazo previsto para a conclusão deste trabalho, razão pela qual se optou por uma simulação a partir dos dados que se dispunha (no caso, aqueles da pesquisa O-D). Este estudo de caso ilustra bem o potencial da ferramenta que nasce da integração de modelos de RNA em ambiente SIG para o planejamento de transportes, sejam eles para previsão de viagens ou para outros fins, desde que a localização dos valores estimados como saída seja importante no contexto de análise e tomada de decisão. Além disto, é importante destacar a ampliação das possibilidades de realização de análises de sensibilidade, já promissoras se considerados somente os modelos de RNA e os SIG de forma isolada.

Uma recomendação para trabalhos posteriores seria o desenvolvimento de outros procedimentos além daqueles aqui apresentados, bem como a sua aplicação em outros trabalhos na área de transporte que podem se beneficiar do uso de modelos de Redes Neurais Artificiais, ampliando o seu uso na prática. Outra recomendação seria o desenvolvimento de procedimentos semelhantes para outros tipos de Redes Neurais, tais como as redes ART-MAP, SOM (*Self-Organizing Maps*), etc.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-ATY, M.A.; ABDELWAHAB, H.T. (2001a) Development of artificial neural network models to predict driver injury severity traffic accidents at signalized intersections. In: 80th Annual Meeting of Transportation Research Board. *Proceedings* (em CD-ROM). Washington D.C. 27p.
- ABDEL-ATY, M.A.; ABDELWAHAB, H.T. (2001b) Applying fuzzy artmap neural networks to predict driver's injury severity in traffic accidents. In: 9th World Conference on Transportation Research. *Proceedings* (em CD-ROM). Seul, Coréia do Sul, 13p.
- ABDULHAI, B. & RITCHIE, S.G. (1999) Enhancing the universality and transferability of freeway incident detection using a Bayesian-based neural network. *Transportation Research, Part C*, n.7, p.261-280.
- AKINYEMI, E.O. (1998) Understanding urban mobility and accessibility for transportation engineering purposes. Artigo apresentado na 8th World Conference on Transport Research. Antuérpia, Bélgica. 21p.
- AKINYEMI, E.O. & ZUIDGEEST, M. (1998) The use of the sustainability concept in transportation engeneering: past experiences and future challenges. Artigo apresentado na 8th World Conference on Transport Research. Antuérpia, Bélgica.
- ALLEN, W.B.; LIU, D.; SINGER, S. (1993) Accessibility measures of. U.S. Metropolitan Areas. *Transportation Research, Part B*, v.27, n.6, p.439-449.
- ANGELL, C.D. (1989) Mobility futures: an overview. *Transportation Quarterly*, v.43, n.4, p.549-555.
- ARRUDA, J.B.F. (1997) Determinação do impacto de projetos de transportes na acessibilidade do trabalhador às principais zonas de empregos urbanos. In: XI

- Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. *Anais*. Rio de Janeiro, ANPET, v.2, p.975-984.
- ARRUDA, J.B.F. (1999) Determinação do impacto de projetos de transportes na acessibilidade do trabalhador às principais zonas de emprego urbano. In: CNT/ANPET (orgs.) *Transporte em Transformação II*. São Paulo, Makron Books, p.141-154.
- ATTONH-OKINE, N.O. (1994) Predicting roughness progression in flexible pavements using artificial neural networks. In: 3th International Conference on Managing Pavements, San Antonio, Texas, EUA.
- BARTOLOME, R.I. & CACERES, A.M. (1992) La accesibilidad a las redes de transporte como instrumento de evaluación de cohesión económica y social. *Transporte y Comunicación*, n.56, p.33-56.
- BEN-AKIVA, M. & LERMAN, S.R. (1979) Disaggregate travel and mobility-choice models and measuring of accessibility. In: HENSHER, D.A. & STOPHER, P.R. (eds.) *Behavioural travel modelling*. London, Croom Helm, p.654-679.
- BLACK, J. & CONROY, M. (1977) Accessibility measures and the social evaluation of urban structure. *Environment and Planning A*, n.9, p.1013-1031.
- BRAGA, A.P.; CARVALHO, A. P.L.F.; LUDEMIR, T.B. (1998) Fundamentos de redes neurais artificiais. Rio de Janeiro: 11^a Escola de Computação/Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BREGA, J.R.F. (1996) A utilização de redes neurais artificiais em um sistema de gerência de pavimentos. São Carlos. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BRONDINO, N.C.M. (1999) Estudo da influência da acessibilidade na valorização de lotes urbanos através do uso de redes neurais. São Carlos. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BRUTON, M.J. (1979) *Introdução ao planejamento dos transportes*. Trad. Por João B.F. Arruda *et al*. Rio de Janeiro, Interciência / São Paulo, EDUSP.
- BULLOCK, D.; GARRET JR., J.; HENDRICKSON, C. (1993) A neural network for image-based vehicle detection. *Transportation Research*, v.1C, n.3, p.235-247.
- CARRUTHERS, D. & LAWSON, G. (1995) The contribution of transport to the quality of life. In: BLESSINGTON, H.K., (ed.) *Urban Transport*. London, Thomas Telford, p.11-20.

- CERVERO, R. (1988) Land-use mixing and suburban mobility. *Transportation Quarterly*, v.42, n.3, p.429-446.
- CHANG, G.L. & SU, C.C. (1995) Predicting intersection queue with neural network models. *Transportation Research*, *Part C*, v.5, n.5, p.259-271.
- CHEU, R.L. & RITCHIE, S.G. (1995) Automated detection of lane-blocking freeway incidents using artificial neural networks. *Transportation Research, Part C*, v.3, n.6, p.371-388
- CHIN, S.; HWANG, H.; PEI, T. (1994) Using neural networks to synthesize origin-destination flows in a traffic circle. *Transportation Research Record*, n.1457, p.134-142.
- CMSP COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (1990) *Pesquisa* origem e destino 1987: região metropolitana de São Paulo. São Paulo, CMSP.
- CYBENKO, G. (1988) Continuous valued neural networks with two hidden layers are sufficient. *Technical report*, Department of Computer Science, Tufts University.
- CYBENKO, G. (1989) Approximation by superpositions of a sigmoidal function. Mathematics of Control, Signals and Systems, v.2, n.4, p.303-314.
- DALVI, M.Q. & MARTIN, K.M. (1976) The measurement of accessibility: some preliminary results. *Transportation*, v.5, n.1, p.17-42.
- DANTAS, A.; YAMAMOTO, K.; LAMAR. M.V.; YAMASHITA,Y. (2000) Modelo neuro-geo-espacial para previsão da demanda de viagens no contexto do planejamento estratégico. In: SETTI, J.R.A. & CYBIS, H.B.B. (eds.) *Panorama nacional da pesquisa em transportes 2000*, p.13-22, Gramado, Brasil.
- DAVIDSON, K.B. (1977) Accessibility in transport/land-use modeling and assessment. *Environment and Planning A*, v.9, n.12, p.1401-1416.
- DAVIDSON, K.B. (1995) Accessibility and isolation in transportation network evaluation. Artigo apresentado na 7th World Conference on Transport Research. The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- DIA, H. & ROSE, G. (1997) Development and evaluation of neural networks freeway incident detection models using field data. *Transportation Research, Part C*, v.5, n.5, p.313-331.
- DOMANSKY, R. (1979) Accessibility, efficiency and spatial organization. Environment and Planning A, v.11, p.1189-1209.

- DOUGHERTY, M. (1995) A review of neural networks applied to transport. Transportation Research, Part C, v.3, n.4. p.247-260.
- FAGHRI, A. & HUA, J. (1992a) Evaluation of artificial neural network applications in transportation engineering. *Transportation Research Record*, n.1358, p.71-80.
- FAGHRI, A. & HUA, J. (1992b) Trip generation analysis by artificial neural networks. In: 4th International Conference on Microcomputers in Transportation. *Proceedings*, p.805-815.
- FAGHRI, A. & ANEJA, S. (1996) Artificial neural networks-based approach to modeling trip production. *Transportation Research Record*, n.1556, p.131-136.
- FALAS, T. (1995). Neural networks in empirical accounting research: an alternative to statistical models. *Neural Network World*, v.5, n.4, p.419-432.
- FERRAZ, A.C.P. (2001) Transporte Público Urbano. Rima, São Carlos, Brasil.
- FERRANDIZ, J.V.C. (1990) Movilidad y ambiente em ciudades de tipo medio: un nuevo enfoque del problema. *Revista del Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones*, n.46, p.9-18.
- FURTADO, A.N.D. (1998) Uma nova abordagem na avaliação de projetos de transportes: o uso de redes neurais artificiais como técnica para avaliar e ordenar alternativas. São Carlos. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FWA, T. & CHAN, W.T. (1993) Priority rating of highway maintenance needs by neural networks. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, v.119, n.3, p.419-432.
- GARSON, D.G. (1991) Interpreting neural-network connection weights. *AI Expert*, n.6, v.4, p.47-51.
- GIANNOPOULOS, G.A. & BOULOGARIS, G.A. (1989) Definition of accessibility for railways stations and its impact on railway passenger demand. *Transportation Planning and Technology*, v.13, n.2, p.111-120.
- GIULIANO, G. (1995) Land use impacts of transportation investments: highway and transit. In: HANSON, S. (ed.) *The geography of urban transportation*. New York/London, The Guilford Press, p.305-341.
- GUAHYBA, A.S. (2001) Utilização da inteligência artificial (redes neurais artificiais) no gerenciamento de reprodutoras pesadas. Porto Alegre. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Porto Alegre.

- GUTIERREZ, J. & MONZÓN, J.M.A. (1998) Accessibility, network efficiency, and transport infrastructure planning. *Environment and Planning A*, v.30, p.1337-1350.
- HANSON, S. (1995) Getting there: urban transportation in context. In: HANSON, S. (ed.) *The geography of urban transportation*. New York/London, The Guilford Press, p.3-25.
- HAYKIN, S. (1994) *Neural networks: a comprehensive foundation*. New York, Macmillan College Publishing Company.
- HERTZ, J.; KROGH, A.; PALMER R.G. (1991) *Introduction to the theory of neural computation*. Redwood City, Adison-Wiley.
- HINTON, G.E. & SEJNOWSKI, T.J. (1986) Learning and relearning in Boltzmann machines. In: RUMELHART, D.E. & MCCLELLAND, J.L. (ed.) *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. v.1, Cambridge, MIT Press.
- HOPFIELD J.J. (1984) Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. In: The National Academy of Sciences. *Proceedings*. EUA, v. 81, p.3088-3092.
- HSIAO, C.; LIN, C.; CASSIDY, M. (1994) Application of fuzzy logic and neural networks to automatically detect freeway traffic incidents. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, v.120, n.5, p.753-772.
- HUA, J. & FAGHRI, A. (1993) Dynamic traffic pattern classification using artificial neural networks. *Transportation Research Record*, n.1399, p.14-19.
- HUA, J. & FAGHRI, A. (1994) Applications of artificial neural networks to intelligent vehicle-highways systems. *Transportation Research Record*, n.1453, p.83-90.
- HUANG, X.P. & PANT, P.D. (1994) Simulation-neural network model for evaluation dilemma zone problems at high-speed signalized intersections. *Transportation Research Record*, n.1456, p.34-42.
- INGRAM, D.R.(1971) The concept of accessibility: a search for an operational form. *Regional Studies*, v.5, n.2, p. 101-107.
- IVAN, J.N.; SCHOFER, J.L.; KOPPELMAN, F.S.; MASSONE, L.L.E. (1995) Real-time data fusion for arterial street incident detection using neural networks. *Transportation Research Record*, n.1497, p.27-35.

- IVAN, J.N. (1997) Neural network representations for arterial street incident detection data fusion. *Transportation Research*, *Part C*, v.5, n.3/4, p.245-254.
- JOAQUIM, F.M. (1999) Qualidade de vida nas cidades: o aspecto de acessibilidade às atividades urbanas.
 São Carlos. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos.
- JONES, S.R. (1981) *Accessibility measures: a literature review*. Transport and Road Research Laboratory. Departament of the Environment. Departament of Transport. Laboratory Report 67.
- KRALICH, S. (1996) La accesibilidad radial metropolitana como indicador de calidad de vida. In: VIII Congresso Latino-americano de Transporte Público e Urbano. *Anais* (em Disquete). ANTP. Curitiba, Brasil.
- KASEKO, M. & RITCHIE, S.G. (1993) A neural network-based methodology for pavement crack detection and classification. *Transportation Research*, v. 1C, n.4 p.275-291.
- KIKUCHI, S.; NANDA, R.; PERINCHERY, V. (1993) A method to estimate trip o-d patterns using neural network approach. *Transportation Planning and Technology*, v.17, p.51-57.
- KOENIG, J.G. (1980) Indicators of urban accessibility: theory and application. *Transportation*, v.9, n.2, p.145-172.
- LINDEMANN, F.; CAMPOS, V.B.G.; GONÇALVES, A.F.M. (1998) Método de avaliação da acessibilidade viária e sua relação com o uso do solo. In: XII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. *Anais*. Fortaleza, ANPET, v.1, p.457-468.
- LOESCH, C. & SARI, S.T. (1996) *Redes neurais artificiais: fundamentos e modelos.* Blumenau, FURB.
- MARTINELLI, D.R. & TENG, H. (1996) Optimization of railway operations using neural networks. *Transportation Research Part C*, v.4, n.1, p.33-49.
- MEYER, M.D. & MILLER, E.J. (1984) *Urban transportation planning: a decision-oriented approach*. McGraw-Hill, New York, EUA.
- MORENO, J.A.C. (1998) Análisis de la movilidad em grandes áreas urbanas: el caso de Madrid. In: X Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito e Transporte. Santander, Espanha, p.143-153.

- MORRIS, J.M.; DUMBLE, P.L.; WIGAN, M.R. (1979) Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research*, Part A, v.13, n.2, p.91-109.
- MOWFORTH, M.R.N. (1989) Trends in accessibility to employment in Greater London, 1971-1981. *Transportation Planning and Technology*, v.13, n.2, p.85-110.
- MOZOLIN, M.; THILL, J.C.; USERY, E.L. (2000) Trip distribution forecasting with multilayer perceptron neural networks: a critical evaluation. *Transportation Research Part B*, n.34, p.53-73.
- MUSSONE, L.; RINELLI, S.; REITANI, G. (1996) Estimating the accident probability of a vehicular flow by means of an artificial neural network. In: *Environment and Planning B: Planning and Design*, v.23, n.6, p.667-675.
- MUSSONE, L.; FERRARI, A.; ONETA, M. (1999) An analysis of urban collision using an artificial intelligence model. *Accident Analysis and Prevention*, v.1, p.705-718.
- NAKATSUJI, T. & KAKU, T. (1989) Application of neural network models to traffic engineering problems. In: Infrastructure Planning Conference. *Proceedings*. v.12, p.297-304.
- NAKATSUJI, T. & KAKU, T. (1991) Development of a self-organizing traffic control system using neural networks models. *Transportation Research Record*, n.1324, p. 137-145.
- NIJKAMP, P.; REGGIANI, A.; TRITAPEPE, T. (1996) Modelling inter-urban transport flows in Italy: a comparison between neural networks analysis and Logit analysis. *Transportation Research*, *Part C*, v.4, n.6, p.323-338.
- OLIVEIRA, M. E. (2000) *Redes neurais artificiais*. http:// geocities.com/ CapeCanaveral/ Runway/ 4303/ engenhar.html. (05 Nov)
- OWUSU-ABABIO, S. (1995) Modelling skid resistance for flexible pavements: a comparison between regression and neural network models. *Transportation Research Record*, n.1501, p.60-71.
- PANT, P.D. & BALAKRISHNAN, P. (1994) Neural network for gap acdeptance at stop-controlled intersections. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, v.120, n.3, p. 432-446.

- PANT, P.D.; ZHOU, X.; ARUDI, R.S.; BODOCSI, A.; AKTAN, A.E. (1996) Neural-network-based procedure for condition assessment of utility cuts in fexible pavements. *Transportation Research Record*, n.1399, p.8-13.
- PINHEIRO, M.B. (1994). Mobilidade urbana e qualidade de vida: conceituações. In: VIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. *Anais*. Recife, ANPET. v.2, p.405-414.
- PIRIE, G.H. (1979) Measuring accessibility: a review and proposal. *Environment and Planning A*, v.11, n.13, p.299-312.
- POL, M.; ZOUTENDIJK, D.; BLOM, U. (1994) Influence of Dutch mobility policy on emancipation process for women and men. *Transportation Research Record*, n.1493, p.136-142.
- RAIA JR., A.A. (2000) Acessibilidade e mobilidade na estimativa de um índice de potencial de viagens utilizando redes neurais artificiais. São Carlos. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RANDOLPH, D.A. (1996) Application of neural network technology to highway maintenance management. *Transportation Research Record*, n.1533, p.3-10.
- RICHARDSON, A.J. & YOUNG, W. (1982) A measure of linked-trip accessibility. *Transportation Planning and Technology*, v.7, n.2, p.73-82.
- RODGHER, S.F., FABBRI, G.T.P, CARVALHO, A.C.P.L. (1997) A utilização de redes neurais artificiais para classificação de solos tropicais. In: XI Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. *Anais*. Rio de Janeiro, ANPET, v.1, p.51-59.
- RODGHER, S.F. & ODA, S. (1997) Previsão de defeitos em estradas não-pavimentadas através do uso de redes neurais artificiais. In: I Simpósio Internacional de Pavimentação de Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. A*nais*. Rio de Janeiro, v.2, p.617-626.
- RODGHER, S.F.; ODA, S.; FERNANDES Jr., J.L.; FABBRI, G.T.P.; SORIA, M.H.A. (1998) Uso de redes neurais artificiais na seleção de atividades de manutenção e reabilitação de estradas não-pavimentadas. In: XII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. *Anais*. Fortaleza, ANPET, v.1 p.183-196.
- RUIZ, T. & MEDINA, J.R. (2000) Modelos de generación de viajes. Análisis comparativo de la utilización de redes neuronales y regresión lineal múltiple. In: COLOMER J.V. & GARCIA A. (Eds.) IV Congreso de Ingeniería del Transporte, p.189-196. Valencia, Espanha.

- SALES FILHO, L.H. (1998) O uso de indicadores de acessibilidade na avaliação de redes estruturais de transporte urbano. Tribunal de contas do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
- SATHISAN, S.K. & SRINIVASAN, N. (1998) Evaluation of accessibility of urban transportation networks. *Transportation Research Record*, n.1617, p.78-83.
- SCHOON, J. G.; MACDONALD, M.; LEE, A. (1999). Accessibility indices: pilot study and potential use in strategic planning. Artigo apresentado no 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C. 26p.
- SHIMBEL, A. (1953) Structural parameters of communications networks. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, v.15, p.501-507.
- SHMUELI, D.; SALOMON, I.; SHEFER, D. (1996) Neural network analysis of travel bahavior: evaluating tools for prediction. *Transportation Research, Part C*, v.4, n.3, p.151-166.
- STAHL, A. (1987). Changing mobility patterns and the aging population in Sweden. *Transportation Research Record*, n.1135. p.37-41.
- STEPHANEDES, Y. & XIAO, L. (1995) Artificial neural network for freeway incident detection. *Transportation Research Record*, n.1494, p.91-97.
- STEMERDING, M.P. (1996) *Modelling constraints-based choices for leisure mobility planning*. Technische Universiteit Eindhoven. Bouwstenen, Proefschrift, Eindhoven, n.43.
- SUBRAMANIAN, V.; HUNG, M.S.; HU, M.Y. (1993) An experimental evaluation of neural networks for classification. *Computers & Operations Research*, v.20, n.7. p.769-782.
- TAAFFE, E.J. & GAUTHIER, H.L. (1973) *Geography of transportation*. Foundations of Economic Geography Series. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- TAGORE, M.R. & SIKDAR, P.K. (1995) A new accessibility measure accounting mobility parameters. In: 7th World Conference on Transport Research. *Proceedings*. Sydney, Australia, v.1, p. 305-315.
- TAHA, M. & HANNA, A.S. (1995) Evolutionary neural network model for the selection of pavement maintenance strategy. *Transportation Research Record*, n.1497, p.70-76.
- TUBB, N.R. (1993) A development path to sucess in neural computing. *Expert Systems Applications*, v.9, n.5, p.5-9.

- VAN DER WAERDEN, P.; BORGERS, A.; TIMMERMANS, H.; SMEETS, J.; SILVA, A.N.R. (1999). The validity of conventional accessibility measures: objective scores versus subjective evaluations. In: XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. *Anais*. São Carlos, ANPET, v.1, p. 40–49.
- VASCONCELLOS, E.A. (1996a) *Transporte urbano nos países em desenvolvimento*. São Paulo, Unidas.
- VASCONCELLOS, E.A. (1996b) *Transporte urbano, espaço e equidade.* São Paulo, Unidas.
- VICKERMAN, R.W. (1974) Accessibility, attraction and potential: a review of some concepts and their use in determining mobility. *Environment and Planning A*, v.6, n.6, p.675-691.
- VITELA, J.E.; HANEBUTTE, U.R.; REIFMAN, J. (1996) An artificial neural network controller for intelligent transportation systems applications. In: *Neural Network Applications in Highway and Vehicle Engineering Conference*, Washington, D.C., EUA.
- VUKADINOVIC, K.; TEODOROVIC, D.; PAVKOVIC G., ROSIC, S. (1996) A neural network approach to mitigation of vehicle schedule disturbances. *Transportation Planning and Technology*, v.20, p.93-102.
- WACHS, M. & KOENIG, J.G. (1979). Behavioural modelling, accessibility, mobility and travel need. In: HENSHER, D.A.; STOPHER, P.R. eds. *Behavioural travel modelling*. Croom Helm, Beckhham, Kent. p. 698-710.
- WASSERMAN P.D. (1989) *Advanced methods in neural computing*. New York, Van Nostrand Reinhold.
- WEI, C. & SHONFELD, P. (1994) An artificial neural network approach for evaluating transportation network improvements. *Journal of Advanced Transportation*, v.27, n.2, p.129-151.
- WERMERSCH, F.G. & KAWAMOTO, E. (1999) Uso de redes neurais artificiais para caracterização do comportamento de escolha do modo de viagem. In: XIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. *Anais*. São Carlos, ANPET, v.3, p.31-34.

8. LITERATURA CONSULTADA

- BRONDINO, N.C.M. & SILVA A.N.R. (1999) Combining artificial neural networks and GIS for land valuation purposes. In: RIZZI P. (ed.). 6th International Conference Computers in Urban Planning and Urban Management. *Proceedings* (em CD-ROM), Franco Angeli, Veneza, Itália.
- CARVALHO, M.C.M. (1999) Previsão de demanda de transportes: uma abordagem não linear usando redes neuronais. In: XIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes. *Anais*. São Carlos, ANPET, v.1, p.187-200.
- COSTA, A. & MARKELLOS, R.N. (1997) Evaluating public transport efficiency with neural networks models. *Transportation Research*, *Part C*, v.5, n.5, p.301-312.
- COUTINHO NETO B. (2000) Redes neurais artificiais como procedimento para retroanálise de pavimentos flexíveis. São Carlos. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RAO, C.V.S.; RAO, K.V.K.; SIKDAR, P.K. (1999) Micro-simulation model for service employment location using ANN. In: RIZZI, P. (ed.) 6th International Conference Computers in Urban Planning and Urban Management. *Proceedings* (em CD-ROM), Franco Angeli, Veneza, Itália.
- RAO, C.V.S. & RAO, K.V.K. (2001) A micro-analytic land use model using artificial neural networks. In: 9th World Conference on Transport Research. *Proceedings* (em CD-ROM). The Korean Transport Institute & Korean Society of Transportation, Seul, Coréia do Sul. 21 p.

VALENÇA, M.J.S. (1999) Aplicações de redes neurais. *In*: GALVÃO, C.O. & VALENÇA, M.J.S. (organizadores) *Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambiental*. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

ANEXO

CODIGO FONTE DO PROGRAMA EM VISUAL BASIC

Call Neuronio3

```
Private Sub Acceso_Change()
If Result < 10.5 Then
  Result = Result + 0.5
  Label3.Caption = Str(Result)
  Call Neuronio1
  Call Neuronio2
  Call Neuronio3
  Call Neuronio4
  Call Saida
End If
End Sub
Private Sub Command1_Click()
  If (Val(Label3.Caption) > 5) Then
    Label3.Caption = Str(Val(Label3.Caption) - 0.5)
    Result = Result - 0.5
    Call Neuronio1
    Call Neuronio2
    Call Neuronio3
    Call Neuronio4
    Call Saida
  End If
End Sub
Private Sub Form_Activate()
 Result = 5
 e = 2.71828182845904
 N11 = 0.060732
 N12 = -11.676608
 N13 = 1.303802
 N21 = 13.127956
 N22 = -11.919379
 N23 = 4.466596
 N31 = -1.583252
 N32 = -11.088837
 N33 = 0.000152
 N41 = -12.074375
 N42 = 5.576448
 N43 = -3.122853
 N51 = -1.203891
 N52 = -2.122853
 N53 = -15.312986
 N54 = -8.882975
 B1 = 3.577654
 B2 = 6.303575
 B3 = -1.453863
 B4 = -4.748315
 B5 = 1.898874
 Nacess = 5.79
 Minacess = 4.99
 Maxrenda = 14000
 Npess = 8
 Minpess = 1
 Call Neuronio1
 Call Neuronio2
```

```
Call Neuronio4
Call Saida
End Sub
Private Sub Persona_Change()
 Label2.Caption = Persona.Value
 Call Neuronio1
 Call Neuronio2
 Call Neuronio3
 Call Neuronio4
 Call Saida
End Sub
Private Sub Renda_Change()
 Label 1. Caption = Renda. Value
 Call Neuronio1
 Call Neuronio2
 Call Neuronio3
 Call Neuronio4
 Call Saida
End Sub
Sub Neuronio1()
Dim Dat1 As Integer
Dim Dat2 As Integer
Dim Dat3 As Double
Dat1 = Val(Label1.Caption)
Dat2 = Val(Label2.Caption)
Dat3 = Val(Label3.Caption)
 (((Dat3 - Minacess) / Nacess) * N13) + B1))))
End Sub
Sub Neuronio2()
Dim Dat1 As Integer
Dim Dat2 As Integer
Dim Dat3 As Double
Dat1 = Val(Label1.Caption)
Dat2 = Val(Label2.Caption)
Dat3 = Val(Label3.Caption)
  (((Dat3 - Minacess) / Nacess) * N23) + B2))))
End Sub
Sub Neuronio3()
Dim Dat1 As Integer
Dim Dat2 As Integer
Dim Dat3 As Double
Dat1 = Val(Label1.Caption)
Dat2 = Val(Label2.Caption)
Dat3 = Val(Label3.Caption)
 (((Dat3 - Minacess) / Nacess) * N33) + B3))))
End Sub
```

```
Sub Neuronio4()
Dim Dat1 As Integer
Dim Dat2 As Integer
Dim Dat3 As Double
Dat1 = Val(Label1.Caption)
Dat2 = Val(Label2.Caption)
Dat3 = Val(Label3.Caption)
      Label9.Caption = Str(1 / (1 + e^{(((Dat1 / Maxrenda) * N41) + ((((Dat2 - Minpess) / Npess) * N42) +
(((Dat3 - Minacess) / Nacess) * N43) + B4))))
End Sub
Sub Saida()
Dim Dat4 As Double
Dim Dat5 As Double
Dim Dat6 As Double
Dim Dat7 As Double
Dat4 = Val(Label4.Caption)
Dat5 = Val(Label7.Caption)
Dat6 = Val(Label8.Caption)
Dat7 = Val(Label9.Caption)
      Label10.Caption = Str(((1/(1 + e^{((Dat4 * N51) + (Dat5 * N52) + (Dat6 * N53) + (Dat7 * N54) +
B5)))) * 28) + 2)
End Sub
Crear um módulo (module) e colocar a seguinte informação:
Global Result As Double
Global e As Double
Global N11 As Double
Global N12 As Double
Global N13 As Double
Global N21 As Double
Global N22 As Double
Global N23 As Double
Global N31 As Double
Global N32 As Double
Global N33 As Double
Global N41 As Double
Global N42 As Double
Global N43 As Double
Global N51 As Double
Global N52 As Double
Global N53 As Double
Global N54 As Double
Global B1 As Double
Global B2 As Double
Global B3 As Double
Global B4 As Double
Global B5 As Double
Global Nacess As Double
Global Minacess As Double
Global Maxrenda As Double
Global Npess As Double
Global Minpess As Double
```