

## EVOLUÇÃO COMPORTAMENTAL NAS DECISÕES LOCACIONAIS E DE VIAGENS EM FORTALEZA A PARTIR DA CALIBRAÇÃO DE UM MODELO LUTI

**Francelino Franco Leite de Matos Sousa**

Centro Universitário Christus

**Isabela Ribeiro de Castro**

**Carlos Felipe Grangeiro Loureiro**

Universidade Federal do Ceará

### RESUMO

A acessibilidade tem sido compreendida como um resultado conjunto da distribuição espacial das atividades e da impedância aos deslocamentos. Entretanto, os desempenhos dos subsistemas de uso do solo e de transportes são dependentes do comportamento dos usuários nas suas decisões locacionais e de viagens. Reconhecendo-se que esse comportamento pode se alterar ao longo do tempo, constata-se a importância de sua compreensão no processo de planejamento urbano integrado. Considerando que calibrar modelos matemáticos e estatísticos fornece parâmetros quantitativos que possibilitam a representação do comportamento decisório, este artigo objetiva caracterizar as mudanças comportamentais nas decisões locacionais e de viagens em Fortaleza no começo do século XXI, a partir do esforço de calibração do modelo LUTI TRANUS. Verificou-se, além da manutenção de determinadas tendências, que o comportamento nas decisões sobre uso do solo e mobilidade em Fortaleza tem se alterado no sentido de uma maior verticalização e maior utilização dos modos motorizados individuais.

### ABSTRACT

Accessibility has been understood as a joint result of the spatial distribution of activities and the displacement impedance. However, the performances of the land-use and transport subsystems are dependent on the users' behavior in their locational and travel decisions. Recognizing that this behavior may change over time, the importance of its understanding in the integrated urban planning process is evident. Considering that calibrating mathematical and statistical models provides quantitative parameters that allow the representation of the decisional behavior, this article aims to characterize the behavioral changes in locational and travel decisions in Fortaleza at the beginning of the 21st century, based on the calibration effort of the TRANUS LUTI model. It was found that, in addition to maintaining certain trends, the behavior related to land-use and mobility decisions in Fortaleza has changed towards more verticalization and higher use of individual motorized modes.

### 1. INTRODUÇÃO

A acessibilidade, definida como a facilidade com que os indivíduos alcançam as atividades desejadas por uma combinação de modos de transportes (Geurs e van Wee, 2004), vem se tornando central no processo de planejamento urbano integrado de uso do solo e transportes (Handy, 2005). Cada um desses dois elementos do planejamento territorial pode ser compreendido como um sistema dinâmico, composto por uma interligada cadeia de relações entre componentes de demanda e oferta, que contribuem para o estabelecimento do seu desempenho, o qual interfere nos demais subsistemas urbanos (van Wee *et al.*, 2019). Assim, intervenções em quaisquer desses subsistemas potencialmente provocam alterações na dinâmica entre eles. Por conta disso, defende-se que sejam avaliadas de acordo com o quanto minimizam as desigualdades socioeconômicas na provisão da acessibilidade e mobilidade urbanas (Garcia *et al.*, 2018).

Em análises de avaliação *ex-ante* e *ex-post* de políticas de intervenção, os modelos LUTI (acrônimo em inglês para *Land-Use and Transport Interaction*) são reconhecidamente importantes por conseguirem simular conjuntamente o efeito das políticas sobre as decisões locacionais e de viagens (Saujot *et al.*, 2016). Entretanto, esses esforços de avaliação ainda não consideram os efeitos que políticas públicas possuem sobre o comportamento decisório dos usuários, especialmente em decorrência da inexistência de dados longitudinais, o que inviabiliza a compreensão da evolução temporal desses comportamentos (van Wee *et al.*, 2019). Uma vez que a acessibilidade decorre justamente de interações entre demanda e oferta dos

subsistemas urbanos, considera-se necessário que a sua caracterização seja complementada pelo entendimento de como se modifica o comportamento dos usuários. Aspectos representativos desse comportamento podem ser quantificados a partir de uma análise interpretativa de parâmetros calibrados de modelos de previsão de demanda (Gudmundsson, 2011). Na maioria dos modelos LUTI, esses parâmetros não se alteram como resultado do próprio modelo, mas em decorrência de uma intervenção do modelador no processo de calibração (Hunt *et al.*, 2005).

Dadas as alterações urbanas ocorridas no uso do solo e nos transportes em Fortaleza no começo do século XXI, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar as mudanças comportamentais da população da cidade nas suas decisões locacionais e de viagens, a partir da interpretação dos parâmetros de um modelo LUTI. Esse objetivo tornar-se-á possível por meio de uma estrutura composta por mais cinco seções. A seção 2 será destinada à análise dos processos decisórios locacionais e de viagens. Na seção 3, apresenta-se uma discussão acerca de como o modelo LUTI TRANUS representa esses processos. Na seção 4, apresenta-se a proposta metodológica de calibração do TRANUS, baseada em uma análise interpretativa dos parâmetros; enquanto na seção 5, essa proposta é aplicada e os resultados obtidos são utilizados para descrever a evolução comportamental da população de Fortaleza. Por fim, na seção 6, conclui-se o trabalho destacando suas principais contribuições e sugerindo estudos futuros.

## 2. PROCESSOS DECISÓRIOS LOCACIONAIS E DE VIAGENS

O processo de tomada de decisão envolve escolhas relativas a ações que se materializam no futuro. Dessa maneira, tanto essas ações, quanto os seus potenciais resultados, precisam ser previamente projetados no pensamento e na imaginação dos decisores. Nas discussões que analisam o processo de tomada de decisão, uma escolha é conceituada como uma dentre várias alternativas; enquanto os resultados da escolha, por sua vez, podem ser descritos e compreendidos como conjuntos de atributos (Golledge e Gärling, 2004). Bamberg *et al.* (2011) representam o processo decisório de viagens para usuários de automóvel como uma sequência de acontecimentos e elementos que atuam modificando o comportamento dos usuários e, conseqüentemente, suas escolhas de mobilidade. Partindo da proposta dos autores, elaborou-se a Figura 1 como uma tentativa de representar os processos decisórios locacionais e de viagens.

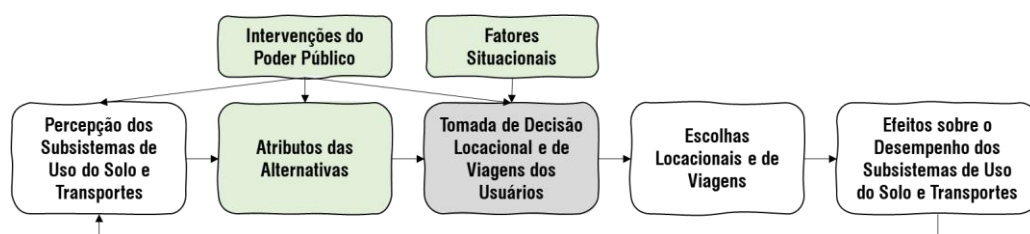


Figura 1: Uma proposta conceitual dos processos decisórios locacionais e de viagens

A percepção dos usuários sobre os subsistemas de uso do solo e de transportes fornece informações para que estabeleçam seu conjunto pessoal ou familiar de alternativas de escolha, seja para as decisões locacionais ou de viagens. Além desses subsistemas, fatores situacionais externos às alternativas, como características socioeconômicas e demográficas dos usuários, ou ainda aspectos exógenos como o clima, influenciam suas preferências por algumas das alternativas e a relevância alocada a determinados atributos. Nas decisões de viagens, estão incluídas escolhas, como os modos e rotas de deslocamento, para realizar determinadas atividades em um período do dia, considerando atributos como tempo e custo de cada alternativa. Por sua vez, as decisões locacionais dizem respeito à escolha de indivíduos de onde

residir ou de empresas de onde ofertar uma atividade comercial, uma prestação de serviços ou outras atividades econômicas, sendo os decisores influenciados pelo mercado imobiliário. Logo, possuem como atributos o preço de cada edificação, seu tamanho ou consumo de solo, além da facilidade de acesso às atividades desejadas (acessibilidade), dentre outros.

Em Fortaleza, diversas alterações têm ocorrido nas duas décadas iniciais do século XXI que podem estar contribuindo para alterações no comportamento da sua população. Em termos de fatores situacionais, destacam-se: o aumento expressivo na posse de veículos motorizados individuais, o envelhecimento da população e o aumento do PIB *per capita* (IPECE, 2020). Verificam-se ainda alterações de elementos urbanos que atuam como atributos das decisões, como o aumento dos tempos de viagem para todas as classes de renda (IBGE, 2001, 2015) e um aumento relativo da tarifa de transporte público, maior que o da inflação e do que o preço médio dos combustíveis. Quanto às decisões locacionais, tem-se observado nesse período um aumento do preço do solo em regiões centrais e o desenvolvimento de novas subcentralidades urbanas em periferias, aumentando sua atratividade (Rufino, 2012).

Conforme proposto na Figura 1, as intervenções, por sua vez, modificam diretamente os subsistemas urbanos e podem levar a mudanças nas escolhas quando os usuários reconhecem as consequências dessas ações sobre o conjunto das alternativas, julgando que são razões suficientes para modificar suas escolhas atuais. No subsistema de transportes, o poder público é o principal ente de intervenção na oferta, criando e modificando alternativas para as decisões de viagens dos usuários. Já no subsistema de uso do solo, existem outros atores urbanos que intervêm sobre a oferta, produzindo ambientes construídos (como novas edificações, para serem vendidas ou alugadas), enquanto o poder público atua regulando o uso e a ocupação do solo.

Fortaleza passou por intervenções relevantes neste começo de século, que podem também estar modificando o comportamento da população. Dentre as interferências no sistema de transportes, destacam-se: a implantação da integração tarifária e temporal do sistema de transporte público por ônibus; a construção de linhas de metrô e VLT para conectar a periferia oeste à região central da cidade; além de obras viárias que elevaram a acessibilidade da periferia leste (Sousa, 2019). Já em relação às intervenções no uso do solo, destacam-se a aprovação do Plano Diretor Participativo de Fortaleza de 2009, que ordenou a cidade por meio de zonas de controle e zonas ambientais especiais (Lopes *et al.*, 2020), e os incentivos à viabilização de grandes equipamentos institucionais e de serviços na periferia da cidade (Diógenes, 2012).

São, portanto, essas decisões espaciais de longo e curto prazos, influenciadas por intervenções, fatores situacionais e atributos das alternativas, que são representadas pelos modelos LUTI. Entre as diversas abordagens de simulação LUTI, destaca-se, neste artigo, aquelas relativas aos modelos econométricos. Esses especificam as decisões como um conjunto de relações agregadas, com base no comportamento de um indivíduo (ou grupo de indivíduos), por meio de modelos baseados na teoria da utilidade (Iacono *et al.*, 2008). Dessa forma, possibilitam uma compreensão da evolução comportamental por meio dos parâmetros calibrados, pois representam a preferência por determinada alternativa, ou o peso de um atributo, considerados pelos usuários ao tomarem suas decisões locacionais e de viagens.

### 3. MODELAGEM DAS DECISÕES LOCACIONAIS E DE VIAGENS NO TRANUS

Dentre os modelos LUTI econométricos, esta seção discute o modelo TRANUS (de la Barra, 1989) quanto à sua capacidade de representar os elementos que podem modificar o

comportamento dos usuários. O TRANUS foi escolhido pois incorpora as inter-relações entre os subsistemas de uso do solo e transportes com desagregação espacial e de atividades condizente com análises de planejamento estratégico. Além disso, possui parâmetros que permitem a identificação das preferências dos usuários quanto aos tipos de solo, localização e modos de transportes (Sousa *et al.*, 2017). A modelagem das decisões locais inicia-se com um modelo espacial de insumo-produto, que permite que as atividades desagregadas em diferentes tipos tenham sua demanda modelada para cada zona, a qual é conectada às zonas de produção por meio de um modelo *logit multinomial* (de la Barra, 1989). Essa conexão entre zonas de demanda e de produção permite a estimação de uma matriz origem-destino, a qual é atribuída à rede de transportes em diferentes combinações de modo e rota, a depender dos custos e tempos de deslocamento (Iacono *et al.*, 2008). A acessibilidade é calculada como uma medida de utilidade composta (tipo *logsum*) do modelo de escolha do modo e rota, sendo um atributo no modelo de decisão locacional das possíveis alternativas de localização (Hunt *et al.*, 2005).

Para incorporar os fatores situacionais relativos às características dos indivíduos ou das famílias sobre as decisões, pode-se subdividir cada entidade modelada. No TRANUS, os residentes da área de estudo podem ser representados por classes de domicílios, as atividades produtivas por diferentes tipos de empregos, o solo de acordo com a atividade que irá lhe ocupar, e as viagens em função dos seus tipos e modos utilizados; ficando o modelador livre para definir quais e quantas categorias serão essas. Já a capacidade de representar os fatores situacionais relativos ao ambiente relaciona-se com as escalas temporais de simulação dos modelos. No TRANUS, as decisões locais são modeladas em intervalos discretos de tempo, os quais devem representar um período suficiente para a consolidação de novos padrões locais; enquanto as decisões de viagens são modeladas para um período de um dia típico.

Hunt *et al.* (2005) verificaram que o TRANUS reproduz políticas tarifárias, de implantação de infraestrutura e gerenciamento de serviços de transportes, mas não representa bem políticas regulatórias (como políticas de estacionamento e programas de manutenção veicular). Identificaram que a agregação espacial baseada em grandes zonas limita a sensibilidade do modelo na análise do desempenho da malha viária. Entretanto, perceberam que a regulamentação do uso do solo (como o zoneamento e limites de crescimento urbano) pode ser implementada no modelo TRANUS por meio da imposição exógena de restrições ao desenvolvimento de certos tipos de solo em determinadas zonas, conseguindo também simular políticas de taxa de propriedades, edificações governamentais e políticas de assentamento populacional.

Entretanto, Hunt *et al.* (2005) destacam que o TRANUS só consegue refletir políticas que visam a mudar o comportamento das pessoas, como aquelas de cunho educacional ou promocional, por meio de mudanças exógenas nos valores dos parâmetros do modelo. Como esses parâmetros são calibrados com base em dados históricos observados, o modelo apenas captura, na melhor das hipóteses, as preferências comportamentais manifestadas nos dados históricos. Portanto, para usá-lo como modelo de previsão, deve-se supor que essas preferências comportamentais se mantêm no futuro (Miller, 2018). Ao se calibrar esse modelo, reduzindo as diferenças entre medidas de desempenho coletadas e modeladas (Capelle *et al.*, 2015), reforça-se a transversalidade temporal de ajuste do modelo, limitando sua utilização como ferramenta de projeção para avaliação de políticas de intervenção. Esses modelos ainda precisam estar adequadamente calibrados para a avaliação estratégica da problemática (Garcia *et al.*, 2018), etapa do planejamento urbano integrado que incorpora a compreensão das condições passadas

nos níveis de acesso da população (Sousa, 2019). Por conta disso, torna-se necessário calibrá-los valorizando a representatividade do comportamento decisório dos usuários pelos parâmetros e reconhecendo que esses comportamentos estão em constante adaptação (Sousa, 2019).

#### 4. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DO TRANUS PARA FORTALEZA

Nesta seção será descrita apenas uma parte do esforço de calibração do TRANUS para Fortaleza (Sousa, 2019), destacando os modelos que simulam as decisões locais e de viagens, e a calibração dos parâmetros que representam aspectos comportamentais da tomada de decisão. O processo tem início na calibração do modelo para o ano 2000, o qual serve de ponto de partida para a calibração do ano 2015, de tal forma que seja possível identificar as alterações dos parâmetros entre os dois cenários de análise.

As atividades produtivas foram separadas em 5 tipos: industrial (IND), administração pública (ADM), comercial (COM), serviços (SER) e educacional (EDU). A população foi dividida em 4 tipos: baixa renda cativa - domicílios com renda de até 3 salários mínimos (SM) e que não possuem carro/moto (CAT); baixa renda não cativa - domicílios com renda de até 3 SM e que possuem carro/moto (BR); média renda - domicílios com renda entre 3 e 8 SM (MR); e alta renda - domicílios acima de 8 SM (AR). A área ocupada foi subdividida em 4 tipos de acordo com o uso a que se destina e com o índice de aproveitamento do lote: solo residencial de baixo índice de aproveitamento (RBI); solo residencial de alto índice de aproveitamento (RAI); solo não residencial de baixo índice de aproveitamento (NRBI); e solo não residencial de alto índice de aproveitamento (NRAI). O limite que dividiu os índices de aproveitamentos dos lotes foi 3, pois verificou-se uma distribuição espacial distinta entre os tipos de solos em 2015.

Os deslocamentos foram modelados para a hora de pico da manhã e agrupados em 6 tipos: viagens por motivo trabalho da população de baixa renda cativa pelo transporte coletivo (TRAB\_CAT); viagens por motivo trabalho da população de baixa renda não cativa pelo transporte coletivo (TRAB\_BR); viagens por motivo trabalho da população de média renda (TRAB\_MR); viagens por motivo trabalho da população de alta renda (TRAB\_AR); viagens por motivo educação (EDUC) e viagens por outros motivos (OUT). Elas foram simuladas a partir de um conjunto de 241 zonas, que possuem um raio médio de 500 metros (Lima, 2017).

##### 4.1. Calibração dos Modelos de Uso de Solo

A primeira parte da modelagem do uso do solo é a simulação da decisão locacional, na qual estima-se a quantidade do setor (atividade ou população) 'm' que se localiza em uma zona 'j'. Seu principal modelo é um logit multinomial, que simula as probabilidades de localização do setor 'm' em cada zona 'j', como apresentado na Equação 1. Três parâmetros fazem parte da formulação do modelo: o  $A_j^m$ , que é a atratividade de localizar o setor 'm' na zona 'j'; o  $\alpha^m$ , que regula a importância entre a atratividade e a função de utilidade para a decisão locacional; e o  $\beta^m$ , que é a elasticidade de consumo do modelo logit calibrada a partir do percentual de trabalho que ocorre no mesmo lugar que o domicílio, coletado da Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios (PNAD).

$$Pr_{ij}^m = \frac{(A_j^m)^{\alpha^m} \cdot \exp(-\beta^m \cdot \tilde{U}_{ij}^m)}{\sum_j [(A_j^m)^{\alpha^m} \cdot \exp(-\beta^m \cdot \tilde{U}_{ij}^m)]} \quad (1)$$

A desutilidade do modelo logit ( $\tilde{U}_{ij}^m$ ) possui dois componentes: o preço para a realização da atividade e a desutilidade de deslocamento entre a zona de demanda e as prováveis zonas de

localização desse setor, que representa a acessibilidade. Para regular a importância entre os dois atributos da desutilidade, existe no modelo o fator de preço ( $\lambda^m$ ). A quantidade do setor 'm' na zona 'j' demandada em 'i' é obtida a partir da multiplicação da demanda por essa atividade e da probabilidade do modelo logit. Na segunda parte da modelagem do uso do solo, dois modelos são responsáveis por simular a quantidade de solo ocupado. O primeiro deles é um modelo de demanda elástica (Equação 2), que simula a área de solo do tipo 'n' ocupado para cada unidade do setor 'm'. A desutilidade de consumo ( $U_i^n$ ) é a soma do preço de aluguel de uma unidade de área do tipo de solo 'n' na zona 'i' ( $p_i^n$ ) e do preço sombra de uma unidade de área desse solo do tipo 'n' na zona 'i' ( $h_i^n$ ), que resulta da simulação iterativa do TRANUS.

$$a_i^{mn} = \min^{mn} + (\max^{mn} - \min^{mn}) \exp \exp (-\delta^{mn} \cdot U_i^n) \quad (2)$$

Os valores mínimos ( $\min^{mn}$ ) e máximos ( $\max^{mn}$ ) de consumo de solo 'n', para cada grupo populacional 'm', foram coletados a partir das bases de uso do solo da Secretaria de Finanças de Fortaleza dos anos 2007 e 2015. No caso da ocupação das atividades, não foram encontradas bases que informassem a quantidade média de solo ocupada por tipo de emprego. Dessa forma, o referencial utilizado foi a área total ocupada do tipo não-residencial, dividida pelo total de empregos. Apesar dessas coletas, os valores foram pontualmente modificados para que existisse uma menor diferença entre a quantidade de solo coletado e modelado. A elasticidade da demanda do modelo elástico ( $\delta^{mn}$ ) e a penalidade de consumo do modelo de substitutos ( $\varpi^{mn}$ ) foram otimizadas com algoritmo genético, com o objeto de reduzir a diferença entre a quantidade de solo por tipo e por zona modelada e aquela que foi coletada, por meio da replicação em planilha eletrônica dos modelos de ocupação do solo (Sousa, 2016)

Na calibração do TRANUS para Fortaleza, optou-se por não modelar o consumo do solo da administração pública e da atividade educacional, pois suas ocupações de solo não são prioritariamente orientadas pelo mercado imobiliário. Para as atividades comerciais e de prestação de serviços, considerou-se que ocupam apenas os solos não-residenciais. Assumiu-se ainda que a atividade industrial ocupa o solo NRBI e que a população ocupa apenas os solos residenciais (com exceção da população de baixa renda cativa que não ocupa solos residenciais de altos índices de aproveitamentos). Essas decisões foram tomadas considerando a correlação entre as variáveis que representam os setores e a área de solo em cada zona.

#### 4.2. Calibração dos Modelos de Transportes

No TRANUS, a rede viária é multimodal, com cada segmento sendo composto por dois grupos de características: as físicas, relacionadas com a estrutura da rede; e aquelas diretamente associadas ao modo de transporte, como a velocidade em fluxo livre. Essas características e variáveis compõem o custo generalizado dos deslocamentos. A presente calibração foi desenvolvida a partir da construção de uma rede de simulação para cada ano base (Sousa *et al.*, 2019), as quais foram utilizadas para a simulação de viagens interzonais no pico da manhã por carro, moto, bicicleta, a pé, ônibus e metrô. Esses modos de transporte foram subdivididos em 3 grupos: motorizados coletivos, motorizados individuais e não motorizados.

A quantidade de viagens ( $T_{ij}^s$ ) é modelada utilizando um modelo elástico (Equação 3), que transforma os fluxos econômicos espaciais (representados pela variável  $F_{ij}^s$ , sendo um resultado da modelagem do uso do solo) em quantidade de viagens, e é dependente do custo generalizado ( $\tilde{c}_{ij}^s$ ) das viagens do tipo 's' da zona 'i' para a 'j'. A elasticidade ( $\eta^s$ ) é a responsável pela curvatura da função, enquanto as variáveis  $\min^s$  e  $\max^s$  representam, respectivamente, os

limites mínimos e máximos de quantidade de viagens que podem ser geradas por unidade de fluxo econômico.

$$T_{ij}^s = F_{ij}^s * [\min^s + (\max^s - \min^s).exp(-\eta^s \cdot \tilde{c}_{ij}^s)] \quad (3)$$

Em seguida, são simuladas as escolhas do modo e da rota dos deslocamentos, para as quais são utilizados modelos aninhados *logit multinomiais*. A decisão superior é a probabilidade de um tipo de viagem 's' optar entre um conjunto de modos 'k' no deslocamento entre 'i' e 'j' ( $P_{ij}^{ks}$ ). Os conjuntos de modos são formados por *links* nos quais os usuários podem realizar integração. Na decisão inferior, é modelada a probabilidade de que uma viagem do tipo 's' utilizando o conjunto de modos 'k' escolha a rota 'p' para se deslocar ( $P_{ijp}^{ks}$ ). Nessas equações, existem: parâmetros de escala, que definem a importância do menor valor; e a elasticidade das decisões, que modifica a decisão a partir da mudança de uma unidade dos custos generalizados. A partir das probabilidades, as viagens obtidas com o modelo elástico são alocadas na rede. Sendo assim, o que antes eram viagens  $T_{ij}^s$  entre origens 'i' e destinos 'j' de cada tipo de viagem 's', transformam-se em viagens  $T_{ijp}^{ks}$  entre origens e destinos para cada tipo de viagem 's' fazendo uso de determinada rota 'p' e de um determinado conjunto de modos "k" (Equação 4).

$$T_{ijp}^{ks} = T_{ij}^s \cdot P_{ij}^{ks} \cdot P_{ijp}^{ks} \quad (4)$$

Para calibrar os modelos de transporte do TRANUS para o ano base 2000 foram utilizadas informações da pesquisa OD domiciliar da Região Metropolitana de Fortaleza (Fortaleza, 1996). Dessa pesquisa, foram coletadas medidas de desempenho agregadas do sistema de transportes: divisão modal por tipo de viagem e percentual de deslocamentos por tipo e tempo médio de viagem. Medidas de desempenho para 2015 foram obtidas das pesquisas de linha de contorno e de travessia realizadas pelo Plano Fortaleza 2040, da demanda do transporte coletivo a partir dos bilhetes eletrônicos e tempos médios de deslocamentos obtidos na PNAD. Dois parâmetros foram coletados diretamente da pesquisa domiciliar: as quantidades mínimas ( $\min^s$ ) e máximas ( $\max^s$ ) de viagens realizadas para cada fluxo econômico. A elasticidade ( $\eta^s$ ) da função elástica foi calibrada com o uso dos custos generalizados de uma rede não carregada. Já os parâmetros de escala e elasticidade das decisões de escolha de modos e rotas foram mantidos com seus valores padrões de 0 e 1, respectivamente. Por fim, os parâmetros do custo generalizado foram manualmente ajustados até que as medidas de desempenho fossem atingidas, na seguinte ordem: 1º) *Alternative Specific Constants* (ASC), que determinam a percepção dos usuários sobre um conjunto de modos; 2º) *Modal Constants* (MC), que definem a percepção dos usuários sobre um modo de transporte; e 3º) *Penal Factors* (PC), que modificam a percepção de um tipo de viagem sobre um modo de transporte. O aumento de qualquer um desses três tipos de parâmetros indica uma menor propensão do usuário à utilização da alternativa.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são discutidos a seguir de acordo com a decisão que simulam, com ênfase apenas nos parâmetros que contribuem diretamente na interpretação do comportamento dos usuários. Por conta disso, a seção 5.1 discute o comportamento em decisões locais com base nas elasticidades de consumo ( $\delta^{mn}$ ), nas penalidades de consumo ( $\varpi^{mn}$ ), no fator de preço ( $\lambda^m$ ) e na elasticidade da decisão locacional ( $\beta^m$ ). Enquanto na seção 5.2, são realizadas análises a partir dos parâmetros ASC, MC e PC das decisões de modo e rota simulados pelo TRANUS para as viagens por motivo trabalho. Nos dois casos, as análises são estruturadas para destacar e justificar inicialmente os comportamentos que se mantêm similares entre os dois cenários de análise, seguidas por uma análise dos comportamentos que se modificaram ao longo do tempo.

### 5.1. Evolução comportamental nas decisões locais

As elasticidades de consumo (Figura 2) revelam que, tanto em 2000 quanto em 2015, maior renda implica em menor sensibilidade às variações do preço do solo consumido para o solo RBI, indicando que grupos sociais com rendas mais elevadas consideram outros atributos mais relevantes em suas decisões locais, como a qualidade da propriedade. Dessa forma, o aumento de uma unidade no preço do solo RBI implica numa redução menos acentuada da quantidade de solo consumido na AR do que na BR. Entretanto, esse fenômeno não é tão contundente no consumo do solo RAI; isso pode estar relacionado com o valor desse tipo de solo, pois por ser elevado impõe uma maior relevância desse atributo na decisão.

ELASTICIDADES 2000 / 2015	IND	COM	SER	CAT	BR	MR	AR
RBI	-	-	-	0,27 / 0,27	0,27 / 0,27	0,16 / 0,11	0,09 / 0,09
RAI	-	-	-	-	0,02 / 0,02	0,02 / 0,03	0,01 / 0,02
NRBI	0,10 / 0,10	0,04 / 0,07	0,07 / 0,07	-	-	-	-
RAI	-	0,03 / 0,10	0,03 / 0,09	-	-	-	-

Figura 2: Elasticidades de consumo em 2000 e 2015

Quando observados os valores das penalidades (Figura 3) nos dois cenários temporais, também é possível verificar a manutenção de tendências. Destaca-se a preferência dos empreendimentos comerciais por situarem-se em solo NRBI e a preferência dos empreendimentos de serviços por localizarem-se em solo NRAI. Ambas são tendências que apresentam consistência com a natureza dos empreendimentos e com a evolução morfológica e urbana de Fortaleza. Para os empreendimentos comerciais, por exemplo, a localização em solo do tipo NRBI é mais atrativa para os potenciais consumidores, dado o nível de interação estabelecido, ao nível da rua. Já os empreendimentos de serviços podem contar com uma ambiência mais reservada, particular, não necessitando das interações proporcionadas por fachadas ativas para atrair o seu público.

PENALIDADES 2000 / 2015	IND	COM	SER	CAT	BR	MR	AR
RBI	-	-	-	1,0 / 1,0	1,0 / 1,5	1,6 / 1,3	2,2 / 1,8
RAI	-	-	-	-	0,4 / 1,2	0,5 / 1,6	0,3 / 0,7
NRBI	1,0 / 1,0	1,0 / 0,4	2,2 / 1,8	-	-	-	-
RAI	-	2,2 / 2,0	0,3 / 0,9	-	-	-	-

Figura 3: Penalidades de consumo do solo em 2000 e 2015

Além das tendências mantidas nas últimas duas décadas, os resultados da calibração revelam alterações nas dinâmicas de consumo do solo. Quando comparados os valores das penalidades de consumo de solo RAI entre os dois cenários temporais, percebe-se um aumento nos valores desse parâmetro para as três classes sociais em estudo. Enquanto no ano 2000 esse tipo de solo precisava ter seu consumo incentivado por meio de baixas penalidades, demonstrando ser um tipo de solo pouco atrativo nas distintas classes de renda, sua presença em maior quantidade em 2015 faz com que o consumo precise ser menos incentivado durante o processo de calibração, estratégia que se reflete no aumento das penalidades e que revela uma tendência da população à verticalização residencial.



A partir dos Fatores de Preço (Figura 4) verifica-se que é mais caro demandar uma mão-de-obra do que um produto ou um serviço. Isto porque os parâmetros são menores para os setores comercial e de prestação de serviços, indicando que as atividades por eles consumidas (no caso desta modelagem, restringe-se ao consumo de mão-de-obra) precisam ter seu valor reduzido para que possam ter a mesma ordem de grandeza que a impedância de deslocamento. Dessa forma, são colocados os dois atributos da decisão locacional (acessibilidade e atratividade) como atributos que influenciam a decisão, conforme estabelecido pela premissa do modelo.

2000 / 2015	COM	SER	EDU	CAT	BR	MR	AR
Fatores de Preço (2000)	0,0001	0,0001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fatores de Preço (2015)	0,0001	0,0001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Elasticidades (2000)	0,08	0,08	0,16	0,30	0,55	0,37	0,74
Elasticidades (2015)	0,54	0,54	0,15	0,28	0,28	0,30	0,52

Figura 4: Fatores de preço e elasticidades da decisão locacional em 2000 e 2015

A condição de renda ainda influencia no maior interesse por adquirir o melhor produto ou serviço fornecido, aqui modelado como o destino com a melhor utilidade. Esse fenômeno foi verificado a partir dos valores de elasticidade de decisão locacional (Figura 4) que aumentam conjuntamente com a renda domiciliar. Dessa forma, o peso de cada unidade de utilidade importa mais na decisão do segmento de AR do que na BR, sugerindo que pequenas variações da utilidade são mais importantes para o grupo mais rico. Percebe-se, entretanto, uma redução das elasticidades da decisão locacional para todos os tipos de domicílios entre 2000 e 2015. A expansão dos comércios e serviços em áreas pericentrais pode justificar essa redução, já que novas regiões da cidade (não necessariamente as mais apropriadas) tiveram sua importância reconhecida e começaram a atrair mais pessoas, comércios e serviços.

## 5.2. Evolução comportamental nas decisões de viagens

Nas escolhas de modos e rotas nos dois cenários, verifica-se pelo ASC (Figura 5) um maior desinteresse da população de Fortaleza em utilizar os modos não-motorizados, seguidos pelo motorizado individual e, por último, o motorizado coletivo. É importante observar que essa ordem não reflete a matriz modal observada em 1996, a qual apresentou um maior percentual diário de viagens a pé e de bicicleta, seguido pelo transporte público e, com menor fatia, o motorizado individual. Essa situação ilustra que não são apenas as preferências dos usuários que determinam sua escolha modal, mas que os valores relativos dos atributos das alternativas também afetam a decisão, como discutido na seção 4.2. Neste intervalo temporal, percebe-se que a população aumentou levemente sua preferência pelos modos motorizados, com uma rejeição ainda mais elevada pelos não-motorizados.

Analisando os parâmetros MC (Figura 5), verifica-se que, entre os modos não-motorizados, a bicicleta é menos preferida pela população de Fortaleza; já entre os modos motorizados coletivos, os ônibus e vans são mais preteridos; e entre os motorizados individuais, as motos são as que geram maior aversão. Destaca-se a baixa penalização dos metrô e trens, possivelmente decorrente de inserções restritas a determinadas regiões do município, mas que promovem uma ligação mais rápida do que os ônibus à região central, que concentra a maior parte das oportunidades de emprego na cidade. No período modelado, destaca-se a redução da penalização da moto, em parte justificada por sua facilidade de aquisição e pela deterioração da qualidade do transporte público, aspectos que não são medidos pelos atributos de tempo e custo.

2000 / 2015	Alternative Specific Constant (ASC)	Modal Constant (MC)	Penal Factor (PC)				
			TRAB_CAT	TRAB_BR	TRAB_MR	TRAB_AR	
Não Motorizado	3,5 / 5,0	Pedestre	1,0 / 1,0	1,8 / 2,5	3,5 / 4,0	1,7 / 2,3	2,5 / 3,0
		Ciclista	5,0 / 5,0	2,1 / 2,1	3,5 / 3,5	2,0 / 2,0	2,3 / 2,3
Motorizado Coletivo	1,5 / 1,3	Ônibus / Vans	1,3 / 1,1	1,1 / 1,3	3,0 / 3,2	1,5 / 1,7	4,5 / 4,7
		Metrô / Trem	0,4 / 0,3	0,5 / 0,4	0,5 / 0,4	4,0 / 3,0	6,0 / 5,0
Motorizado Individual	2,8 / 2,6	Carro	2,0 / 2,0	-	0,9 / 0,4	2,5 / 2,0	0,9 / 0,8
		Moto	3,0 / 2,5	-	2,9 / 1,8	4,5 / 4,3	5,1 / 4,9

Figura 5: Parâmetros ASC, MC e PC das decisões de modos e rotas em 2000 e 2015

Pela análise dos PC (Figura 5) percebe-se, em ambos os cenários, que a população de BR com carro ou moto no domicílio comporta-se em seus deslocamentos ao trabalho de maneira mais similar à população de AR do que à MR, revelando a influência que a posse do veículo motorizado gera sobre o comportamento decisório de viagens na cidade. Entretanto, a população de BR cativa prefere utilizar metrô e trem, além da moto, em seus deslocamentos. Os resultados da calibração também possibilitam a verificação de tendências evolutivas no que diz respeito às decisões de viagens. Entre 2000 e 2015, destaca-se o fato da maioria dos coeficientes PC terem aumentado para os pedestres e para os ônibus/vans, enquanto boa parte reduz para os modos motorizados individuais. Nesse período, verificou-se um aumento significativo na posse de veículos motorizados individuais, desproporcional ao crescimento populacional observado, além de uma estagnação do uso do transporte coletivo.

Ao longo do esforço de calibração dos modelos de transportes, atestou-se que o processo de calibração em si também é capaz de gerar conhecimento sobre o comportamento dos usuários. Um exemplo verificado na calibração do TRANUS para Fortaleza, tanto para o cenário do ano 2000 quanto para o de 2015, é de que os modos não-motorizados são vantajosos, pois são rápidos e sem custo. Entretanto, precisam ser severamente penalizados na calibração para que a modelagem represente as baixas demandas observadas. Dessa forma, em termos evolutivos, verifica-se em 2015 a manutenção de uma tendência já observada em 2000: a de que a população não se desloca por modos não-motorizados por conta de atributos externos àqueles relacionados ao deslocamento, como conforto e segurança (pública e viária), resultando em elevados valores para os parâmetros de penalidade calibrados.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise de como a população vem modificando o seu comportamento, no que se refere às decisões locacionais e de viagens, permite significativos avanços em relação aos processos de avaliação de alternativas de intervenção nos subsistemas de transportes e do uso do solo. A ampliação dessa compreensão diz respeito tanto a intervenções já concretizadas, possibilitando avaliar sua influência *a posteriori* sobre o comportamento decisório da população, quanto a projeções de cenários futuros, que incorporem evoluções comportamentais baseadas nas tendências verificadas. Ademais, a compreensão dessas relações pode ainda subsidiar a formulação de políticas públicas, com destaque para as *soft transport measures*, que são lançadas com a intenção de interferir nas preferências dos usuários em decisões de transportes.

O esforço de calibração do modelo TRANUS simulando as inter-relações entre uso do solo e transporte nas duas últimas décadas em Fortaleza evidenciou que a socioeconomia da população

tem sido determinante nas suas escolhas locacionais e de mobilidade, com o aumento da renda reduzindo o peso do preço do solo e do deslocamento nessas decisões. Evolutivamente, verificou-se uma tendência comportamental de verticalização da ocupação territorial na decisão locacional para a maioria dos usuários modelados, acompanhada por uma preferência pela utilização de rotas com modos motorizados individuais em deslocamentos ao trabalho. O comportamento locacional pode ter sido afetado por intervenções ativas do poder privado em ofertar mais edificações verticais residenciais, muitas vezes de tamanho reduzido, facilitando a aquisição/locação e ampliando a quantidade de unidades ofertadas. A preferência pelo carro e moto, por sua vez, pode ter se intensificado com a ação do poder público em promover, junto às classes de menor renda, a aquisição financiada de veículos próprios, ao mesmo tempo em que o aumento das tarifas do transporte coletivo superava as taxas de inflação e os ganhos médios salariais, sem avanços em políticas de subsídio aos usuários e investimentos significativos em melhorias de desempenho das redes de transporte público e cicloviário.

Vale ressaltar, entretanto, que a partir de 2015 relevantes intervenções no sistema de transportes começaram a ser implantadas em Fortaleza, com possíveis recentes efeitos de reversão das tendências verificadas desde 2000 na escolha modal. É o caso da implantação de corredores BRT com veículos biarticulados, juntamente com a ampliação significativa da extensão de faixas exclusivas, que podem vir a reduzir a penalização dos ônibus pela população. Da mesma forma, a implantação de sistemas de bicicletas compartilhadas e a ampliação da malha cicloviária da cidade podem reduzir a penalização dada aos deslocamentos de ciclistas.

Cabe ainda destacar que, embora o modelo LUTI calibrado possibilite evidenciar as transformações urbanas ocorridas no mercado imobiliário da cidade, fenômenos que não seguem necessariamente a lógica do equilíbrio entre oferta e demanda do uso do solo, tais como a periferização involuntária e a informalidade habitacional, não são adequadamente modelados. Portanto, não foram encontradas evidências desses fenômenos nos parâmetros calibrados para Fortaleza, reafirmando o TRANUS como uma ferramenta de modelagem de uma cidade decorrente das relações econômicas do mercado imobiliário formal, desconsiderando a parcela urbana que se consolida através da ocupação de terrenos públicos e de áreas ambientalmente inadequadas para fins de moradia. Já a modelagem do comportamento decisório da mobilidade sofre limitações advindas do nível de agregação do zoneamento adotado. Dessa forma, a atitude penalizadora da população aos modos não-motorizados pode ser um reflexo do tamanho das zonas e da representação inadequada das viagens intrazonais. Por outro lado, aumentar a resolução do zoneamento e, conseqüentemente, o detalhamento da malha viária e da rede de transporte público, com desagregação espacial das entidades modeladas, encontra empecilhos nos níveis de desagregação dos dados disponíveis e na capacidade computacional em processar modelos mais detalhados e complexos.

Salienta-se ainda que, para servirem a função de ferramentas analíticas no planejamento urbano integrado, os modelos LUTI necessitam também passar por esforços sistematizados de validação. Reconhece-se que um processo transversal de calibração e validação pode ajudar a produzir um conhecimento sistematizado na análise de diagnóstico da problemática; entretanto, entende-se que a previsão de cenários futuros demanda uma maior acurácia da validação do modelo, exigindo pelo menos dois recortes temporais de análise. Destaca-se, por fim, que a evolução comportamental aqui analisada foi obtida a partir da interpretação dos parâmetros calibrados, mas o sentido inverso desse processo, ou seja, a representação de comportamentos já identificados na literatura, pode ser uma etapa metodológica relevante no esforço de

validação de um modelo LUTI. Dessa forma, o modelo poderá trazer representações não apenas dos cenários para os quais foi calibrado, mas também de uma realidade em constante adaptação.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bamberg, S.; S. Fujii.; M. Friman e T. Gärling (2011) Behaviour theory and soft transport policy measures. *Transport Policy*, v. 18 , n. 1, p. 228–235. doi:10.1016/j.tranpol.2010.08.006
- Capelle, T.; P. Sturm; A. Vidard e B. Morton (2015) Formulating LUTI calibration as an optimisation problem: Estimation of tranus shadow price and substitution parameters. *AAAI Workshop - Technical Report, WS-15-06*, p. 10–16.
- de la Barra, T. (1989) *Integrated land use and transport modelling Decision chains and hierarchies*. Cambridge University Press, New York.
- Diógenes, B. H. N. (2012) *Dinâmicas urbanas recentes da área metropolitana de Fortaleza*. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- Fortaleza (1996) Base de Dados da Pesquisa da Demanda por Transportes na Região Metropolitana de Fortaleza.
- Garcia, C. S. H. F.; R. M. R. Macário; E. D. A. G. Menezes e C. F. G. Loureiro (2018) Strategic Assessment of Lisbon's Accessibility and Mobility Problems from an Equity Perspective. *Networks and Spatial Economics*, v. 18, n. 2, p. 415–439. doi:10.1007/s11067-018-9391-4
- Geurs, K. T. e B. van Wee (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, v. 12, n. 2, p. 127–140.
- Golledge, R. G. e T. Gärling (2004) Cognitive Maps and Urban Travel. D. A. Hensher, K. J. Button, K. E. Haynes e P. R. Stopher (Eds), *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*. Emerald Group
- Gudmundsson, H. (2011) Analysing models as a knowledge technology in transport planning. *Transport Reviews*, v. 31, n. 2, p. 145–159. doi:10.1080/01441647.2010.532884
- Handy, S. L. (2005) Planning for Accessibility: In Theory and in Practice. *Access to Destinations* (p. 131–147). Emerald Group Publishing Limited. doi:10.1108/9780080460550-007
- Hunt, J. D.; D. S. Kriger e E. J. Miller (2005) Current operational urban land-use-transport modelling frameworks: A review. *Transport Reviews*, v. 25, n. 3, p. 329–376. doi:10.1080/0144164052000336470
- Iacono, M.; D. Levinson e A. El-Geneidy (2008) Models of transportation and land use change: A guide to the territory. *Journal of Planning Literature*, v. 22, n. 4, p. 323–340. doi:10.1177/0885412207314010
- IBGE. (2001) Microdados da Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios. Brasília, Brasil.
- IBGE. (2015) Microdados da Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios. Brasília, Brasil.
- IPECE. (2020) Sistema de Informações Geossocioeconômicas do Ceará. Fortaleza, Brasil.
- Lima, L. S. (2017) *Espraiamento urbano por autosegregação e seus impactos na acessibilidade urbana de Fortaleza*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- Lopes, A. S.; C. B. Cavalcante; D. S. Vale e C. F. G. Loureiro (2020) Convergence of planning practices towards LUT integration: Seeking evidences in a developing country. *Land Use Policy*, v. 99.
- Miller, E. J. (2018) Integrated urban modeling: Past, present, and future. *Journal of Transport and Land Use*, v. 11, n. 1, p. 387–399. doi:10.5198/jtlu.2018.1273
- Rufino, M. B. C. (2012) *Incorporação da metrópole: centralização do capital no imobiliário e nova produção de espaço em Fortaleza*. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo.
- Saujot, M.; M. Lapparent; E. Arnaud e E. Prados (2016) Making land use - Transport models operational tools for planning: From a top-down to an end-user approach. *Transport Policy*, v. 49, p. 20–29.
- Sousa, F. F. L. M. (2016) *Metodologia de Calibração para Modelos Integrados dos Transportes e Uso do Solo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programação de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- Sousa, F. F. L. M. (2019) *Diagnóstico Estratégico das Desigualdades Soioespaciais na Acessibilidade ao Trabalho em Fortaleza*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Programação de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará.
- Sousa, F. F. L. M.; C. F. G. Loureiro e A. S. Lopes (2017) Representação do fenômeno urbano por meio de modelos integrados dos transportes e uso do solo: revisão da literatura e discussão conceitual. *Transportes (Rio de Janeiro)*, v. 25, n. 4, p. 96. doi:10.14295/transportes.v25i4.1319
- Sousa, F. F. L. M.; K. G. A. Mesquita e C. F. G. Loureiro (2019) Caracterização da Evolução do Padrão de Mobilidade de Fortaleza a partir da Calibração do TRANUS. *33º Congresso da ANPET* (p. 2442–2449). Balneário Camboriú.
- van Wee, B.; J. De Vos e K. Maat (2019) Impacts of the built environment and travel behaviour on attitudes: Theories underpinning the reverse causality hypothesis. *Journal of Transport Geography*, v. 80.