



## LOCALIZAÇÃO DE CENTROS DE DISTRIBUIÇÃO: AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE A METAHEURÍSTICA GRASP DO TRANSCAD E UMA MODELAGEM DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

### **Hamifrancy Brito Meneses**

Mestrando em Engenharia de Transportes – PETRAN  
Universidade Federal do Ceará – UFC  
Campus do Pici, Bloco 703  
CEP: 60455-760 Fortaleza – Ceará  
brito@det.ufc.br

### **Júlio Francisco Barros Neto**

Depto. de Estatística e Matemática Aplicada  
Universidade Federal do Ceará – UFC  
Campus do Pici, Bloco 910  
CEP: 60455-760 Fortaleza - Ceará  
jfbarros@ufc.br    jfbarros@det.ufc.br

### **João Bosco Furtado Arruda**

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes – PETRAN  
Universidade Federal do Ceará – UFC  
Campus do Pici, Bloco 703  
CEP: 60455-760 Fortaleza – Ceará  
barruda@det.ufc.br

### **RESUMO**

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de produtos agrícolas. Contudo, boa parte da produção é desperdiçada, especialmente no transporte das fontes produtoras para os mercados consumidores. Isto ocasiona elevados custos aos produtos brasileiros, diminuindo a competitividade nacional neste setor. Assim, uma adequada estratégia de distribuição da produção reduz estes custos, racionalizando o seu escoamento. Uma etapa importante nesta estratégia consiste em determinar cientificamente o número e a localização de centros de distribuição. Os métodos usados para resolver este problema de localização podem ser agrupados em três conjuntos: exatos, heurísticos e simulação. Este trabalho efetua uma análise comparativa entre um método exato de programação linear e um método heurístico, relativo à resolução do problema de localização de centros de distribuição do produto melão no Agropólo do Baixo Jaguaribe, Estado do Ceará, Brasil. Ambos os métodos minimizam apenas os custos de transporte da produção entre a sede dos municípios que compõem o agropólo e os mercado consumidores. Os resultados obtidos demonstraram um melhor desempenho para o método de programação linear em relação ao método heurístico.

Palavras-chave: Modelagem em Programação Linear, Metaheurística GRASP, Localização de Centros de Distribuição

### **ABSTRACT**

Brazil is one of the largest world producers of agricultural products. However, a significant part of the production is waste, especially in the transport from the source producers to the market consumers. This causes higher costs to the Brazilian products in internal and foreign markets, reducing the national competitiveness in this sector. Therefore, an appropriate distribution strategy can help to reduce these costs, making more efficient the production flows. An important step in this strategy



consists of to determine scientifically the number and location of distribution centers. The methods used to solve this distribution problem are linked to three groups: exact, heuristic and simulation. This paper presents a comparative analysis between an exact method (linear programming) and a heuristic method, both applied to the location problem of distribution centers for the melon product in the Agricultural District of Baixo Jaguaribe, State of Ceará, Brazil. Both methods just minimize the transport costs of the melon from the cities in the Agricultural District to the market consumers. Results show better performance to the linear programming method than to the greed heuristic method.

Key-words: Linear Programming Model, GRASP metaheuristic, Location Problem of Distribution Centers

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais países produtores de produtos agrícolas, com importante posição no comércio mundial de produtos alimentícios, não obstante o sistema agro-exportador brasileiro arque com um dos custos de distribuição mais elevados do mundo. Segundo Fonseca e Silva (1998), o custo de distribuição de produtos agrícolas e agroindustriais brasileiros representava, na época, 40 dólares por tonelada a mais que nos EUA. Além disto, as perdas brasileiras com produtos hortifrutí são estimadas em torno de 30% da produção nacional, que é de 18 milhões de toneladas/mês, resultando em um desperdício de 5,4 milhões de toneladas de alimentos. Deste total de perdas, 24% ocorre na colheita dos produtos no campo e transporte até os supermercados ou feiras (Barreto *et al*, 2000).

Dentre outros fatores, as deficiências na distribuição da produção agrícola são apontadas como causas do elevado custo de exportação e comercialização de produtos agrícolas brasileiros. As principais causas da ineficiência do sistema de distribuição da produção agrícola brasileira são: a predominância do transporte de carga rodoviário, estradas vicinais e rodovias em mau estado de conservação (World Bank, 1996), a falta de armazéns nas propriedades rurais, veículos inadequados ao transporte (Caixeta-Filho *et al*, 2001) e problemas operacionais nos terminais, gerando desperdício.

Portanto, o aumento da competitividade do produtor nacional requer a redução dos custos de distribuição dos produtos agrícolas brasileiros. Assim, o custo logístico total associado às atividades de transporte e armazenagem deve ser otimizado. Segundo Benson *et al* (1994), este custo é composto por: frete através dos modais desde o fornecimento até o mercado; despesas fixas de armazenagem (movimentação, inventário e controle de produtos); custo variável de estocagem; custo de vendas perdidas por indisponibilidade do produto; custo de obsolescência do produto; custo de ociosidade devido à utilização parcial dos processos logísticos e custo financeiro do capital de giro da empresa investido no ciclo do produto. Contudo, a minimização destes custos é uma tarefa complexa, dado o caráter global, exigente e mutável do mercado consumidor. Além disto, a gestão otimizada da cadeia logística requer um corpo técnico especializado, bem como o uso intensivo de sistemas de informação e tecnologias de rastreamento de carga.

Entretanto, uma estratégia de distribuição eficaz pode contribuir significativamente para minimizar o custo logístico total, tendo em vista que o custo de transporte dos produtos agrícolas varia de 4% a 25% do faturamento bruto da maioria das empresas do setor (Nazário, 2000). Um fator chave em uma estratégia de distribuição consiste na determinação do número e localização de centros de distribuição (CD), capazes de abastecer o mercado consumidor a partir da fonte produtora, dentro do nível de serviço exigido pelos consumidores e ao menor custo possível (Bowersox and Closs, 1996). As técnicas usadas em estudos de localização de centros de distribuição (CD) abrangem três categorias: exatas, heurísticas e de simulação.

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre uma modelagem de programação linear (exato) e um método heurístico, utilizados para resolver o problema de localização de CD do produto melão no Agropólo do Baixo Jaguaribe, Estado do Ceará, Brasil. Ambos os métodos minimizam os custos de transporte da produção desde a sede dos municípios do agropólo até os mercados consumidores. Este estudo toma como referência os custos atuais de distribuição do melão para a análise de desempenho dos métodos citados. Cabe ressaltar que o melão foi escolhido como objeto de estudo tendo em vista que é o principal produto em volume de exportação do Ceará no setor de



produção de frutas frescas, secas, conservadas, castanhas e nozes, representando 51,1% do volume total de frutas exportadas em 2001 (SEAGRI, 2001).

Este trabalho está assim subdividido: após a introdução realizada na seção 1, tem-se a caracterização do problema na seção 2, na qual é feita a apresentação da região do Baixo Jaguaribe do Estado do Ceará; na seção 3 são descritos os métodos abordados para localização de centros de distribuição; os resultados obtidos com os métodos utilizados são apresentados na seção 4; e por fim, as conclusões estão expostas na seção 5.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: AGROPOLO DO BAIXO JAGUARIBE

Os agropólos consistem numa área geograficamente delimitada, envolvendo um número variável de municípios com potencial para desenvolvimento da agricultura irrigada, e onde existe uma parceria entre o governo e a sociedade objetivando o desenvolvimento da região (SEAGRI, 2001). O Estado do Ceará possui ao todo seis agropólos, como mostra a Figura 1.

O Agropólo do Baixo Jaguaribe abrange uma área do semi-árido do Ceará igual a 8.299 km<sup>2</sup>, compreendendo 15 municípios (ver Figura 1): Limoeiro do Norte, Morada Nova, Russas, Jaguaruana, Itaiçaba, Aracati, São João do Jaguaribe, Quixerê, Banabuiú, Ibicuitinga, Icapuí, Jaguaratama, Jaguaribara, Palhano e Tabuleiro do Norte.

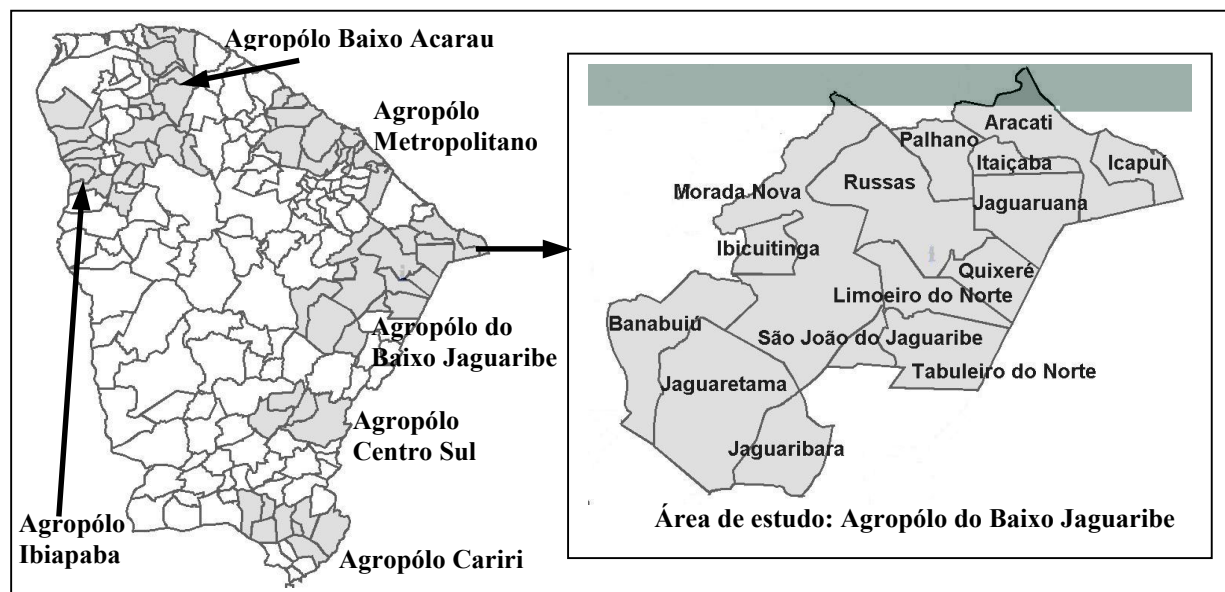


Figura 1: Agropólos do Estado do Ceará (SEAGRI, 2001)

A seguir, caracteriza-se a produção de melão na área de estudo. A Tabela 1 apresenta a área colhida e a produção de melão dos municípios produtores do Agropólo do Baixo Jaguaribe, em 2001. Neste ano, a produção deste agropólo correspondeu a 95% da produção do Estado, 60.648 toneladas. O principal mercado visado pelos produtores do Agropólo do Baixo Jaguaribe é o externo, em especial a Europa e o MERCOSUL, que consomem 70% do volume total da produção (40.565 ton). O restante da produção, 17.385 ton (30%), é comercializada no mercado interno, composto quase que exclusivamente pelas capitais da região Sudeste do país (SEAGRI, 2001).

**Tabela 1:** Área colhida e produção anual de melão - Agropólo do Baixo Jaguaribe

Municípios Produtores	Produto melão - Ano de 2001	
	Área colhida (ha)	Quantidade produzida (ton)
Aracati	400	12.000
Icapuí	250	6.250
Itaiçaba	155	3.875
Jaguaruana	100	2.500
Limoeiro do Norte	111	2.775
Quixeré	1.220	30.500
Russas	2	50
Total	2.238	57.950

Fonte: IPLANCE – Instituto de Planejamento do Ceará (2001)

Quanto aos custos de transporte da produção, consultas junto aos produtores de melão da área em estudo demonstraram os seguintes custos médios unitários em 2001. Do agropólo para o porto do Mucuripe, em Fortaleza, capital do Estado, gastava-se R\$ 250,00 por caminhão transportando 950 caixas contendo 13kg de melão cada, em um trecho de até 150 km, perfazendo um custo médio de R\$ 0,13495 ton/km. Já do Agropólo para a região Sudeste se despendia R\$ 1.300,00 para o mesmo volume de carga descrito anteriormente, com uma distância média de 2.500 km, perfazendo um custo de R\$ 0,04211 ton/km.

### 3. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO

Nesta seção, apresenta-se a formulação teórica dos métodos de programação linear e heurístico utilizados para resolver o problema de localização de CD no Agropólo do Baixo Jaguaribe.

#### 3.1. Método heurístico

Métodos heurísticos são empregados para resolver problemas combinatórios de localização de grande complexidade, onde métodos exatos são inviabilizados devido ao aumento exponencial do tempo necessário para determinar a melhor solução. Assim, métodos heurísticos buscam determinar soluções de boa qualidade, em um tempo aceitável, para problemas complexos de localização, usando diferentes estratégias de busca de soluções viáveis no universo de soluções possíveis. Contudo, estes métodos não garantem que a solução encontrada é a melhor possível. Os principais métodos heurísticos empregados na resolução de problemas de localização são: busca tabu (Tuzun e Burke, 1999), *simulated annealing* (Syam, 2002), algoritmos genéticos (Dijin et al., 1997) e GRASP (Gomes e Silva, 1999).

O método heurístico empregado na resolução do problema de localização de CD da área em estudo utilizou o método GRASP. A implementação deste método foi feita através do *software* TransCAD, sendo que o código do algoritmo usado é desconhecido. Entretanto, a heurística GRASP implementada por este *software* determina o somatório do custo de atendimento dos clientes (municípios e mercado consumidores) a partir das facilidades (CD), compondo um cenário inicial. Em seguida, o TransCAD tenta reduzir o somatório do custo de atendimento do cenário inicial, alternando a combinação de diferentes facilidades para o atendimento dos clientes, dentre o conjunto de facilidades candidatas. Assim, a heurística gulosa escolhe o melhor cenário de localização de facilidades avaliando todos os candidatos e selecionando aquele(s) que melhor atende(m) ao objetivo especificado para o processo de localização (CALIPER, 1996).

O TransCAD oferece quatro objetivos para o processo de localização, a saber: minimização do custo médio de serviço; minimização do mais alto custo de serviço (usado para a localização de bases de serviços de emergência); maximização do mais baixo nível de serviço (usada para localização de bases de serviços indesejáveis – ex. depósitos de lixo) e maximização de lucro. Este trabalho utilizou o primeiro objetivo, o qual proporciona o melhor nível de serviço para todos os clientes, devidamente ponderado por um atributo específico do cliente. Neste estudo, o atributo de ponderação consistiu na produção anual de melão dos municípios e na demanda deste produto pelos mercados consumidores.

A resolução do problema de localização através do TransCAD requer a elaboração de uma base de dados georeferenciada e de uma matriz de custo de transporte unitário de produto entre facilidades e clientes. No caso do Agropólo do Baixo Jaguaribe, estruturou-se uma base de dados (ver Figura 2) contendo duas camadas geográficas. A primeira diz respeito à delimitação geográfica dos municípios do Estado do Ceará, onde cada polígono continha dados relativos à produção anual de melão dos municípios. A segunda camada refere-se às malhas rodoviárias estadual e federal do Estado, onde cada *link* contém dados relativos ao custo de transporte de uma tonelada de melão no referido *link*. As distâncias entre as localidades envolvidas (municípios e centros consumidores) foram obtidas junto ao Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) – Divisão Ceará. Os custos de transporte por *link* foram determinados com base nos custos médios descritos no item 2.

Foram feitas algumas adaptações nesta base de dados visando representar melhor a realidade abordada. Assim, foi criado um polígono e um *link* fictício para representar, respectivamente, o mercado consumidor do sudeste do país e sua ligação com o Estado do Ceará. A impedância associada ao *link* fictício foi proporcional à distância física real média ao mercado do sudeste do país, 2.500 km. Ainda cabe ressaltar que a rotina computacional do TransCAD não permite resolver o problema de localização de instalações para serviços de entrega e coleta de produtos junto ao cliente, simultaneamente. Entretanto, o problema de localização em questão envolve a coleta da produção nos municípios do agropólo e entrega dos produtos nos mercados consumidores. Assim, a localização de CD no Agropólo do Baixo Jaguaribe foi obtida assumindo apenas serviços de coleta para os clientes, mercados consumidores e municípios produtores. Esta simplificação ocasiona o não atendimento da demanda total dos mercados consumidores, como está explicado no estudo de caso. Contudo, isto não inviabiliza o método, tendo em vista que os dados resultantes permitem calcular o custo adicional de atendimento da demanda.

Relativamente à matriz de custo (Tabela 2), esta foi obtida usando um algoritmo de caminho mínimo do TransCAD, tendo como origens os municípios produtores candidatos à localização de CD e como destino todos os municípios do agropólo e os mercados consumidores. Esta rotina usou como parâmetro, minimizar o custo de transporte da produção entre localidades (origens e destinos), o qual foi cadastrado como atributo da camada de rodovias.

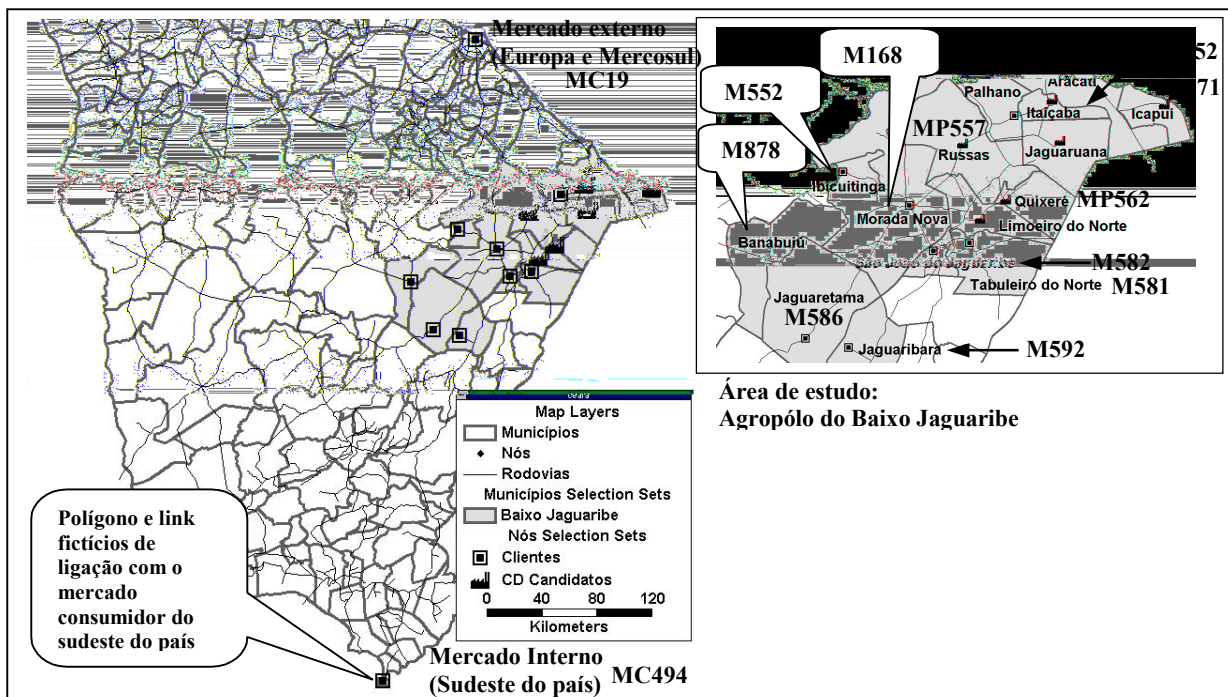


Figura 2: Base de dados georeferenciada: municípios e rodovias do Estado do Ceará.



Os códigos nas colunas e linhas indicam, respectivamente, os clientes (mercado consumidores, municípios produtores ou não) e os municípios candidatos à localização de CD. Os códigos M, MP e MC significam município não produtor, produtor e mercado consumidor, nesta ordem. A correspondência entre estes códigos e suas localidades é apresentada na Figura 2. Cabe ressaltar que os municípios candidatos são apenas aqueles que produzem o melão.

**Tabela 2:** Custos de transporte entre clientes e municípios candidatos à localização de CD

Custo de Transporte da Produção entre Municípios Candidatos e Clientes em R\$ por Tonelada Transportada																	
	MC19	MP29	M167	M168	MP171	MC494	M545	MP548	MP552	MP557	MP561	MP562	M581	M582	M586	M592	M878
MP29	14,81	0,00	5,85	4,39	2,16	116,42	1,66	2,09	0,94	2,82	4,59	5,21	5,15	5,27	7,55	8,12	11,59
MP171	16,92	2,16	7,96	6,50	0,00	118,53	3,77	4,20	3,05	4,93	6,70	7,32	7,26	7,38	9,66	10,22	13,70
MP548	15,53	2,09	5,09	3,63	4,20	115,35	1,80	0,00	1,27	2,06	3,52	4,13	4,08	4,20	6,79	7,04	10,83
MP552	14,97	0,94	5,03	3,58	3,05	115,60	0,84	1,27	0,00	2,00	3,77	4,39	4,34	4,46	6,73	7,30	10,77
MP557	14,55	2,82	3,03	1,57	4,93	113,82	1,16	2,06	2,00	0,00	2,89	3,51	3,45	3,57	4,73	5,51	8,77
MP561	14,50	4,59	2,97	1,52	6,70	112,44	2,97	3,52	3,77	2,89	0,00	0,62	1,17	1,29	4,68	4,14	8,71
MP562	15,11	5,21	3,59	2,14	7,32	113,06	3,59	4,13	4,39	3,51	0,62	0,00	1,79	1,91	5,29	4,76	9,33

### 3.2. Método de programação linear (MPL)

O MPL determina a melhor solução de um problema, através da minimização ou maximização de uma função objetivo sob algumas restrições, supondo uma relação linear entre as variáveis envolvidas. Para tanto, torna-se necessário modelar o problema de forma matemática. Para o problema de localização de CD no Agropólo do Baixo Jaguaribe foi elaborada uma modelagem específica, apresentada a seguir.

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (C_{ij} X_{ij}) + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (C_{jk} Z_{jk}) + \sum_{j \in J} F_j Y_j \quad (1)$$

Sujeito a

$$\sum_{j \in J} Y_j = p \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} Z_{jk} \geq D_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = \sum_{k \in K} Z_{jk} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq P_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} \leq \left( \sum_{i \in I} P_i \right) Y_j \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$X_{ij} \text{ e } Z_{jk} \geq 0; \quad Y_j \in \{0,1\} \quad (7)$$

Em que  $Z$ : função objetivo a minimizar;

$C_{ij}$ : custos de transporte de uma tonelada de produto entre um município  $i$  e um município  $j$  candidatos à localização de um CD, obtido via Tabela 2;

$X_{ij}$ : volume de produção (toneladas) transportado entre um município  $i$  e um município  $j$  candidatos à localização de um CD;

$C_{jk}$ : custos de transporte de uma tonelada de produto entre o CD localizado no município  $j$  e o centro consumidor  $k$ , obtido via Tabela 2;

$Z_{jk}$ : volume de produção (toneladas) transportado entre um município  $j$  candidato à localização de um CD e o mercado consumidor  $k$ ;

$F_j$ : custo fixo de implantação de um CD em um município  $j$ ;

$Y_j$ : variável binária que define a locação (valor 1) ou não (valor 0) de um CD no município  $j$ ;

$p$ : número de CD a alocar;



$D_k$ : demanda do centro consumidor  $k$ , em toneladas;  
 $P_i$ : produção do município  $i$ , em toneladas.

Nesta modelagem, a primeira, a segunda e a terceira parcela da função objetivo refletem, respectivamente, o somatório dos custos de transporte da produção de melão entre os municípios do Agropólo e o município  $j$  candidato à localização de um CD; o somatório dos custos de transporte da produção entre o município  $j$  candidato à localização de um CD e o centro consumidor  $k$ , e o somatório dos custos fixos de implantação de um CD em um município candidato  $j$ . Os custos fixos foram assumidos iguais a zero, tendo em vista a não disponibilização deste dado para o estudo em questão.

Relativamente às restrições, cabe destacar seus significados. A Equação 2 garante que o número de CD's alocados é igual a um valor especificado pelo usuário. A Equação 3 faz com que a demanda dos mercados consumidores seja atendida. A Equação 4 garante que toda a produção que chega a um CD é igual ao volume de produtos transportados para os mercados consumidores. A Equação 5 estabelece que o volume de produção transportado a partir de um município  $i$  será no máximo igual à sua produção anual. A Equação 6 assegura que só haverá fluxo de mercadorias entre municípios e CD, não sendo permitido o transporte direto dos produtos para os centros consumidores. A restrição 7 implica na não negatividade dos valores das variáveis de decisão  $X_{ij}$  e  $Z_{jk}$ , e  $Y_j$  restrita aos valores 0 ou 1, ou seja, um CD será ou não aberto no município  $j$ .

A elaboração deste método foi feita através de um programa desenvolvido em linguagem de programação *Delphi* (Borland, versão 5.0), devido ao número de variáveis envolvidas. A resolução do MPL resultante usa o *software* de programação linear LINDO (North Dayton St., versão 6.1).

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados do método heurístico e do MPL para o problema de localização de dois e três centros de distribuição no Agropólo do Baixo Jaguaribe. Ambos os métodos consideraram todas as cidades do agropólo como candidatas à localização de CD. Inicialmente, é apresentado o quadro atual de custo de transporte da produção de melão, movimentada diretamente dos municípios produtores para os mercados consumidores.

##### 4.1. Custo atual de transporte de produção de melão no Agropólo do Baixo Jaguaribe

Tendo em vista a indisponibilidade de dados detalhados a respeito dos volumes de venda por centro consumidor e dos custos de transporte de cada produtor, determinou-se o custo atual de transporte da produção de melão em termos médios, com base na Equação 8.

$$CT = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} V_{ik} CM_{ik} d_{ik} \quad (8)$$

Em que  $CT$ : custo total do transporte (em R\$);

$V_{ik}$ : volume de produto (ton) transportado entre o município  $i$  o centro consumidor  $k$ ;

$CM_{ik}$ : custo médio de transporte entre o município  $i$  o centro consumidor  $k$ , por km;

$d_{ik}$ : distância mínima (km) entre o município  $i$  e o centro consumidor  $k$ .

Então, assumiu-se que cada município tem uma repartição de volume de vendas por mercado igual ao valor especificado no item 2 do presente trabalho, ou seja, 70% para a Europa e MERCOSUL e 30% para o Sudeste do país. Quanto aos custos médios de transporte ( $CM_{ik}$ ) correspondem aos já especificados no item 2 deste artigo. Já as distâncias de transporte ( $d_{ik}$ ) foram determinadas através da rotina de caminhos mínimos do *software* TransCAD, tendo como parâmetro de minimização a distância física entre localidades. A base de dados utilizada para determinar as distâncias mínimas é a mesma descrita na seção 3.1.

A Tabela 2 apresenta o resultando da composição estimada do custo atual de escoamento da produção de melão do Agropólo do Baixo Jaguaribe, restringindo-se aos custos de transporte troncal. Cabe ressaltar que os custos de transporte para a Europa e MERCOSUL restringem-se aos custos rodoviários de levar o produto até o porto do Mucuripe, na cidade de Fortaleza.



**Tabela 2:** Custo estimado de transporte troncal da produção de melão do Agropólo do Baixo Jaguaribe – Ano de 2001.

Origem	Destino	$V_i$ (t)	$CM_{ik}$ (R\$/t/km)	$d_{ik}$ (km)	Custo Parcial (R\$)
Aracati	Europa e MERCOSUL	8.400,00	0,13495	145,19	164.584,48
	Sudeste	3.600,00	0,04211	2535,58	384.384,22
Icapuí	Europa e MERCOSUL	4.375,00	0,13495	195,24	115.270,92
	Sudeste	1.875,00	0,04211	2585,63	204.151,87
Itaiçaba	Europa e MERCOSUL	2.712,50	0,13495	161,09	58.967,29
	Sudeste	1.162,50	0,04211	2516,18	123.174,38
Jaguaruana	Europa e MERCOSUL	1.750,00	0,13495	178,25	42.095,97
	Sudeste	750,00	0,04211	2510,07	79.274,38
Limoeiro do Norte	Europa e MERCOSUL	1.942,50	0,13495	195,90	51.353,30
	Sudeste	832,50	0,04211	2441,06	85.575,30
Quixeré	Europa e MERCOSUL	21.350,00	0,13495	210,57	606.690,60
	Sudeste	9.150,00	0,04211	2455,73	946.209,83
Russas	Europa e MERCOSUL	35,00	0,13495	155,20	733,00
	Sudeste	15,00	0,04211	2455,73	1.551,16
Custo Total Estimado (CT) em R\$					2.864.016,76

#### 4.2. Método heurístico

Os resultados da aplicação da metaheurística GRASP para o problema de localização em estudo, através do *software* TransCAD, são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 3:** Resultados da localização de 2 CD's no Agropólo do Baixo Jaguaribe – Método Heurístico  
Volume de produção transportado (VT) e custo de transporte(C)

Município escolhido	Aracati		Limoeiro do Norte		
	VT (ton)	Custo (R\$)	VT (ton)	Custo (R\$)	
Clientes (Municípios Produtores)					
Aracati	12.000	0,00	-	-	
Icapuí	6.250	13.495,98	-	-	
Itaiçaba	3.875	3.633,22	-	-	
Jaguaruana	2.500	5.226,18	-	-	
Limoeiro do Norte	-	-	2.775	0,00	
Quixeré	-	-	30.500	18839,51	
Russas	50	140,94	-	-	
Total Transportado ao CD	24.675	-	33.275	-	
Custo Parcial	-	22.496,32	-	18.839,51	
Mercados consumidores	VT (ton)	Custo (R\$)	VT (ton)	Custo Fictício (R\$)	Custo Real (R\$)
Europa e MERCOSUL	-	-	40.565	588.003,09	230.330,80
Sudeste	-	-	17.385	1.954.825,55	1.954.825,55
Custo Adicional	-	365.436,75 (Europa e MERCOSUL)	-	-	-

Dado que a rotina computacional do TransCAD determinou a localização ótima para dois CD's considerando apenas o serviço de coleta do produto, o atendimento da demanda dos mercados consumidores não foi garantido. Assim, os valores de VT e custo de transporte para os mercados consumidores não são significativos, pois o volume de produção a ser transportado para um mercado consumidor depende da quantidade de produto recebida por um CD, a partir dos municípios produtores. Veja-se que o volume de produto transportado para Limoeiro do Norte (33.275 ton) é suficiente para atender a demanda da região Sudeste, validado o valor de custo associado a este atendimento (R\$ 1.954.825,55). Contudo, este CD ainda conta com um saldo do produto melão igual a 15.890 toneladas, o qual deve ser transportado para a Europa e MERCOSUL a um custo de R\$ 230.330,80. Este valor é obtido pela proporcionalidade dos custos, multiplicando-se o custo de R\$ 588.003,09 pelo quociente entre 15.890 e 40.565 ton.





Entretanto, os mercados Europa e MERCOSUL apresentam *deficit* de atendimento de demanda de 24.675 ton, valor igual ao saldo de produção do CD localizado em Aracati. Desta forma, o produto arrecadado por esta cidade é transportado a um custo adicional de R\$ 365.436,75, obtido pelo produto entre este volume de produção e o custo de transporte entre as localidades envolvidas (Fortaleza e Aracati) - R\$ 14,81 por ton (ver Tabela 2, códigos MP29 e MC19). Portanto, o custo total de escoamento da produção de melão, associado ao cenário de dois CD localizados nas cidades de Aracati e Limoeiro do Norte, equivale ao somatório dos custos parciais, adicionais e reais, resultando num valor de R\$ 2.591.928,93.

Raciocínio similar ao descrito acima deve ser empregado na obtenção do custo total para o cenário de três CD's. Assim, o volume de melão coletado pela cidade de Limoeiro do Norte é transportado até o sudeste a um custo de R\$ 312.029,96. Este valor é obtido pela proporcionalidade dos custos, através do produto entre R\$ 1.954.825,55 e o quociente de 2.775 e 17.385 ton. Observe-se que a região sudeste ainda apresenta um *deficit* de atendimento de demanda igual a 14.610 ton, o qual deve ser suprido pela cidade de Quixeré, geograficamente mais próxima. O custo para atender esta demanda, dado pelo produto entre o valor deficitário e o custo de transporte entre as localidades envolvidas (R\$ 113,06 por tonelada - ver Tabela 2, códigos MP562 e MC494), resulta em um custo adicional de R\$ 1.651.806,60. Contudo, Quixeré ainda dispõem de um volume residual de melão de 15.890 ton, o qual pode atender a demanda deficitária da Europa e MERCOSUL. Para tanto, o custo de transporte equivale ao produto entre o volume residual do referido município e o custo de transporte entre as localidades (R\$ 15,11 por tonelada - ver Tabela 2, códigos MP562 e MC19), resultando em um custo adicional de R\$ 240.097,90. Entretanto, o referido mercado consumidor ainda necessita de 24.675 ton, exatamente o volume recebido pelo CD locado na cidade de Aracati. Este volume de melão é transportado para a cidade de Fortaleza a um custo adicional igual ao calculado para o cenário com 2 CD's (R\$ 365.436,75). Assim, o custo total do cenário com 3 CD's é igual ao somatório dos custos parciais, adicionais e reais, resultando num valor de R\$ 2.591.867,53.

Observe-se que o custo total para o cenário com 3 CD's é R\$ 61,40 inferior ao apresentado para o cenário com 2 CD's. Este valor de redução de custo não é suficiente para justificar a abertura de um novo CD na cidade de Quixeré, devido aos custos fixos envolvidos. Assim, o último cenário torna-se inviável.

**Tabela 4:** Resultados da localização de 3 CD's no Agropólo do Baixo Jaguaribe – Método Heurístico

Volume de produção transportado (VT) e custo de transporte (C)							
Município escolhido	Aracati		Limoeiro do Norte			Quixeré	
Clientes (Municípios Produtores)	VT (ton)	Custo (R\$)	VT (ton)	Custo (R\$)	VT (ton)	Custo (R\$)	
Aracati	12.000	0,00	-	-	-	-	
Icapuí	6.250	13.495,98	-	-	-	-	
Itaiçaba	3.875	3.633,22	-	-	-	-	
Jaguaruana	2.500	5226,18	-	-	-	-	
Limoeiro do Norte	-	-	2.775	0,00	-	-	
Quixeré	-	-	-	-	30.500	0,00	
Russas	50	140,94	-	-	-	-	
Total Transp. ao CD	24.675	-	2.775	-	30.500	-	
Custo Parcial	-	22.496,32	-	0,00	-	0,00	
Mercados consumidores	VT (ton)	Custo (R\$)	VT (ton)	Custo Fictício (R\$)	Custo Real (R\$)	VT (ton)	Custo (R\$)
Europa e MERCOSUL Sudeste	-	-	40.565	588.003,09	-	-	-
	-	-	17.385	1.954.825,55	312.029,96	-	-
Custo Adicional	-	365.436,75 (Europa)	-	-	-	-	1.651.806,60 (Sudeste) 240.097,90 (Europa)



#### 4.3. Método de programação linear

Os resultados da aplicação do método MPL para o problema de localização em estudo, obtidos através do *software* LINDO, são apresentados na Tabela 5. Cabe ressaltar que este programa não fornece os custos individuais de atendimento, mas sim o custo total.

A análise da Tabela 5 indica que o cenário com 3 CD's apresenta custo total inferior ao com 2 CD's, resultando numa economia de R\$ 4.693,00. Contudo, este valor não é significativo para viabilizar a abertura de um novo CD em Itaiçaba, tendo em vista os custos fixos decorrentes.

#### 4.4. Análise conjunta dos resultados do método Heurístico e do MPL

A Tabela 6 apresenta um resumo dos valores de custo total de escoamento da produção de melão do Agropólo do Baixo Jaguaribe obtidos por cada método, para cenários com 2 e 3 CD's. O custo total compõe apenas os custos de transporte troncal da produção, não sendo considerados os custos de transporte das propriedades produtoras para a sede do município.

**Tabela 5:** Resultados da localização de 2 e 3 CD's no Agropólo do Baixo Jaguaribe - MPL

Cenários	Volume de produção transportado (VT) por cenários				
	2 CD		3 CD		
Município escolhido	Aracati	Limoeiro do Norte	Aracati	Limoeiro do Norte	Itaiçaba
Cientes (Municípios Produtores)	VT (ton)	VT (ton)	VT (ton)	VT (ton)	VT (ton)
Aracati	12.000	-	12.000	-	-
Icapuí	6.250	-	6.250	-	-
Itaiçaba	3.875	-	-	-	3.875
Jaguaruana	2.500	-	-	-	2.500
Limoeiro do Norte	-	2.775	-	2.775	-
Quixeré	-	30.500	-	30.500	-
Russas	-	50	-	-	50
Total Transportado ao CD	24.625	33.325	18.250	33.275	6.425
Mercados consumidores	VT (ton)	VT (ton)	VT (ton)	VT (ton)	VT (ton)
Europa e MERCOSUL	24.625	15.940	18.250	15.890	6.425
Sudeste	-	17.385	-	17.385	-
Total Transportado ao Mercado	24.625	33.325	18.250	33.275	6.425
Número de Interações	224		147		
Custo Total (R\$)	2.591.322,00		2.586.629,00		

**Tabela 6:** Resumo dos custos totais de escoamento da produção de melão do Agropólo do Baixo Jaguaribe obtidos pelo método e heurístico e de programação linear.

Cenário	Custo Total (R\$)		Dif. de Custos entre Métodos (%)**
	Método Heurístico	MPL	
2 CD's	2.591.928,93	2.591.322,00	0,023
3 CD's	2.591.867,53	2.586.629,00	0,202
Redução de custo (%)*	0,002	0,181	

\* Calculado relativamente ao cenário com 2CD's

\*\* Calculado relativamente ao método heurístico

A análise da Tabela 6 indica que o MPL obteve melhor desempenho que o método heurístico, relativamente à minimização do custo total, em ambos os cenários, tendo reduzido em 18,1 % o custo total entre cenários. A performance dos dois métodos para um mesmo cenário mostra que o MPL obteve valor absoluto de custo total inferior ao encontrado pelo método heurístico, em ambos cenários.

Quanto às cidades escolhidas para locar os CDs, os métodos apresentaram o mesmo resultado para o cenário com dois CD (ver figuras 3 e 4). Já para o cenário de 3CD, o método heurístico



especificou a cidade de Quixeré para a localização do terceiro CD (ver figura 5), e o MPL escolheu a cidade de Itaiçaba (ver figura 6). Isto demonstra que o primeiro método pondera mais a produção do município em detrimento da restrição de atendimento das demandas dos mercados, tendo em vista que Quixeré possui produção bem superior a Itaiçaba. Contudo o MPL privilegia o atendimento racional da demanda dos mercados, pois esta cidade está mais próxima do principal mercado consumidor (Europa e MERCOSUL) do que a cidade de Quixeré.

Os tempos computacionais requeridos foram considerados desprezíveis (frações de segundo) nos dois métodos utilizados. Isto se deveu, particularmente, pelo tamanho da instância do problema tratado (17 cidades). Assim, em termos comparativos, os resultados obtidos foram significativos em relação aos custos totais obtidos pelos métodos e as cidades escolhidas para se instalar os centros de distribuição.

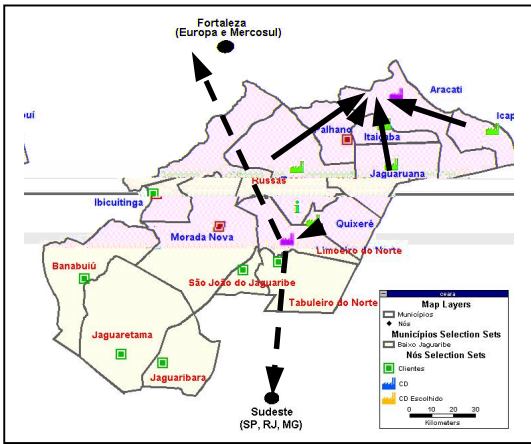


Figura 3: Localização de 2 Centros de Distribuição - TransCAD

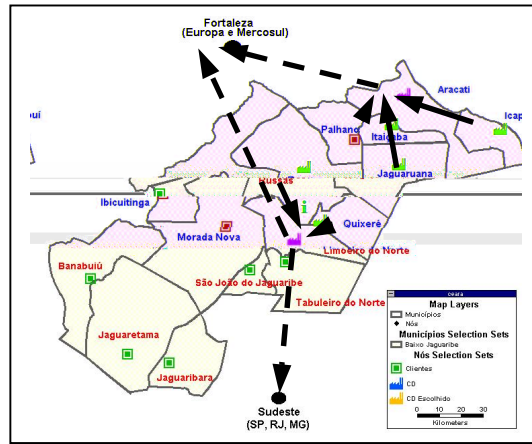


Figura 4: Localização de 2 Centros de Distribuição - Modelagem Linear

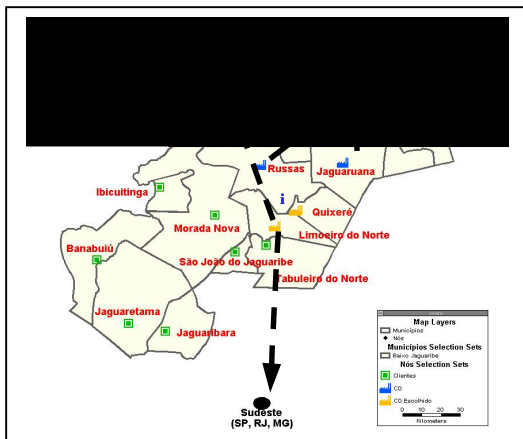


Figura 5: Localização de 3 Centros de Distribuição - TransCAD

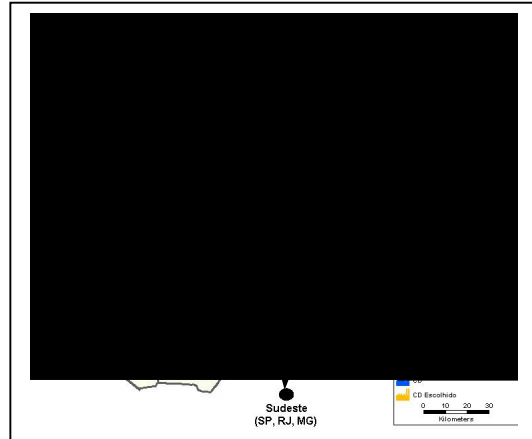


Figura 6: Localização de 3 Centros de Distribuição - Modelagem Linear

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise comparativa de desempenho entre um método heurístico e um método de programação linear, relativamente à localização de centros de distribuição. Ambos os métodos buscaram determinar a melhor solução para a localização de CD's em dois cenários -



implantação de dois e três CD's - tendo como objeto de estudo o Agropólo do Baixo Jaguaribe, situado no Estado de Ceará, e seus mercados consumidores. A obtenção da solução pelos dois métodos teve como critério a minimizar o custo de transporte troncal da produção de melão entre os agentes envolvidos: municípios do agropólo e mercados consumidores. Os resultados obtidos demonstraram que o método de programação linear apresentou melhor desempenho que o heurístico, tanto na redução de custo entre cenários, como na diminuição do valor absoluto do custo total em um mesmo cenário.

No problema prático estudado, o número de agentes envolvidos é relativamente pequeno, o que reduz o espaço de soluções viáveis. Isto confere ao método de programação linear vantagem competitiva sobre o método heurístico, como demonstraram os resultados. Além disto, a modelagem torna o MPL flexível, permitindo conceber um método exclusivo para o problema em estudo. Assim, é possível determinar uma função objetivo e incorporar restrições ao método, capazes de retratar melhor a realidade e atender as necessidades específicas dos tomadores de decisão. Contudo, o MPL requer exaustivo esforço para a elaboração escrita do método desejado, devido à linguagem matemática exigida pelo processo de modelagem. Esta desvantagem pode ser contornada automatizando o processo de construção do método, através da elaboração de um programa computacional. Cabe ressaltar que um MPL supõe a linearidade das variáveis envolvidas, o que pode ser um ponto fraco se estas variáveis não apresentarem comportamento linear no problema real.

Relativamente ao método heurístico implementado através do TransCAD, cabe destacar que a qualidade dos resultados obtidos depende do algoritmo elaborado para efetuar o processo heurístico de busca da solução ótima, o qual é de conhecimento restrito da companhia criadora daquele *software*. Contudo, os resultados obtidos para o problema prático demonstraram que o método heurístico GRASP apresentou desempenho próximo ao MPL. Além disto, o uso conjunto de heurística e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), apresenta a vantagem da combinação de um processo otimizado de busca da melhor solução com um banco de dados referenciado espacialmente. Cabe destacar que o SIG é capaz de reconhecer as relações entre objetos espaciais e topologia - tais como a conectividade entre *links* (ex. ruas, rodovias) - da uma malha viária. Isto permite a um *software* como o TransCAD conter algoritmos de determinação de caminhos mínimos, fundamental para a determinação de custo mínimo de transporte entre localidades (Church, 2002).

Portanto, este trabalho corrobora com o fato conhecido de que os métodos de programação linear são adequados para problemas de pequeno porte, desde que usados em conjunto com linguagens de programação que facilitem a elaboração escrita da modelagem desejada. Já os métodos heurísticos são recomendados para a busca de soluções de boa qualidade quando o espaço de soluções viáveis for amplo, o que ocasiona ganhos de tempo de processamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barreto, A. C. C.; Oliveira, C. B. Jr.; Medeiros, D. S. A. de; Brasil, G. H. de A. P. e Carvalho, T. C. A. de (2000) *Cadeia de Transporte de Hortifrutis do Supermercado Nordeste*. Universidade Potiguar, Programa de Especialização em Logística Empresarial, Natal, Rio Grande do Norte.
- Benson, D.; Bugg, R. and Whitehead, G. (1994) *Transport and Logistics*. Woodhead-Faulkner. London.
- Bowersox, Donald J. and Closs, David J. (1996) Planning and Design Techniques. *Logistical Management - The Integrated Supply Chain Process*. McGraw-Hill, Singapura.
- CALIPER (1996) *Crouting and Logistics with TransCAD 3.0*. Version 3.0, Microsoft Windows, Caliper Corporation, USA.
- Caixeta Filho, J. V.; Garmeiro, A. H.; Martingnon, L. de M. Soares, M. G.; Silva, N. de D. V.; Galvani, P. R. C.; Lopes, R. L. e Marques, R. W. da C. (2001) *Movimentação Rodoviária de Produtos Agrícolas Selecionados. Transporte e Logística em Sistemas Agroindustriais*. Editora Atlas, São Paulo, SP.
- Church, R.L. (2002). *Geographical information systems and location science*. Computers & Operations Research, vol. 29, Issue 6, 541-562.
- Dijin, G., Mitsuo G., Genji, Y. e Weixuan, X. (1997). *Hybrid Evolutionary Method for Capacitated Location-allocation Problem*. Computers & Industrial Engineering, 33 (3-4), 577-580.



- Fonseca, A. P. e S. e La Sota, E. P. (1998) *Abordagem Logística na Análise da Competitividade das Exportações Agrícolas Brasileiras*. UnB, Brasília, DF.
- Gomes, M.J.N. e Silva, J.B.C. (1999). *An experimental evaluation of the GRASP metaheuristic applied to the uncapacitated location problem*. Technical Report 004/99, Department of Statistics and Computation, State University of Ceará, Fortaleza, Ceará, Brazil.
- Nazário, P. (2000) *Intermodalidade: Importância para a Logística e Estágio Atual no Brasil*. COPPEAD, RJ.
- SEAGRI (2001) *Projeto agropólos - Sistema de informação gerencial agrícola*. Secretaria de Agricultura do Estado do Ceará. Governo do Estado do Ceará, Ceará, Brasil, Endereço eletrônico: <http://www.seagri.ce.gov.br>.
- Syam, S.S. (2002). *A model and methodologies for the location problem with logistical components*. Computers & Operations Research, Volume 29, Issue 9, 1173-1193.
- Tuzun, D e Burke, L.I. (1999). *A two-phase tabu search approach to the location routing problem*. European Journal Operational Research Vol. 116 (1), 87-99.
- World Bank (1996) *The Custo Brasil Since 1990-92*. Public Sector Management & Private Sector Development Division, Country Department I, World Bank, Report No. 15663-BR.