

**Nº 102
TESE DE
DOUTORADO**

**POTENCIAL DO APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO DE FONTES DE BIOMASSA NA
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

AUTOR: CLAUDEMIRO DE LIMA JÚNIOR

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

AGOSTO – 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**POTENCIAL DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE FONTES
DE BIOMASSA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

CLAUDEMIRO DE LIMA JÚNIOR

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes (DEN/UFPE)

Recife , PE

Agosto, 2013

CLAUDEMIRO DE LIMA JÚNIOR

**POTENCIAL DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE FONTES DE
BIOMASSA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Tese submetida ao Programa de Pós- Graduação
em Tecnologias Energéticas e Nucleares – para
obtenção do título de Doutor em Ciências, Área
de Concentração: Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes (DEN/UFPE)

Recife , PE
Agosto, 2013

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

L732p Lima Júnior, Claudemiro de.
Potencial de aproveitamento energético de fontes de
biomassa na região Nordeste do Brasil. / Claudemiro de Lima
Júnior. - Recife: O Autor, 2013.
x, 84 folhas, il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas
e Nucleares, 2013.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Equação alométrica. 2. Índice de vegetação. 3. Lenha
da caatinga. 4. Resíduo. 5. Viabilidade econômica.
I. Menezes, Rômulo Simões Cezar (orientador). II. Título.

CDD 662.88 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2013-10

**POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA BIOMASSA NA
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Claudemiro de Lima Júnior

APROVADA EM: 09.08.2013

ORIENTADOR: prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes – DEN/UFPE

Prof. Dr. Everardo Valadares de Sá Barreto Sampaio – DEN/UFPE

Prof. Dr. Luciano José de Oliveira Accioly –SOLOS/EMBRAPA

Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo – DEMEC/UFPE

Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira – (DFCL/UFRPE)

Visto e permitida a impressão

Coordenadora(o) do PROTEN/DEN/UFPE

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

Lavoisier

"No princípio era o Verbo, e o Verbo estava com Deus, e o Verbo era Deus. No princípio estava ele com Deus. Todas as coisas foram feitas por ele e sem ele nada se fez de tudo que foi feito. Nele estava a vida, e a vida era a luz dos homens. E a luz resplandece nas trevas, mas as trevas não a compreenderam."

João 1:1-5

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai, por sempre me sustentar em seus braços nos momentos mais difíceis.

Ao **Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes**, meu orientador, pela oportunidade, pelo incentivo, pelos anos de convívio e de amizade e pela orientação para a tese e para a vida.

À minha esposa, Regina Lima, pelo apoio, dedicação, paciência e aprendizado proporcionado.

As minhas filhas Mariana, Ana Luíza e Beatriz, pelo apoio e compreensão em momentos de minha ausência.

Aos meus pais Claudemiro e Elizabete, e aos meus irmãos, Cláudia e Rafael pelo carinho, apoio e incentivo.

Aos Doutores Everardo Sampaio, Flávio Figueiredo, Jorge Henríquez e Luciano Accioly, pela colaboração dada durante a realização do trabalho.

À Doutora Vanderlise Giongo, Embrapa Semiárido, pela acolhida e pelo apoio nos trabalhos de campo, e aos componentes do seu grupo de pesquisa Cozão, Mônica, Sheila, Wilis, Wesley e Emylly.

Aos amigos e aos familiares André Ferraz, Rogério, Beto, Rosângela, Reginaldo, Roney, Maria das Graças, Benedito, Narivânia, Raquel, Davi, Carmelo, Otávio, Dione, Carlos, Isnaldo, Sílvia, Gilson, Bruno, Adriano, Admilson, Gilma, Domingos Osmário, Edmundo, Calby, Alan, Márcia Pedrosa, Tatiana Gibertoni, Catarina Costa, pela presença e carinho que tornaram esta jornada agradável.

Aos alunos e técnicos do departamento de energia nuclear da UFPE Sumaia Almeida, André, Dário, Emmanuel, Patrick, Kennedy, Tiago, Taciana, Mona, Karina, Claudenice, Pedro, e Gilberto pelo auxílio prestado e pela amizade.

Aos Professores do PROTEN/DEN pelos conhecimentos transmitidos.

À Universidade de Pernambuco, pelo apoio dado durante o doutorado, e aos colegas professores Marta, Moisés, Wolmir, Paulo Adriano, Gleide, Silú, Rogério, João Paulo, Lucília, Auzinete, Veneziani, Petrucio, Diego, Aauto, Ricardo Kenji, Marianne.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa CNPq e à Embrapa, pelo apoio à pesquisa.

À todos estes, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	1
2.REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Fontes de Biomassa	4
2.2. Conversão Energética da Biomassa.....	5
2.3 Produção de eletricidade a partir de biomassa.....	8
2.4 Quantificação do potencial de geração de bioenergia no Brasil.....	9
2.5. Lenha da Caatinga.....	11
2.6. Manejo Florestal Sustentável.....	12
2.7. Equações Alométricas.....	13
2.8. Estimativas de Produção e Características da Biomassa da Caatinga	14
2.9. Estimativas de Biomassa Utilizando o Sensoriamento Remoto.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. Estimativa do potencial energético da biomassa produzida anualmente na região Nordeste do Brasil.....	20
3.2. Estimativa de biomassa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação.....	24
3.3. Viabilidade econômica do uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável para geração de energia.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Estimativa do potencial energético da biomassa produzida anualmente na região Nordeste do Brasil.....	37
4.2. Estimativa de biomassa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação.....	46
4.3. Viabilidade econômica do uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável para geração de energia.....	52
5. CONCLUSÕES.....	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
APÊNDICE.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Localização da área de estudo no município de Petrolina, em Pernambuco	25
Figura 3.2: Fornos cilíndricos verticais (a) e fornos tradicionais (b) para produção de carvão....	31
Figura 3.3: Diagrama simplificado do ciclo a vapor com turbinas de condensação	33
Figura 3.4: Diagrama simplificado da geração de energia através do Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	34
Figura 4.1: Disponibilidade anual de fontes de biomassa para produção de energia no Nordeste do Brasil em milhões de toneladas	37
Figura 4.2: Disponibilidade energética anual de fontes de biomassa para produção de energia no Nordeste do Brasil em GWh	38
Figura 4.3: Disponibilidade energética anual de fontes de biomassa para produção de energia no Nordeste do Brasil em GWh	42
Figura 4.4: Correlação entre quantidade de biomassa arbustiva-arbórea aérea, em toneladas de matéria seca (TMS), e o índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN).....	49
Figura 4.5: Estoques de biomassa numa área de caatinga estimados com uso do IVDN.	53
Figura 4.6: Distribuições de frequência simples (a) e acumulada (b) da quantidade de biomassa estimada com uso do IVDN.	53
Figura 4.7: Análise de sensibilidade financeira da comercialização direta da lenha. A curva de produtividade de lenha coincide com o preço da lenha.	60
Figura 4.8: Análise de sensibilidade financeira da produção de energia por termelétricas com ciclo combinado (a) e com ciclo a vapor condensado (b).	61
Figura 4.9: Análise de sensibilidade financeira da produção de carvão em fornos cilíndricos (a) ou em fornos tradicionais (b).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Estimativas de consumo de energéticos florestais no Nordeste para 2006)	12
Tabela 2.2: Características energéticas de dez espécies da Caatinga (LIMA et al., 1996)	15
Tabela 2.3: Espécies arbóreas/arbustivas mais representativas de área conservada de caatinga (ALVARES et al., 2009)	16
Tabela 2.4: Quantificação da biomassa da caatinga com uso de diferentes metodologias	19
Tabela 4.1: Potencial de produção anual das diferentes fontes de biomassa, por estado, em milhares de toneladas.....	44
Tabela 4.2: Potencial energético anual das diferentes fontes de biomassa, por estado, em megawattthora.....	45
Tabela 4.3: Identificação, localização e parâmetros fitossociológicos das parcelas de caatinga em Petrolina, PE	47
Tabela 4.4: Famílias, espécies, nome popular e parâmetros fitossociológicos e índice de valor de importância (IVI) de espécies arbustivo-arbóreas nas parcelas da caatinga em Petrolina - PE	48
Tabela 4.5: Espécies de plantas da área de estudo e poder calorífico superior e inferior (kcal/kg).....	54
Tabela 4.6: Custos com investimento inicial para exploração energética da lenha da caatinga nas rotas energéticas analisadas.....	55
Tabela 4.7: Receitas e custos anuais (R\$) para as cinco rotas energéticas de uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável.....	56
Tabela 4.8: Valores de fluxo de caixa anual para as cinco rotas energéticas de uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável num período de 20 anos	58
Tabela 4.9: Parâmetros da análise da viabilidade econômica do uso energético de lenha da caatinga.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAP	Área a altura do peito
APAR	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
APNE	Associação de plantas do Nordeste
AVHRR/NOAA	Advanced very high resolution radiometer/ national oceanic and atmospheric administration's
CASA	Carnegie ames stanford approach
CO ₂ flux	Índice do fluxo de dióxido de carbono
CONFINS	Contribuição para o financiamento da seguridade social
CSSL	Contribuição social sobre o lucro líquido
DAP	Diâmetro a altura do peito
d_r	Inverso do quadrado da distância relativa terra-sol
ESUN _{λ}	Irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera
H	Altura total da planta
ha	Hectare
IAF	Índice de área foliar
ICMS	Imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços de transporte interestadual, intermunicipal e de comunicação
ind	Indivíduos
INPE	Instituto nacional de pesquisas espaciais
IRPJ	Imposto de renda de pessoa jurídica
IVDN	Índice de vegetação pela diferença normalizada
IVF	Índice de vegetação fotossintético
IVI	Índice de valor de importância
Landsat TM	Land remote sensing satellite - thematic mapper
LOOCV	Leave-one-out cross-validation
$L_{\lambda i}$	Radiância espectral de cada banda
MFS	Manejo florestal sustentável
O&M	Operação e manutenção
p	Densidade da madeira
PIS	Contribuição para o programa de integração social
PRI	Período de retorno do investimento
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SEBAL	Surface energy balance algorithm for land
TFSEE	Taxa de fiscalização de serviços de energia elétrica
TIR	Taxa interna de retorno
TMA	Taxa mínima de atratividade
tMS	Tonelada de matéria seca
USD	Dólar dos estados unidos
VPL	Valor presente líquido
Z	Ângulo zenital solar
ρ_{IVP}	Reflectância no infravermelho próximo
ρ_V	Reflectância no vermelho

RESUMO

Na região Nordeste do Brasil, as estimativas de disponibilidade e potencial de aproveitamento energético da biomassa ainda são incipientes, sendo necessários esforços de quantificação detalhada da biomassa existente e passível de ser utilizada para conversão energética. Assim, este trabalho teve como objetivos: (1) estimar o potencial de aproveitamento energético das principais fontes de biomassa produzidas anualmente na região Nordeste do Brasil; (2) Ajustar um modelo de regressão linear que permita estimar a biomassa de lenha em áreas de caatinga a partir de imagens de satélites; e (3) avaliar a viabilidade econômica do aproveitamento energético da lenha de caatinga sob manejo florestal sustentável (MFS), considerando diferentes rotas de processamento. A estimativa do potencial energético das principais fontes de biomassa foi feita por meio de um levantamento da produção divulgada nas bases de dados 2010 do IBGE e do potencial de geração de energia. A relação entre a biomassa estimada ($t\cdot ha^{-1}$) por uso de equações alométricas e o índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN) obtido de uma imagem do sensor LANDSAT TM de uma área de caatinga foi estudada pela instalação de vinte parcelas com área de 10x20m em Petrolina, PE. Todas as plantas lenhosas vivas com diâmetro a altura do peito (DAP) igual ou maior que 3 cm foram identificados e tiveram sua altura e DAP medidos e suas biomassas estimadas a partir de equações alométricas. A avaliação da viabilidade econômica foi feita considerando as rotas tecnológicas de comercialização direta da lenha, da produção de carvão por fornos tradicionais e por fornos cilíndricos, e a produção de energia em termelétricas com ciclo a vapor com turbinas de condensação e ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa. Foram incluídos os custos com: compra da área, plano de manejo florestal sustentável, implantação e manutenção de cada rota, tributos e impostos. Os resultados obtidos demonstraram que as fontes com maior potencial de aproveitamento energético anual foram o bagaço de cana de açúcar, 143.725 MWh, a lenha da caatinga, 87.740 MWh, os resíduos urbanos, 27.941 MWh, o etanol, 17.649 MWh, e o coco-baía, 13.063 MWh. Nas potencialidades locais, merece destaque a biomassa do babaçu, no estado do Maranhão, a biomassa do coco-da-baía, nos litorais do Ceará, Bahia e Sergipe e nos perímetros irrigados no Vale do São Francisco, e a biomassa do dendê, no Sudeste da Bahia. Na área de caatinga em que foi feito o estudo, a densidade das plantas foi de $780\ ind\cdot ha^{-1}$, apresentando variação de 150 a $1900\ ind\cdot ha^{-1}$. A espécie arbustiva *Mimosa tenuiflora* apresentou maior índice de

valor de importância (IVI), e maior biomassa, 10,11 t.ha⁻¹. Os valores de IVDN variaram entre 0,4161 e 0,7067, apresentando-se positivamente correlacionados com os valores de biomassa estimados, os quais variaram entre 5,93 e 60,74 t.ha⁻¹, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,84 e $p < 0,01$. A regressão linear entre IVDN e a biomassa obteve índice de determinação $R^2 = 0,70$ e desvio padrão de 8,43 t.h⁻¹. O erro de predição na estimativa da biomassa, obtido do pelo método da validação cruzada foi igual a 31%. A biomassa aérea média variou entre 1 e 52 tMS.ha⁻¹, e a biomassa lenhosa média foi de 30 tMS.ha⁻¹. O poder calorífico inferior das espécies variou de 3648 a 4327 kcal.kg⁻¹, a jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) apresentou maior densidade energética. As rotas de produção de carvão apresentaram maior viabilidade econômica, com valor presente líquido positivo e com o prazo de retorno de investimento de 2,4 anos, para os fornos cilíndricos, e de 3 anos, para os fornos tradicionais. A análise de sensibilidade mostrou que é viável a comercialização direta da lenha e a produção de energia elétrica por termelétricas com o aumento dos parâmetros produtividade de lenha, preço de energia e preço de lenha ou com a diminuição do custo de investimento inicial ou do preço da terra. É considerável o potencial de aproveitamento energético da biomassa na região NE, com muitas possibilidades de exploração, a exemplo dos resíduos de coco-baía, coco-babaçu e a lenha da caatinga. É possível estimar a biomassa da lenha da caatinga sob MFS de grandes áreas com o uso de imagens de satélite, com uma precisão satisfatória para um método indireto de medição. A rota tecnológica mais viável para a lenha da caatinga sob MFS é a produção de carvão, mas caso haja incentivos governamentais como subsídios para a instalação de equipamentos ou melhores preços para a energia vendida às concessionárias, a geração de energia por termelétricas podem vir a ser um vetor para o desenvolvimento regional.

Palavras-chave:, Equação alométrica, índice de vegetação, lenha da caatinga, resíduo viabilidade econômica.

ABSTRACT

In northeastern Brazil, estimates of availability and potential use of biomass energy still are incipient, being necessary efforts for quantification of existing biomass and capable of being used for energy conversion. Thus, this study aimed to: (1) estimate the potential value of the main energy sources of biomass produced annually in northeastern Brazil, (2) Set a linear regression model for estimating biomass burning in areas of Caatinga from satellite images, and (3) evaluate the economic viability of the energy use of firewood caatinga under sustainable forest management, considering different processing routes. The estimate of the energy potential of the main sources of biomass was done through a survey of the production reported in databases IBGE 2010 and the potential for power generation. The relationship between the estimated biomass ($t\ ha^{-1}$) using allometric equations and the normalized difference vegetation index (NDVI) image 217/66 LANDSAT TM sensor in an area of caatinga was studied by the installation of twenty plots 10x20m area in Petrolina, PE. All living woody plants with a diameter at breast height (DBH) equal to or greater than 3 cm were identified and had their height and DBH measured and their biomass estimated from allometric equations. The evaluation of economic viability was performed considering the technological routes direct marketing of firewood, coal production by traditional ovens and cylindrical furnaces, and energy production in thermoelectric with steam cycle with condensing turbines and combined Integrated cycle the gasification biomass. We included costs: buying the area, sustainable forest management plan, deployment and maintenance of each route, taxes and taxes. The results showed that sources with greater potential for annual energy use were the crushed sugar cane, 143,725 MWh, of caatinga wood, 87,740 MWh, municipal waste, 27,941 MWh, ethanol, 17,649 MWh, and coco-baía, 13,063 MWh. In the local potential, deserves prominence biomass babassu in the state of Maranhão, biomass coco-baía, on the coasts of Ceará, Bahia and Sergipe in irrigated areas in the São Francisco Valley, and biomass of oil palm in Southeast Bahia. In the area caatinga that the study was conducted, the plant density was 780 ind.ha⁻¹, showing variation 150-1900 ind.ha⁻¹. The species *Mimosa tenuiflora* showed higher importance value index (IVI), and greater biomass, 10.11 $t\ ha^{-1}$. NDVI values ranged between 0.4161 and 0.7067, with positively correlated with the values of biomass estimates, which ranged between 5.93 and 60.74 $t\ ha^{-1}$, with a correlation coefficient of Pearson 0.84 and $p < 0.01$. The linear regression between NDVI and biomass obtained index determination $R^2 = 0.70$ and standard deviation of 8.43 $t\ ha^{-1}$. The prediction error in the

estimate of the biomass obtained by the cross validation method was equal to 31%. The aerial average biomass ranged between 1 and 52 tMS.ha TMS⁻¹, and woody biomass averaged 30 tMS.ha⁻¹. The lower calorific value of the species ranged 3648-4327 kcal.kg⁻¹, jurema in (*Mimosa tenuiflora*) showed higher energy density. The production routes of the coal showed greater economic viability, with positive net present value and the period of return on investment of 2.4 years for cylindrical furnaces, and 3 years for traditional ovens. The sensitivity analysis showed that the direct marketing of wood and the production of electricity by thermal power plants with increased productivity parameters of firewood, energy price and price of wood or with the decrease of the initial investment cost or the price of land. There is a considerable potential for energetic use of biomass in the northeastern with many possibilities of exploitation, especially from sources that still are not yet commercially used, such as waste coco-baía, babassu and firewood of the Caatinga. It is possible to estimate biomass firewood of the Caatinga under MFS of the large areas with using satellite images with a satisfactory accuracy for an indirect method of measurement. The technological route more viable for firewood caatinga under MFS is the production of coal, but if there are government incentives like subsidies for the installation of equipment or the best price for power sold to utilities, power generation by thermoelectric may become a vector for regional development.

Keywords: Residue, vegetation index, allometric equations, caatinga firewood, economic viability.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de um país e a qualidade de vida de sua população são profundamente influenciados pela disponibilidade de energia, que atrelada à economia e ao uso sustentável dos recursos naturais podem ser considerados os três pilares essenciais para o desenvolvimento de uma nação.

O aumento no uso das fontes renováveis de energia na matriz energética dos países desenvolvidos e em desenvolvimento tem sido motivado pela necessidade de reduzir o uso de derivados de petróleo para minimizar a dependência energética em relação aos países exportadores de petróleo e também para diminuir a emissão dos gases causadores do efeito estufa.

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com potencial de crescimento nos próximos anos, sendo considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis, apontados como principais causadores do efeito estufa. A disponibilidade, acesso e características de produção dos diferentes tipos de biomassa são variáveis, com isso o uso efetivo deve ser feito após realização de estudos que avaliem a viabilidade econômica e ambiental.

No Brasil, em particular na região Nordeste, as estimativas da disponibilidade de resíduos florestais e alguns outros tipos de biomassa ainda são incipientes, pois são fortemente influenciadas pelas condições ambientais locais e também porque ainda não foi quantificada com o detalhamento necessário, já que não há interesse atual no uso de algumas fontes de biomassa para geração de energia. Sendo assim, são necessários esforços de quantificação detalhada da biomassa existente e passível de ser utilizada para conversão energética.

O semiárido nordestino tem como tipo de vegetação predominante a Caatinga. No ano de 2007, a vegetação nativa da Caatinga cobre cerca de 42% da área original do semiárido nordestino (SAMPAIO et al. 2008). A retirada da vegetação é feita principalmente para uso na prática agrícola, pecuária extensiva e extração de lenha para fins energéticos (GARIGLIO et al, 2010), e resulta na redução do estoque e da produção de biomassa vegetal e na diminuição da cobertura dos solos do semiárido, esses fatores levam ao aumento na degradação desse bioma (THOMAS *et al.*, 2009).

A lenha da caatinga tem sido utilizada como umas das principais fontes de energia na região, seja para o consumo doméstico em áreas interioranas, seja para uso em indústrias,

principalmente as de panificação, olarias e calcinação de gipsita no pólo gesseiro. Apesar do uso intensivo da lenha da caatinga, não há registro sobre as quantidades de biomassa que são retiradas desse bioma (SILVA; SAMPAIO 2008). Alguns estudos têm sido desenvolvidos para quantificar a biomassa neste tipo de vegetação, com uso de métodos diretos e indiretos. As medições diretas tem alto grau de precisão, mas envolvem amostragem destrutiva, consomem tempo e tem alto custo. As medições indiretas são boas alternativas para a medição de biomassa, pois implicam em menor dano ambiental, baixo consumo de recursos humanos e menor custo financeiro. Elas podem ser feitas com o uso de imagens de satélite e o desenvolvimento de equações alométricas.

Atualmente muitas estimativas são baseadas em metodologias que envolvem o uso de imagens de satélite de sensores como o Landsat TM, pois a informação espectral apresenta forte correlação com a biomassa e pode ser utilizada para criação de índices de vegetação (BRAGA et al., 2006; BRANDÃO *et al.*, 2007; COSTA et al., 2002; THOMAS *et al.*, 2009; VIANA et al., 2009;). O Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (IVDN) é um indicador sensível à quantidade de vegetação verde, mais comumente usado, calculado como uma razão entre a reflectância medida nas regiões do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, sendo essas duas bandas espectrais selecionadas em razão de serem mais afetadas pela absorção da clorofila pela folhagem da vegetação verde e conseqüentemente pela densidade dessa vegetação na superfície (FRANCISCO et al., 2012). As equações alométricas são equações matemáticas que relacionam a biomassa com algumas variáveis das árvores, como o diâmetro e a altura. Elas permitem estimar a biomassa das plantas com uso de medidas biométricas não destrutivas (SILVA; SAMPAIO, 2008).

Dada à alta variabilidade da fisionomia vegetacional do Bioma Caatinga, as estimativas de estoques de biomassa com base em técnicas de sensoriamento remoto podem ser extremamente úteis tanto para a identificação das regiões com maior potencial para exploração de lenha, quanto para o monitoramento de áreas manejadas ou de preservação permanente.

A lenha pode ser aproveitada através de vários processos. A lenha da caatinga é mais comumente vendida para combustão direta para aproveitamento da energia térmica, mas também pode ser utilizada para a produção de carvão (CRUZ; NOGUEIRA, 2004). Outra possibilidade de conversão energética da lenha é a geração de energia através de termelétricas, seja por ciclo de geração de vapor, ou através de ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa (BRAND, 2010)

A viabilidade técnica e econômica da exploração sustentável da lenha em diferentes áreas da região semiárida ainda é incipiente. Além disso, também são reduzidas as informações sobre custos e receitas de cada rota de processamento da lenha, de maneira a viabilizar a comparação dos diferentes cenários de aproveitamento energético. Para se determinar a viabilidade da produção de lenha sob manejo sustentável, para fins energéticos, é necessário realizar o levantamento quantitativo da biomassa da área a ser explorada e o poder calorífico das espécies locais.

Diante do exposto, considerou-se importante realizar um estudo diagnóstico da biomassa na região Nordeste do Brasil, pela quantificação e avaliação do potencial energético dos principais tipos de biomassa e pela avaliação da viabilidade econômica do uso energético sustentável da lenha da caatinga.

Os objetivos específicos do presente estudo foram: 1) estimar o potencial de aproveitamento energético das principais fontes de biomassa produzidas anualmente na região Nordeste do Brasil; 2) Ajustar um modelo de regressão linear que permita estimar a biomassa de lenha em áreas de Caatinga a partir de imagens de satélites; e (3) avaliar a viabilidade econômica do aproveitamento energético da lenha de caatinga sob manejo florestal sustentável, considerando diferentes rotas de processamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fontes de biomassa

A matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus diversos produtos e subprodutos derivados, como as florestas, as culturas e os resíduos agrícolas, também os dejetos animais e a matéria orgânica que é contida nos rejeitos industrial e urbano considerada biomassa (CRUZ, NOGUEIRA, 2004; COELHO *et al.*, 2008). A biomassa contém a energia química acumulada através da transformação energética da radiação solar e pode ser diretamente liberada por meio da combustão, ou ser convertida através de diferentes processos em produtos energéticos como, por exemplo: carvão vegetal, etanol, gases combustíveis, óleos vegetais combustíveis e outros. Segundo Nogueira e Lora (2002), do ponto de vista do aproveitamento energético a biomassa pode ser subdividida em 3 grandes grupos: biomassa florestal, biomassa agrícola e resíduos urbanos.

- a) Biomassa energética florestal: é proveniente dos recursos florestais, seus produtos e subprodutos, que incluem basicamente a lenha, que pode ser obtida sustentavelmente através de florestas cultivadas ou florestas nativas sob manejo florestal sustentável (MFS). Os subprodutos são os originados por atividades que processam a madeira para fins não energéticos, como a indústria moveleira e a indústria de papel e celulose; (SILVA *et al.*, 2009; BRAND, 2010).
- b) Biomassa energética agrícola: é derivada de colheitas e estão neste grupo as culturas para fins energéticos como a cana-de-açúcar, o milho, o trigo e todas as oleaginosas destinadas à produção de biocombustíveis; e os subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal como cascas de arroz, a castanha de caju e o esterco animal (HENRIQUES, 2009; MENEZES *et al.*, 2011)
- c) Resíduos urbanos: corresponde à fração orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos (RSU), que é uma mistura heterogênea de metais, plásticos, vidro, resíduos celulósicos e vegetais, e também matéria orgânica, a qual pode ser aproveitada por diversas rotas tecnológicas (SALOMON, LORA, 2005; PARO *et al.*, 2008).

2.2. Conversão Energética da Biomassa

O aproveitamento da biomassa pode ser feito através de diferentes tipos de conversão energética, como a termoquímica, que inclui os processos de combustão direta, gaseificação e pirólise; a bioquímica, que inclui os processos de digestão anaeróbica, fermentação/destilação e hidrólise; e a físico-química, que inclui a compressão, extração e transesterificação (BRASIL, 2002; CRUZ, NOGUEIRA, 2004).

- a) *Combustão direta*: é a forma mais simples de obtenção de energia da biomassa. A combustão se dá pela oxidação total ou parcial do carbono e do hidrogênio presentes na biomassa. O oxigênio combina-se com o hidrogênio para formar vapor e com o carbono para formar dióxido de carbono, convertendo a energia química em calor. Este calor resultante pode ser utilizado para aquecimento ou para produção de vapor em caldeiras e a eficiência de conversão energética dependerá do nível de tratamento dado à biomassa, que envolve atividades de classificação, densificação, secagem, limpeza, dentre outros (BRAND, 2010).

- b) *Pirólise ou destilação seca*: é um processo físico-químico no qual a biomassa, geralmente lenha, é aquecida em atmosfera controlada, a temperaturas relativamente baixas (500°C – 800°C), com limitação ou ausência do agente oxidante, e a madeira é decomposta pela ação da temperatura. Este processo visa à fixação de carbono na forma de carvão vegetal e as frações de pirólise composta de gases e vapores orgânicos condensáveis geram o líquido pirolenhoso, composto pelo ácido pirolenhoso e alcatrão insolúvel (BRAND, 2010). As proporções desses compostos variam muito, dependendo do método de pirólise utilizado, dos parâmetros do processo e das características do material, como o teor de umidade. Nos processos de pirólise rápida, sob temperaturas entre 800°C e 900°C, cerca de 60% do material transformam-se num gás rico em hidrogênio e monóxido de carbono e apenas 10% em carvão sólido, o que as tornam competitivas com a gaseificação. Entretanto, a pirólise convencional ainda é a tecnologia mais atrativa, devido aos problemas do tratamento dos resíduos, que são maiores nos processos com temperatura mais elevada (ANDRADE *et al.*, 2004; COUTO, WATZLAWICK, 2004).

- c) *Gaseificação*: é um processo de decomposição térmica da matéria orgânica originando uma mistura de gases. Os materiais mais indicados para a gaseificação como forma de aproveitamento energético são os resíduos lignocelulósicos com baixa umidade (< 40%), como palha de cereais, cavacos de madeira, cascas de frutos, serragem, resíduos urbanos, resíduos animais (BRAND, 2010). Há vários tipos de gaseificadores, com variações na temperatura e/ou pressão, sendo que os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. O gás resultante desse processo é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo, particularmente se é ar ou oxigênio que está sendo usado na oxidação. A gaseificação de biomassa apresenta algumas vantagens quando comparados aos combustíveis sólidos referentes à limpeza e à saúde humana, além da possibilidade de poder ser utilizada em motores de combustão interna e turbinas a gás (CORTEZ *et al.*, 2008). Ainda, o gás pode ser canalizado e distribuído para cozimento de alimentos e aquecimento de uma forma geral.
- d) *Digestão Anaeróbia*: processo de decomposição de matéria orgânica pela ação de bactérias acidogênicas e metanogênicas. Esse processo tem como principal produto final uma mistura de gases denominada biogás, que é composta principalmente de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), podendo apresentar quantidades menores de gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂) e hidrogênio (H₂). Esse processo pode ser utilizado tanto para resíduos sólidos quanto para líquidos, e a conversão da matéria orgânica em biogás reduz o poder poluente dos resíduos (CORTEZ *et al.*, 2008). O biogás pode ser utilizado como combustível porque apresenta alto teor de metano (LEITE *et al.*, 2004). O tratamento e o aproveitamento energético de dejetos orgânicos, como por exemplo, o esterco animal e os resíduos industriais, podem ser feitos pela digestão anaeróbia em biodigestores, onde o processo é favorecido pela umidade e aquecimento. O aquecimento é produzido pelo calor liberado das reações promovidas pelas enzimas das bactérias, mas em climas frios, pode ser necessário calor adicional, visto que a temperatura deve ser de pelo menos 35°C. O conteúdo energético do metano gerado contém em torno de 8.500 kcal por metro cúbico, e como o biogás tem em torno de 70% a 80% de metano, seu poder calorífico fica em torno de 5.500 kcal.m⁻³ e o efluente gerado pelo

processo geralmente é utilizado como fertilizante (HAACK, 2009; DUTRA *et al.*, 2009).

- e) *Fermentação*: é um processo biológico anaeróbio no qual açúcar, glicose ou frutose, ou outros sacarídeos de plantas como a batata, o milho, a beterraba e a cana de açúcar são convertidos em etanol e CO₂, por meio da ação de microrganismos. O produto final é o etanol na forma de álcool hidratado e, em menor escala, o álcool anidro, com menos de 1% de água. O primeiro pode ser usado como combustível puro em motores de combustão interna, o segundo pode ser misturado à gasolina, na proporção de 20% a 22% no Brasil. O resíduo sólido do processo de fermentação pode ser utilizado em usinas termelétricas para a produção de eletricidade (REGO; HERNÁNDEZ, 2006).
- f) *Hidrólise*: Processo para obtenção de combustíveis líquidos, como o etanol, que pode ser produzido por hidrólise, de biomassas sacaríneas, amiláceas ou celulósicas. A biomassa é composta majoritariamente de carboidratos, incluindo açúcar, que pode ser dividido em mono, di, tri, tetra e polissacarídeos. O álcool hidratado, produto final do processo de destilação, é uma mistura de álcool e água com teor alcoólico de aproximadamente 96° GL que pode ser desidratado para um teor de 99,7° GL. O vinhoto ou vinhaça é o resíduo de produção do álcool.
- g) *Transesterificação*: Principal método utilizado para a produção de biodiesel, a reação de transesterificação de óleos vegetais ou de origem animal visa retirar dos triglicerídeos o glicerol, álcool com 3 carbonos, e substituí-lo por álcool com menor número de carbonos, tais como o metanol com um átomo de carbono, formando monoglicerídeos, ou por etanol com dois átomos de carbono, formando diglicerídeos. Essa troca da molécula de álcool irá conferir maior propriedade combustível que a da gordura original. Os produtos dessa reação química são a glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos (biodiesel). O biodiesel tem características físicoquímicas muito semelhantes às do óleo diesel e, portanto, pode ser usado em motores de combustão interna, de uso veicular ou estacionário (KNOTHE *et al.*, 2006; MENEZES *et al.*, 2011).

2.3. Produção de eletricidade a partir de biomassa

A biomassa foi a primeira fonte energética da humanidade e ainda é a fonte mais utilizada por metade da população mundial, mas a produção de eletricidade a partir da biomassa é pouco significativa. Atualmente, existe um maior interesse a produção de eletricidade a partir da biomassa para aproveitamento de resíduos agrícolas, resíduos urbanos e pela necessidade de alternativas de geração de energia menos danosas ao meio ambiente (WALTER, NOGUEIRA, 2008).

As alternativas tecnológicas para produção de energia elétrica a partir da biomassa consistem na sua conversão em produtos intermediários que são utilizados para produzir energia mecânica numa máquina motriz, que aciona um gerador de energia elétrica. Nesta revisão, na etapa de conversão de biomassa são consideradas as tecnologias de combustão direta e de gaseificação que tem como produtos intermediários vapor e gás combustível, respectivamente. Esses produtos intermediários são utilizados em turbinas a vapor e a gás, como máquinas motrizes. As alternativas tecnológicas consideradas para geração de energia elétrica a partir da biomassa são:

a) Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão.

Quando empregado de forma integrada a processos produtivos, a geração termelétrica que dispõe de biomassa como combustível são tradicionalmente realizados por sistemas com ciclo de co-geração. Nestes sistemas, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor. Este vapor pode acionar turbinas de trabalho mecânico do processo e turbinas para geração de energia elétrica e, após a realização do trabalho, será encaminhado para atender as necessidades térmicas do processo produtivo. Como estes ciclos não possuem condensadores, é no processo produtivo que o vapor de escape retorna à sua condição de líquido condensado e pode então ser bombeado para retornar à caldeira para completar o ciclo. Assim, a quantidade de vapor gerado na caldeira fica limitada pela demanda térmica do processo produtivo e a geração de energia elétrica fora da co-geração fica impossibilitada (CAMARGO *et al.*, 1990; BRASIL, 2007a).

b) Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração,

Neste ciclo, o vapor ao final da realização do trabalho na turbina é, total ou parcialmente, condensado e a parcela de vapor necessária ao atendimento dos requisitos mecânicos e térmicos do processo produtivo, quando integrado em co-geração, é fornecida

por extração de vapor em um ponto intermediário da expansão na turbina. As diferenças fundamentais deste ciclo para o a vapor com turbinas de contrapressão é a existência de um condensador na exaustão da turbina e de alguns níveis de aquecimento da água de alimentação da caldeira, realizado com vapor extraído em vários estágios da turbina. A primeira alteração proporciona uma maior flexibilidade da geração termelétrica que deixa de ser condicionada ao consumo de vapor de processo, permitindo inclusive a operação em geração elétrica pura, e a segunda, proporciona uma elevação da eficiência global da geração. Entretanto, ambas elevam significativamente os investimentos (BRASIL, 2007a; SANTOS, 2010).

c) Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa.

A tecnologia de gaseificação em maior escala habilita a biomassa como uma importante fonte primária em centrais de geração termelétrica de elevada potência em que as máquinas térmicas são as turbinas a gás. As turbinas a gás em ciclo aberto são máquinas motrizes de combustão interna, pois a energia liberada pelo combustível é diretamente transferida ao fluido de trabalho, sem a necessidade de trocadores de calor para transferir energia entre a fonte de calor e o fluido de trabalho ou entre o fluido e o meio ambiente, uma vez que os gases de exaustão são descarregados diretamente na atmosfera. O desenvolvimento dos ciclos combinados, que integram recuperadores de calor e turbinas a vapor consolidam este potencial que aproveita a energia térmica dos gases de exaustão da turbina a gás para gerar vapor a média/alta pressão e utilizá-lo em uma turbina a vapor, elevando a potência e a eficiência global do ciclo. Estudos indicam que a tecnologia que integra um sistema de gaseificação de biomassa a um ciclo combinado de geração termelétrica apresenta eficiência de geração termelétrica entre 36% e 45 % (BRASIL, 2007a).

Apesar de toda a tecnologia disponível para a geração de energia elétrica a partir de biomassa, a geração termelétrica desta fonte se concentra no bagaço da cana-de-açúcar. Logo, é importante o desenvolvimento de estudos que apontem os potenciais de geração de energia a partir de outras fontes de biomassa e a sua localização.

2.4. Quantificação do potencial de geração de bioenergia no Brasil

Dentre as principais publicações sobre a temática deste trabalho, envolvendo o mapeamento do potencial da biomassa, destacam-se “O Panorama do potencial de biomassa

no Brasil” (COELHO *et al.*, 2002) e o “Atlas de bioenergia do Brasil” (COELHO *et al.*, 2008).

O “O Panorama do potencial de biomassa no Brasil”, elaborado através do convênio entre o Centro Nacional de Referência de Biomassa da Universidade de São Paulo (CENBIO), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), faz um levantamento da produção e do potencial de energia das fontes de biomassa em todo o território nacional, agrupando as informações por microregiões e por Unidades de Federação, segundo a classificação vigente do IBGE. Para a Região Nordeste, foram apresentados os estudos de quantificação e potencial da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar, da casca de arroz, da casca da castanha de caju, da casca do coco-baía e dos resíduos da silvicultura, na escala regional e do óleo de palma, na Bahia. Os resultados foram apresentados como mapas temáticos, segundo as mesorregiões.

No Atlas de bioenergia do Brasil (COELHO, *et al.*, 2008), é dada continuação à publicação do potencial de biomassa no Brasil sendo feitas algumas alterações, como a adição dos panoramas dos potenciais de geração de energia a partir do biogás proveniente da disposição de resíduos sólidos urbanos, do tratamento de efluentes líquidos urbanos nos municípios brasileiros e do tratamento de efluentes provenientes da criação de suínos. Os cenários potenciais para a cana-de-açúcar, feitos anteriormente considerando-se 10 e 126 kWh/t de cana moída, foram refeitos e consideradas eficiências de 30, 60 e 120 kWh/t de cana moída. No potencial de geração de energia a partir de resíduos florestais foram consideradas duas tecnologias com eficiências de 15% e 30%, em vez de apenas 15% considerados no trabalho anterior. Os resíduos agrícolas, que anteriormente foram apresentados separadamente, no Atlas estão em conjunto e representam o potencial total de uso das cascas de arroz, amendoim e coco-baía. Para a Região Nordeste, foram apresentados os resultados de estimativa de potencial da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar, dos resíduos da silvicultura, do biogás da criação de suínos, dos resíduos agrícolas e do óleo de palma. Os resultados foram apresentados como mapas temáticos na escala de municípios. A biomassa mais utilizada no semiárido do Nordeste do Brasil é a lenha da caatinga, que é extraída de forma predatória, sendo necessária a realização do mapeamento dos potenciais desta biomassa, para a criação de planos de manejo florestal, e assim viabilizar a exploração sustentável deste recurso.

2.5. Lenha da Caatinga

A Caatinga é a vegetação predominante da Região Nordeste, cobrindo cerca de 42% da área total, uma área aproximada de 800.000 km², e inclui áreas dos estados de Sergipe, de Alagoas, de Pernambuco, da Paraíba, da Bahia, do Rio Grande do Norte, do Piauí, do Ceará e também de Minas Gerais. Desta área, quase 40% estão recobertas de vegetação nativa e a maior parte dessa vegetação é usada para produção de lenha (SILVA, SAMPAIO, 2008). A Caatinga tem grande importância socioeconômica, por constituir a fonte mais importante de produtos energéticos tanto para a população como para alguns setores da indústria. A exploração florestal complementa as atividades agropecuárias, sendo uma das poucas alternativas econômicas que o produtor rural dispõe nos períodos de estiagem (ALVES JUNIOR, 2010).

Riegelhaupt e Pareyn (2010) realizaram estimativas do consumo de energéticos florestais no Nordeste para o ano de 2006 (Tabela 2.1). A demanda mercantil de lenha e carvão no Nordeste neste ano ficaram na ordem de 25,1 milhões de esteres (5,3 tMS ou 2,31 TEP) por ano para os setores industrial e comercial, mais 9,4 milhões de esteres (2 tMS ou 0,86 TEP) para o setor residencial, totalizando 34,5 milhões de esteres de lenha comercializados anualmente. No setor industrial, os maiores consumidores são os ramos de cerâmica vermelha, ferro gusa e gesso com 40%, 30% e 6% do consumo total, respectivamente. No setor comercial, 50% do consumo está concentrado no ramo de refeições (restaurante, churrascaria e pizzaria) e 30% do consumo no ramo de padaria e confeitaria.

As principais ameaças à conservação da caatinga devem-se às práticas de atividades como corte de madeira para lenha sem acompanhamento e contínuos desmatamentos para criação de pastagens para bovinos e caprinos (FERRAZ, 2011). Em substituição a atual forma de exploração da biomassa, é necessário adotar um sistema mais adequado de manejo florestal, sustentável, no qual as interações das florestas com outros recursos, como água, solo, atmosfera, fauna, conservação da biodiversidade e capacidade de renovação, sejam levados em consideração (PAREYN, 2007).

Tabela 2.1: Estimativas de consumo de energéticos florestais no Nordeste para 2006

UNIDADES*	INDÚSTRIA	COMÉRCIO	DOMICÍLIOS	TOTAL
Estéreo (x10⁶)	20,0	5,1	9,4	34,5
tMS (x10⁶)	4,2	1,1	2,0	7,3
TEP (x10⁶)	1,8	0,5	0,9	3,2
MWh (x10⁶)	21,3	5,6	10,1	37

* Estéreo_ quantidade de lenha que pode ser empilhada ordenadamente em um metro cúbico; tMS – tonelada de matéria seca; TEP – tonelada equivalente de petróleo; MWh – Megawatthora. Fonte: (RIEGELHAUPT , 2004)

Dentre as alternativas possíveis para atender a demanda de lenha, existem o reflorestamento e o manejo sustentável. Os custos iniciais do reflorestamento, seja com eucaliptos ou com essências nativas, variam entre 700 e 1200 USD/ha. Considerando que o tempo até a colheita pode variar de 6 a 15 anos, o custo final, incluindo os juros sobre o capital, manutenção do plantio e renda da terra, atinge de 1400 a 2400 USD/ha. Com expectativas otimistas de produtividade para o semi-árido, o custo do investimento é de 18 a 20 USD.tMS⁻¹ (RIEGELHAUPT et al., 2010).

2.6. Manejo Florestal Sustentável

O manejo florestal sustentável da Caatinga associado ao seu reflorestamento nativo, visando a produção de biomassa energética é a solução ideal para reverter o processo de degradação do sertão, além de ser a solução econômica mais viável para a região, superando a pecuária e a agricultura (MELO, 2007).

Para o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2010), manejo florestal sustentável é a administração da floresta para obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo e considerando-se, cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços florestais. A oficialização do manejo junto aos órgãos ambientais é feita através do Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), instrumentos de gestão ambiental. O PMFS é um documento técnico que apresenta todas as informações do inventário florestal, os aspectos técnicos do manejo florestal aplicado, como taxa de

crescimento, ciclo de corte, produtividade estimada, talhonamento, etc. e toda documentação exigida pela legislação pertinente (ALVES JUNIOR, 2010).

O plano de manejo pode ser organizado em três etapas: 1) zoneamento ou divisão da propriedade florestal em áreas exploráveis, áreas de preservação permanente e áreas inacessíveis à exploração; 2) planejamento das estradas secundárias que conectam a área de exploração às estradas primárias; 3) divide-se a área alocada para exploração em blocos ou talhões de exploração anual (MELO, 2007).

Para se colocar uma área de caatinga sob manejo sustentável, é necessário um investimento inicial que varia de 12 a 18 USD/ha, incluindo-se os custos de formulação e aprovação do plano de manejo e assistência técnica para o seu acompanhamento. Com produtividade média de 2,1 tMS/ha/ano, isto representa de 6 a 9 USD/tMS, ou seja, duas a três vezes menos que no caso dos plantios florestais (PAREYN, 2007).

Os grandes beneficiários do manejo florestal da Caatinga seriam: 1) o produtor rural, por ter o manejo como uma alternativa produtiva na sua propriedade para gerar renda em base sustentável; 2) a indústria e/ou comércio, por obter a sua fonte de energia de forma legalizada e regularizada; e 3) o Estado, por exercer a gestão sustentável das florestas, gerando emprego e renda e legalizando a produção e o consumo de produtos florestais (RIEGELHAUPT, PAREYN, 2010).

2.7. Equações Alométricas

A alometria de árvores, isto é, as relações entre tamanho e forma, apresentam um relevante efeito na estrutura e funcionamento da floresta (KING, 1996). Equações para estimar as massas de lenha e as biomassas totais de plantas individuais a partir de medidas como diâmetro de caule e altura têm sido desenvolvidas para algumas espécies e grupos de espécies. Elas permitem a realização de estimativa da biomassa sem derrubada das plantas. As equações mais simples consideram apenas um elemento da árvore para estimar a sua biomassa. Uma alternativa é medir o diâmetro à altura do peito (DAP), ou altura da árvore, determinando sua biomassa através de fórmulas ou tabelas (KUNTSCHIK, 2004)

Em Silva e Sampaio (2008) as biomassas de partes aéreas de nove espécies arbóreas/arbustivas da caatinga foram determinadas e relacionadas com as medidas das plantas, cortando-se 30 plantas de cada espécie e separando-as em caule, galhos, ramos e folhas. De acordo com esse estudo, a variável isolada que melhor estimou as biomassas das

partes, nos dois grupos de espécies, foi o diâmetro do caule a altura do peito (DAP), com equações de potência relacionando a Biomassa (B): $B = a(\text{DAP})^b$, onde os parâmetros a e b variam em função dos diâmetros de caules e galhos. Nas plantas a partir de 17,5 cm de DAP, cerca de 70% da biomassa é de fustes e galhos maiores que 5 cm de diâmetro, 20% de galhos entre 1 a 5 cm, 5% de ramos menores que 1 cm e 5% de folhas. Os galhos maiores que 1 cm são mais permanentes nas plantas e usados como lenha.

2.8. Estimativas de Produção e Características da Biomassa da Caatinga

A biomassa, em termos florestais, pode ser toda a massa existente na floresta ou apenas na fração arbórea. Esta porção da biomassa de origem vegetal pode ser chamada de fitomassa florestal ou fitomassa arbórea (ALVES JUNIOR, 2010).

A biomassa florestal é formada pela combinação de dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera e água (H_2O), absorvidas pelas raízes das plantas, na fotossíntese clorofiliana, que produz carboidratos (CH_2O), através da reação química: $\text{fóton} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$. A energia luminosa é armazenada nas ligações químicas dos componentes estruturais da biomassa. Quando a biomassa é queimada de modo eficiente, há liberação de energia e produção de dióxido de carbono e água, fazendo um processo cíclico, que aliado à capacidade de regeneração rápida, faz com que a biomassa seja considerada um recurso renovável (BRAND, 2010).

Para se determinar a potencialidade de um combustível, deve-se primeiramente conhecer as características químicas e térmicas fundamentais, sua composição química e seu potencial energético. Essas características são: a) composição elementar ou porcentagem de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, umidade e cinzas; b) composição imediata: porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas; e c) poder calorífico, ou a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível (CORTEZ et al, 2008).

Apesar do uso intensivo da lenha da caatinga, pouco se sabe sobre as quantidades de biomassa que são retiradas e recicladas e das partes das plantas utilizadas para esses diversos fins (SILVA, SAMPAIO, 2008).

Lima et al. (1996) apresentaram os resultados de ensaios tecnológicos de dez espécies das Caatingas, pertencentes a seis famílias, do trópico semiárido brasileiro (tabela 2.2). Foram analisados alguns caracteres energéticos com a finalidade de contribuir na seleção

das espécies para uso como combustível. Foram localizadas áreas de vegetação nativa, com regular desenvolvimento e escolhidas, ao acaso, dez árvores de cada espécie: *Astronium urundeuva* (Aroeira), *Schinopsis brasiliensis* (baraúna), *Aspidosperma pyriforme* (Pereiro), *Capparis flexuosa* (feijão brabo), *Fraunhoferia multiflora* (pau branco), *Dalbergia cearencis* (violeta), *Anadenanthera macrocarpa* (angico manso), *Mimosa tenuiflora* (jurema preta), *Piptadenia zehntneri* (angico brabo), *Pithecellobium parvifolium* (Arapiraca), todas com diâmetro variando de 12 a 20 cm para as análises. Constatou-se que a jurema preta apresentou o valor mais alto de poder calorífico (4150 kcal.kg⁻¹) dentre as espécies estudadas, sendo considerada a mais adequada para a combustão. A que apresentou menor poder calorífico foi a baraúna (3653 kcal.kg⁻¹).

Tabela 2.2: Características energéticas de dez espécies da Caatinga (LIMA et al., 1996)

Espécie arbórea	Peso específico (g/cm³)	Poder Calorífico (cal/g)	Materiais voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)
<i>Mimosa tenuiflora</i>	0,99	4150	65,36	23,64	1,78
<i>Dalbergia cearencis</i>	0,98	3950	71,38	20,47	1,88
<i>Piptadenia zehntneri</i>	0,97	3929	71,72	19,62	1,47
<i>Astronium urundeuva</i>	0,97	3890	67,01	22,12	2,93
<i>Anadenanthera</i>	0,96	3850	64,45	22,31	3,47
<i>Fraunhoferia multiflora</i>	0,89	3971	69,36	19,20	1,68
<i>Schinopsis brasiliensis</i>	0,89	3653	65,76	21,26	3,62
<i>Capparis flexuosa</i>	0,86	3702	69,96	18,87	3,03
<i>Pithecellobium</i>	0,77	3656	72,16	19,48	1,84
<i>Aspidosperma pyriforme</i>	0,68	4062	68,40	19,97	1,49

ALVAREZ et al. (2009) avaliaram o potencial energético por meio do estoque de carbono e biomassa, de algumas espécies arbóreas de uma área conservada de caatinga em Petrolina – PE. O estudo foi realizado em três áreas de 2,64 ha. Foram realizadas a identificação de espécies arbóreas/arbustivas, a mensuração da densidade absoluta (DA.ha⁻¹), da dominância (DoA.ha⁻¹) e do volume (m³.ha⁻¹) por meio da cubagem das espécies e estimou-se o teor de carbono das principais espécies (Tabela 2.3). A jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) apresentou maior DA.ha⁻¹ e foi a espécie de maior DoA.ha⁻¹ e apresentou o maior volume (12,59 m³.ha⁻¹) sendo seguida pelas espécies catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*) com 6,77 m³.ha⁻¹ e pela faveleira (*Cnidoscolus quercifolius*), com 2,96 m³.ha⁻¹. O teor de carbono das principais espécies foi estimado em 1.254 kg.ha⁻¹ e 881 kg.ha⁻¹ para jurema preta

e catingueira, respectivamente. As espécies arbóreas e arbustivas da caatinga, em área preservada, fornecem elevado volume de madeira por hectare, com valor médio de 48,39 m³.ha⁻¹, constituindo-se importante fonte energética no semi-árido.

Tabela 2.3: Espécies arbóreas/arbustivas mais representativas de área conservada de caatinga (ALVARES et al., 2009)

ESPÉCIES VEGETAIS	D*	AB*	V (m³.ha⁻¹)
Mimosa tenuiflora	276,7	3,42	12,59
Caesalpinia pyramidalis	413,3	2,54	6,77
Cnidoculus phyllacanthus	20	0,43	2,96
Sapium scleratum	30	0,48	2,78
Tabebuia spongiosa	76,7	0,59	2,22
Manihot glaziovii	226,7	0,39	1,37
Croton sp	216,7	0,49	1,24
Schinopsis brasiliensis	66,7	0,24	1,21

* D: densidade (plantas.ha⁻¹), AB: área basal (m².ha⁻¹)

Com o objetivo de quantificar e qualificar a biomassa florestal produzida em um sistema florestal nativo sob manejo sustentável em uma área de caatinga arbórea no sul do Piauí, BRAND *et al.* (2009) estabeleceram um plano de manejo em uma área de 78 mil hectares em ciclos de 6 mil hectares por ano, onde o primeiro lote só será manejado depois de 13 anos, permitindo a regeneração natural de toda a caatinga do lote, por tocos, sementes e raízes. A determinação do volume e do peso da biomassa foi realizada através da amostragem aleatória. Após a demarcação das parcelas foi medido o diâmetro de todas as árvores, na base e na altura do peito. Após a derrubada das árvores, a madeira foi processada com comprimento médio de 1 metro para posterior pesagem e montagem da pilha para medição do metro estéreo. Essa metodologia foi realizada uma vez no mês de outubro de 2007, deixando-se no campo o que não se classifica para a produção de carvão, e outra vez no mês de janeiro de 2008, deixando-se no campo somente as folhas e os galhos muito finos. Para a realização das análises energéticas da biomassa, as coletas foram realizadas em três épocas do ano distintas. Foram avaliados discos das toras e galhos retirados logo após a derrubada das árvores, marcados de acordo com as espécies a que pertenciam, armazenados em sacos plásticos e enviados para o laboratório. As análises realizadas foram: teor de umidade, poder

calorífico e teor de cinzas. O potencial médio de biomassa encontrado neste trabalho foi de 106 t.ha^{-1} , sendo que a produção variou de 81 a 150 t.ha^{-1} . Mas, com a inclusão dos galhos na coleta de biomassa, o valor potencial médio passou a 170 t.ha^{-1} , resultando na produção média de $1.020.000 \text{ t/ano}$, considerando uma área de 6.000 ha . Quanto às propriedades físicas e energéticas, o teor de umidade apresentou pouca variação, ficando abaixo dos 30% , valor máximo requerido para a geração de energia, com exceção do mês de chuva que ficou em 39% ; o teor de cinzas teve valor médio igual a $1,52$ e o poder calorífico teve valor médio igual a 3115 kcal/kg .

Para Sampaio e Freitas (2008), a biomassa aérea em áreas de caatinga varia de local para local, variando também no tempo, principalmente em função dos totais e da distribuição das chuvas. As biomassas aéreas vão de 2 a 160 t.ha^{-1} , em função principalmente da disponibilidade de água em cada local. Para a maioria dos locais, estas biomassas podem variar de 30 a 50 t.ha^{-1} .

2.9. Estimativas de Biomassa Utilizando o Sensoriamento Remoto

Muitos estudos têm demonstrado a utilidade dos índices ópticos de dados de sensoriamento remoto na avaliação de variáveis biofísicas da vegetação, tanto para aplicação no estudo de florestas quanto na agricultura (BRANDÃO *et al.*, 2007).

Para verificar um método de mapeamento da fitomassa da Caatinga do Seridó, COSTA *et al.* (2002) utilizaram informações do inventário de fitomassa e do índice de área de planta e o IVDN, por meio das imagens Landsat TM. Dentre os resultados, observaram que 13% da área apresentou entre $0,1$ e 5 t.ha^{-1} , 30% da área entre 5 e 10 t.ha^{-1} e 21% da área entre 10 e 20 t.ha^{-1} e 9% da área com caatinga densa, com mais de 20 t.ha^{-1} .

ACCIOLY *et al.* (2002) avaliaram a relação entre índices de vegetação extraídas do sensor Landsat TM e características estruturais de floresta localizado na Floresta Nacional do Araripe. Tanto a fração de vegetação verde quanto os índices de vegetação e as respostas de bandas individuais, apresentaram correlação positiva e significativa com as estimativas da altura média da parcela, da área basal à altura do peito e da área basal na base. Os valores de coeficientes de correlação variaram entre $0,33$ e $0,60$. Os melhores relacionamentos foram obtidos com o índice de vegetação da razão simples e com o índice estrutural da vegetação para os quais foram estabelecidas as equações de regressão.

BRAGA *et al.* (2009) utilizaram séries temporais de IVDN obtidas em um período de 20 anos com o sensor AVHRR/NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration's) e 5 km x 5 km de resolução espacial para estimar a cobertura vegetal no setor leste de Pernambuco, a partir do ponto longitudinal - 37°. Encontraram-se três regiões com diferentes tipos de vegetação. A Caatinga, com IVDN entre 0,27 e 0,39; o agreste com IVDN entre 0,39 e 0,45 e a mata atlântica com IVDN variando entre 0,45 e 0,54.

BRANDÃO *et al.* (2007) analisaram a influência do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN) para estimar o acúmulo da biomassa na Região de Barbalha (CE) Para estimativa do valor da biomassa acumulada foi utilizado um modelo para radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) para a vegetação verde, e um modelo de eficiência da luz. Para a determinação do balanço de energia e avaliação da evapotranspiração foram utilizados a plataforma de parametrização de fluxos de calor baseada na análise espectral de imagens obtidas por satélites, SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), combinada ao algoritmo CASA (Carnegie Ames Stanford Approach), que calcula a APAR, e que, juntamente com dados de superfície, finaliza a estimativa da biomassa acumulada. Neste trabalho, os resultados apresentaram valores de IVDN de até 0,7911, com média de 0,336 e as áreas de florestas com uma biomassa equivalente variando de 270 a 334 t.ha⁻¹, valores considerados muito elevados.

COLTRI *et al.* (2009) relacionou os índices de vegetação (IVDN, IVF e CO₂flux) de sensoriamento remoto com índices agrícolas (biomassa, altura e IAF) de lavouras de café para encontrar a relação com o estoque de carbono. Foram usados 3 modelos alométricos do café para prever a biomassa acima do solo e comparar com o IVDN, IVF e CO₂flux de imagens Landsat TM e Quickbird. Os resultados sugeriram que o IVDN tem uma relação com a biomassa do cafeeiro, com índice de determinação de $R^2 = 0,62$ e foi melhor relacionado que o IVF e CO₂flux e os dados de IVDN do Quickbird apresentaram mais relação com a biomassa de café do que os dados do Landsat.

Accioly *et al.* (2008) avaliaram a biomassa aérea da caatinga arbustiva e arbórea de duas microrregiões do semi-árido nordestino, onde há ocorrências de processos de desertificação, utilizando o sensoriamento remoto, com cenas do sensor Landsat ETM+, uma de 20 maio de 2000 e outra de 05 abril de 2001. As imagens foram mosaicadas e realçadas utilizando-se o índice de vegetação da diferença normalizada (IDVN). A fitomassa aérea total foi estimada em $4,51 \times 10^7$ toneladas, com média aproximada de 9 t.ha⁻¹, sendo inferior à média de outras regiões. Valores de fitomassa aérea inferiores à 5 t.ha⁻¹ foram associadas à

áreas extremamente degradadas (desertificadas). As áreas mais preservadas de caatinga apresentaram fitomassa aérea superior a 20 t.ha⁻¹.

Na tabela 2.4 é realizado uma comparação entre os valores encontrados de produção de biomassa por sensoriamento remoto, estudo em campo e os valores vistos por Sampaio e Freitas (2008) em sua revisão.

Tabela 2.4: Quantificação da biomassa da caatinga com uso de diferentes metodologias

Autor	Método	Produtividade de Biomassa (t.ha⁻¹)
Brand et al. (2009)	Estudo de campo	106 (170*)
Accioly et al. (2008)	Sensoriamento remoto	5 - 20
Sampaio e Freitas (2008)	Revisão bibliográfica de trabalhos anteriores	30 - 50 (160**)

*Valor encontrado considerando-se os galhos finos **Valor máximo encontrado em áreas de Caatinga

A Caatinga tem grande potencial produtivo. Em 2006, cerca de 42% do bioma, o equivalente a 36.000.000 ha ainda tem grande cobertura florestal. Considerando as áreas destinadas às unidades de conservação, propriedades para reserva legal e de preservação permanente, restam ainda 6,3 milhões de hectares que podem ser sustentavelmente manejados para fins produtivos, que com expectativas modestas de incremento médio anual, tem potencial produtivo de 13,5 milhões de tMS.ano⁻¹ ou 63 milhões de esteres.ano⁻¹, o que equivale a duas vezes a demanda comercial atual (PAREYN, 2007; RIEGELHAUPT, PAREYN 2010).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

As metodologias nos subitens 3.1, 3.2 e 3.3 correspondem aos objetivos 1, 2 e 3, respectivamente, que foram apresentados na introdução.

3.1. Estimativa do potencial energético da biomassa produzida anualmente na região Nordeste do Brasil.

A estimativa foi feita com base no levantamento da produção das principais fontes de biomassa da região nordeste, seguida do cálculo do potencial energético dessas fontes. Mais especificamente, o levantamento foi feito para a biomassa de lenha da caatinga; resíduos agrícolas e urbanos: casca de arroz, resíduos da silvicultura, esterco (bovino, suíno, caprino e avícola), resíduos sólidos urbanos; derivados da cana-de-açúcar (etanol, bagaço e vinhaça) e oleaginosas (amendoim, babaçu, coco-baía, dendê, girassol, mamona, soja)

O levantamento das fontes de biomassa na região Nordeste foi feito utilizando-se como referências as bases de dados de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Os dados do IBGE que foram utilizados são relativos às variáveis de áreas plantadas, quantidade produzida e rendimento médio da produção, com as publicações dos dados municipais de Extração Vegetal e da Silvicultura, Produção Agrícola, Lavouras Temporárias, Censo Agropecuário, e Censo Demográfico, sendo organizados por município e por federação.

Algumas biomassas que apresentam maior viabilidade econômica para o consumo alimentício como a soja e o dendê, também foram estudadas e consideradas neste trabalho, porém é evidente que os valores teóricos de energia serão na realidade inferiores, dado que a maior parte dessas fontes será utilizada para outros fins.

O potencial de geração de energia das fontes de biomassa foi estimado através de cálculos de conversão energética, baseados nos poder calorífico inferior (PCI) e na disponibilidade de cada biomassa, considerando o produto destas duas grandezas (massa x PCI). Os valores de biomassa e energia calculados representam o máximo teórico, considerando o aproveitamento de toda a biomassa disponível, sem perdas, para fins energéticos. Em relação às oleaginosas que geram resíduos, foi considerado também o seu potencial de geração de óleo e a conversão energética deste óleo. As estimativas de geração de energia a partir de óleos vegetais foram feitas com base em dados experimentais de

projetos e publicações recentes (TEIXEIRA, 2002; COELHO et al., 2002; TEIXEIRA, 2003; ANDRADE et al., 2004; DRUMMOND et al., 2006; GAZONNI et al., 2006; KNOTHE et al., 2006; BRASIL, 2007a; BRASIL, 2007b; MENEGHETTI et al., 2007; ARAÚJO, 2008; PARO et al. 2008; SAMPAIO, FREITAS, 2008; WALTER, NOGUEIRA, 2008; DUTRA et al., 2009; BRASIL, 2012).

Lenha da Caatinga

A estimativa da biomassa da lenha da caatinga foi feita utilizando-se os dados do IBGE (IBGE, 2012), censo agropecuário de 2006, para a quantificação da área de mata nativa de caatinga por município. Os dados de área disponível e massa de biomassa por hectare foram estimados utilizando-se os seguintes valores: ciclo de regeneração natural de 100% da Caatinga, 13 anos; produção média de biomassa, 38 t.ha⁻¹ (SAMPALIO, FREITAS, 2008); e poder calorífico inferior - PCI de 3.881 kcal.kg⁻¹ (LIMA *et al.*, 1996). Os dados disponibilizados pelo IBGE já excluem as áreas de preservação permanente. Além disto, nos cálculos de área disponível para o manejo, 20% da área disponível foi separada para as áreas de reserva legal.

Resíduos agrícolas

A quantificação da casca de arroz foi feita considerando que esse resíduo corresponde em média a 30% de toda a produção de arroz nos municípios da região Nordeste, com PCI de 3.384 kcal.kg⁻¹ (COELHO *et al.*, 2008).

Os resíduos da silvicultura foram calculados a partir dos dados do IBGE sobre produção de toras de madeira para a indústria moveleira, que são fornecidos em metros cúbicos para cada município. Em média, o aproveitamento da madeira para a indústria moveleira gera em torno de 50% de resíduos. Os cálculos de biomassa e energia disponível para esses resíduos foram feitos considerando a madeira comercial com uma densidade de 390 kg.m⁻³ e o PCI de 3100 kcal.kg⁻¹ (BRASIL, 2012a).

Para estimar a produção de esterco animais oriundo das criações utilizaram-se os dados do IBGE (2010) e da pesquisa Pecuária Municipal (2003) para quantificação do número de animais. As produções anuais de massa seca de esterco por animal foram estimadas utilizando-se dados da literatura (DUTRA et al., 2009): bovino, 1,56 t; suíno, 0,16 t, caprino, 0,17 t, e aves, 0,008 t. Na estimativa da utilização de esterco considerou-se que para as aves e os suínos todo o esterco produzido poderia ser aproveitado, já que a maior parte das criações ocorre em sistemas intensivos. Para os caprinos e bovinos só foi considerado o

aproveitamento de 50% da produção, uma vez que esses animais são criados no sistema de semiconfinamento (pastoreio durante o dia e confinamento no curral à noite). As perdas de esterco por diversos fatores não foram consideradas, portanto o valor estimado corresponde ao teto máximo para a produção. Para estimar a produção de biogás por categoria de animal foram usados dados de conversão de massa de esterco em volume de biogás, disponíveis na literatura: bovino, $0,04 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; suíno, $0,075 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; caprino, $0,065 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; e aves, $0,1 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (DUTRA *et al.*, 2009). Na estimativa do potencial de energia, foi considerado que o biogás gerado na simulação com os diferentes esterco animais pode ser transformado em energia elétrica pelo fator de conversão de energia $1,67 \text{ kWh.m}^{-3}$ de biogás. (PARO *et al.*, 2008).

Resíduos urbanos

Na quantificação da biomassa de resíduos sólidos urbanos foram utilizados os dados relativos às quantidades de habitantes por municípios disponibilizados pelo IBGE (2012), multiplicadas pelos coeficientes de resíduos coletados por habitante em cada estado, propostos pelo Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2011), expressos em $\text{kg.dia}^{-1}.\text{habitante}^{-1}$: Alagoas, 0,964; Bahia, 1,044; Ceará, 1,092; Maranhão, 0,933; Paraíba, 0,930; Pernambuco, 0,977; Piauí, 0,942; Rio Grande do Norte, 0,943; e Sergipe, 0,9294. Nos cálculos de resíduos disponíveis foi considerada apenas a matéria orgânica, que equivale a 51,4% de todo o resíduo coletado (ABRELPE, 2011). Para a estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos orgânicos foi considerado um poder calorífico de $2431 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (PARO *et al.* 2008).

Cana-de-açúcar e derivados

Os derivados da cana-de-açúcar que tem potencial para uso energético são: etanol, vinhaça e bagaço. Para a estimativa do potencial energético proveniente do bagaço da cana-de-açúcar, foi considerado que 1 tonelada de cana com 50% de umidade gera em torno de 0,28 toneladas de bagaço (BRASIL, 2002) e o poder calorífico deste bagaço, com 50% de umidade, é de $2130 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (WALTER, NOGUEIRA, 2008).

O potencial energético do etanol da cana-de-açúcar foi estimado considerando-se que 50% da produção da cana são destinados à produção de etanol e que cada tonelada de cana gera 85 litros de etanol (BRASIL, 2007b). O poder calorífico inferior considerado foi de $6300 \text{ kcal.kg}^{-1}$, considerando que a densidade do etanol é 809 kg.m^{-3} (BRASIL, 2012).

Para a estimativa do potencial energético da vinhaça considerou-se a produção média de 12 m³ de vinhaça por metro cúbico de álcool produzido, a produção de 14,23 m³ de metano a partir da biodigestão de 1 m³ de vinhaça, e o poder calorífico de 5500 kcal.m⁻³ de metano. Isto resulta em uma energia disponível de 91 kWh.m⁻³ de vinhaça (REGO, 2006; SALOMON, LORA, 2005).

Oleaginosas

A biomassa do amendoim foi obtida considerando-se toda a produção do amendoim nos municípios da região Nordeste. No cálculo de disponibilidade energética, foi considerado que as cascas correspondem a 30% do peso do amendoim e as sementes a 70% do peso, com teor de 50% de óleo (MENEGHETTI *et al.*, 2007). Para a casca do amendoim, considerou-se o PCI de 4.556 kcal.kg⁻¹ e para o óleo de amendoim “in natura” um PCI de 9.502 kcal.kg⁻¹ (KNOTHE *et al.*, 2006).

A estimativa da biomassa do coco babaçu foi obtida somando a produção dos municípios do Nordeste. O PCI das cascas do coco babaçu é de 4300 kcal.kg⁻¹ (TEIXEIRA, 2002). O óleo, produzido a partir das amêndoas, equivale a 7% da massa do babaçu e tem PCI igual a 9049 kcal.kg⁻¹ (TEIXEIRA, 2003).

A estimativa de biomassa para o coco-baía foi feita considerando a massa do coco igual a 2 kg, já que os dados disponibilizados pelo IBGE estão na unidade de 1000 cocos por ano e não distinguem entre o coco anão e o coco da praia, com pesos médios de 1,19 kg e 2,78 kg, respectivamente (GOMES, 1984). A indústria alimentícia aproveita a água de coco e a “carne” ou “copra”, que representam cerca de 22,6% e , 13,5% da massa do coco. A casca, 64% da massa do coco, é geralmente descartada como resíduo. O PCI da casca do coco é de 5447,4 kcal.kg⁻¹ (ANDRADE *et al.*, 2004) e o PCI do óleo da copra “in natura”, que corresponde a 8% do fruto, caso venha a ser usado como combustível, é de 8993 kcal.kg⁻¹ (ARAÚJO, 2008).

A indústria de extração de óleo do dendê tem como produtos e subprodutos o óleo da palma bruto, o óleo e a torta de palmiste, os engaços, as fibras e as cascas do dendê, correspondendo a 20%, 1,5% e 3,5%, 22%, 12% e 5% da massa dos cachos, respectivamente. Os 36% restantes, são formados por efluentes líquidos (FURLAN JÚNIOR, 2006). O óleo de palma “in natura” tem um poder calorífico de 9104 kcal.kg⁻¹ e os engaços, fibras e cascas, têm um poder calorífico de 3940 kcal.kg⁻¹, 2600 kcal.kg⁻¹ e 4401 kcal.kg⁻¹, respectivamente.

Na produção de óleo de girassol, cerca de 60% das sementes são transformados em resíduos (casca e torta). Cada tonelada de grão produz cerca de 400 kg de óleo, 250 kg de

casca e 350 kg de torta. Para o cálculo de disponibilidade de energia, foram considerados o óleo e os resíduos. O poder calorífico inferior do óleo de girassol é $9000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e a massa formada pela torta e as cascas tem PCI de $4000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (GAZZONI et al., 2005).

A produção de mamona é destinada principalmente para a extração do óleo com fins energéticos ou para a indústria química. No processo industrial, cerca de 45% de toda mamona é convertida em óleo de mamona e os outros 55% em torta (SILVA *et al.*, 2010). O poder calorífico do óleo de mamona “in natura” é de $9434,4 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (KNOTHE *et al.*, 2006) e o poder calorífico inferior da torta é de $4500 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (DRUMMOND et al., 2006).

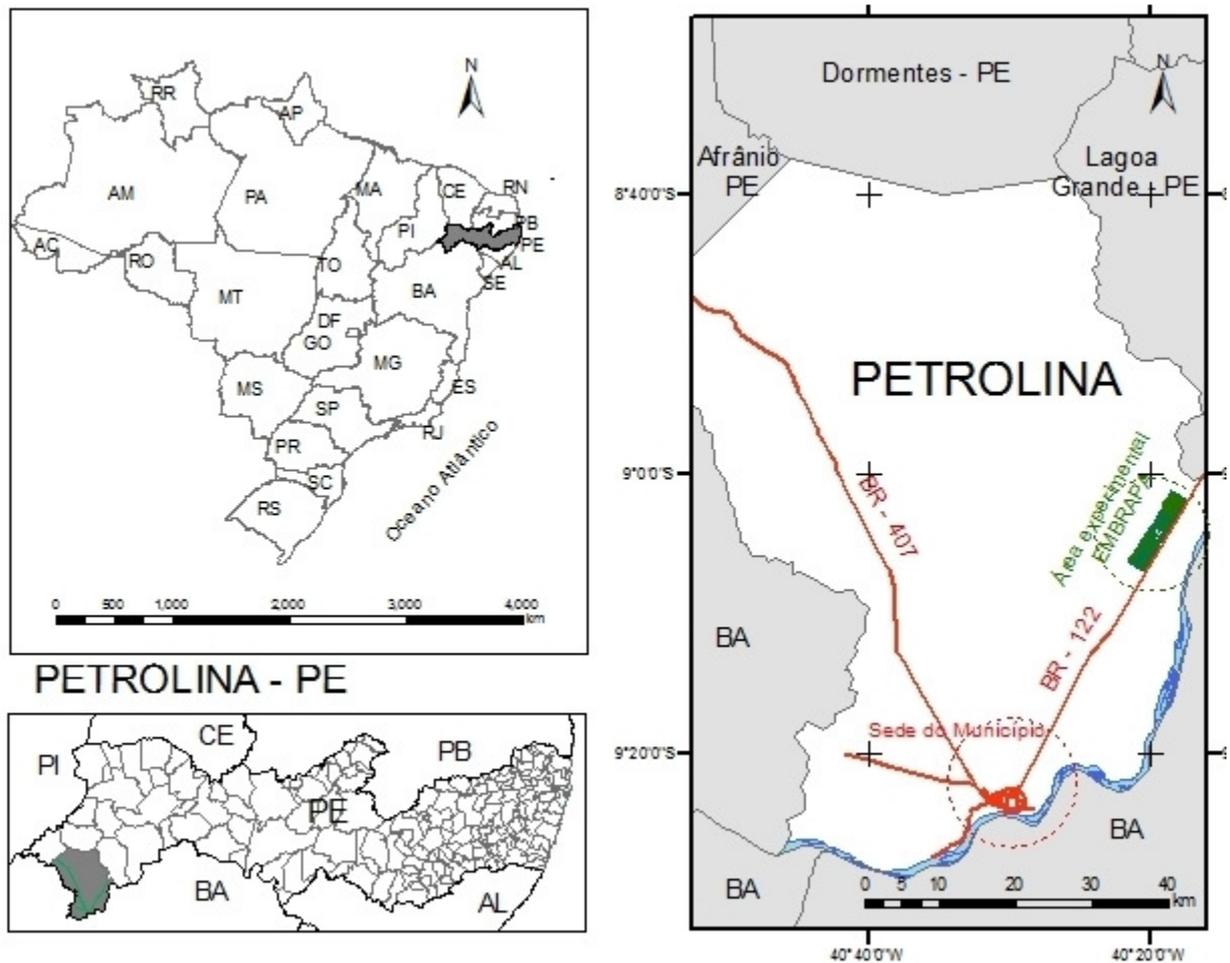
Na produção de óleo de soja, cada tonelada de grão gera cerca de 180 kg de óleo. Para o cálculo de disponibilidade de energia, foram considerados o óleo e a torta. O poder calorífico inferior do óleo de soja é de $9000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e a massa formada pela torta e as cascas tem PCI de $4000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (GAZZONI et al., 2005). Apesar de ter sido calculado o potencial energético da torta do grão da soja, sabe-se que o seu uso como fonte energética é inviável, dada sua importância como alimento humano e ração animal, porém decidiu-se manter a estimativa apenas para ter como referência da ordem de grandeza dessa fonte de biomassa, assim como foi feito para as demais fontes.

3.2. Estimativa de biomassa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação

Caracterização da área de estudo

A área de caatinga estudada está localizada no município de Petrolina, em Pernambuco, situada entre as coordenadas geográficas $9,19^{\circ}\text{S}$ e $9,02^{\circ}\text{S}$ e $40,35^{\circ}\text{W}$ e $40,29^{\circ}\text{W}$. O estudo de campo foi realizado entre julho e setembro de 2012. A precipitação média anual varia em torno de 500 mm, concentrada nos meses de fevereiro, março e abril. A temperatura média mensal é de 26°C , a umidade relativa varia entre 50 e 70%, insolação média é de 2.800 h.ano^{-1} e evaporação em torno de $2.000 \text{ mm.ano}^{-1}$ (Figura 3.1). A vegetação nativa presente na área é de caatinga hiperxerófila, com fisionomia que varia de predominantemente arbustiva a arbustiva/arbórea, relativamente densa e geralmente espinhosa, composta por diversas espécies adaptadas às condições climáticas, predominando as espécies caducifólias.

Figura 3.1: Localização da área de estudo no município de Petrolina, em Pernambuco



Nessa área foram selecionadas 20 parcelas com dimensões de 10x20 m, que apresentassem densidade vegetal variando entre as mais baixas e as mais altas da área de estudo. Isso permitiu incluir uma ampla faixa de valores de biomassa e, supostamente, de IVDN, para garantir que o modelo de regressão linear envolvesse todo o intervalo de valores dessas duas variáveis na área de estudo.

As parcelas foram georeferenciadas, e todas as plantas lenhosas vivas com diâmetro a altura do peito igual ou maior que 3 cm foram identificadas e tiveram sua altura e perímetro à altura do peito (1,3 m do solo) medidos. As medidas de perímetro foram convertidas em diâmetro à altura do peito (DAP). Espécimes da família Cactaceae não foram incluídos na amostragem, pois a estimativa foi feita para determinação da biomassa de lenha da Caatinga.

A quantidade de biomassa aérea seca disponível foi estimada com uso de equações alométricas desenvolvidas por Sampaio e Silva (2005). A biomassa das plantas com DAP entre 3 e 30 cm foi calculada utilizando-se o DAP, conforme a equação 3.1.

$$\text{Biomassa(kg)} = 0,1730 \times \text{DAP}^{2,2950} \quad R^2 = 0,9184 \quad (\text{Equação 3.1})$$

A biomassa das plantas com valor de DAP maior que 30 cm foi calculada com a Equação 3.2, que leva em conta a área a altura do peito (AAP), a altura total da planta (H) e a densidade da madeira (p). Os dados da densidade dessas espécies foram obtidos de Maia (2004).

$$\text{Biomassa(kg)} = 0,1648 \times (\text{AAP} \times \text{H} \times \text{p})^{0,9023} \quad R^2 = 0,9573 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Determinação do Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (IVDN)

Para a estimativa do IVDN foi utilizada a cena (órbita/ponto) 217/66 do sensor LANDSAT 5 TM, com data de passagem de 7 de abril de 2011, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2012). A escolha da data da cena foi feita para coincidir com o período de chuva, época em que ocorre o rebrotamento de folhas da vegetação, pois o IVDN está relacionado com a reflectância da folhagem. Embora para a obtenção do IVDN nem sempre seja necessária a conversão do número digital (ND) em reflectância, neste trabalho essa conversão foi feita para permitir futuras análises multitemporais da evolução da cobertura vegetal na área de estudo. Desta forma, a obtenção do IVDN envolveu as seguintes etapas de pré-processamento: 1) correção geométrica; 2) calibração radiométrica; 3) conversão dos valores de radiância em reflectância normalizada para o topo da atmosfera, também conhecida como reflectância aparente.

No pré-processamento da imagem, a cena foi inicialmente corrigida usando como referência uma imagem ortorretificada do sensor IKONOS, com 1 metro de resolução, a seguir foi ortorretificada com base no Modelo Digital de Elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A projeção utilizada foi a UTM com datum WGS 84 e zona 24S.

A calibração radiométrica foi feita pela conversão do número digital (ND) de cada pixel da imagem original em radiância espectral monocromática, $L_{\lambda i}$ ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), a partir da equação 2.3 (Markham e Baker 1987), onde a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima, ND é a intensidade do pixel, e i corresponde às bandas do Landsat 5 TM. Os coeficientes de calibração a e b utilizados são os propostos por Chander et al. (2007).

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i + a_i}{255} \times ND \quad (\text{Equação 3.3})$$

A reflectância foi obtida a partir da razão entre a integração hemisférica da radiância monocromática e a irradiância (equação 2.4) solar monocromática incidente numa superfície horizontal, onde $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda, $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera, Z é o ângulo zenital solar e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (ALLEN et al., 2002).

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (\text{Equação 3.4})$$

O IVDN foi calculado como a razão entre a diferença de reflectância das bandas do infravermelho próximo e do vermelho e a soma das mesmas (equação 3.5),

$$IVDN = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad (\text{Equação 3.5})$$

onde ρ_{IVP} e ρ_V são as reflectâncias no infravermelho próximo e no vermelho, e correspondem respectivamente às bandas 4 e 3 do Landsat 5 TM (PONZONI, SHIMABUKURO, 2012).

Relação entre estimativa de biomassa por equações alométricas e IVDN

A relação entre o IVDN calculado e a quantidade de biomassa ($t \cdot ha^{-1}$) estimada com equações alométricas foi avaliada pela correlação de Pearson. O modelo de regressão linear foi calculado pelo método dos mínimos quadrados. Em seguida, foram calculados o coeficiente de regressão (R), o coeficiente de determinação (R^2) e realizado o teste F, com os valores da tabela de análise de variância.

O erro da predição, utilizado para prever o erro médio em estimativas futuras, foi calculado pelo método da validação cruzada deixando um de fora, (leave-one-out cross-validation-LOOCV). Este método consiste em, a cada interação criar um modelo com (N-1) dados, considerando N o número total de dados, que neste caso é igual a 20, denominados dados de treinamento (training set), e validar o modelo com o dado que ficou de fora, que é denominado de dado de prova (test set) de forma que, para cada interação, se use um só dado como dado de prova e todos os outros dados são usados como dados de treinamento. Foram realizadas 20 interações, de forma que, para cada uma delas, se calculou o erro E_i . O resultado final foi obtido pela média dos 20 valores de erros obtidos, sendo esta média o erro (E) de predição de valores futuros, de acordo com a Equação 3.6 (ARLOT, CELISSE, 2010; BERGMEIR, BENÍTEZ, 2012).

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (\text{Equação 3.6})$$

3.3. Viabilidade econômica do uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável para geração de energia

Esse estudo foi desenvolvido em 4 etapas: 1) quantificação e distribuição da biomassa na área de estudo; 2) a determinação da energia disponível na área e o levantamento de custos e tributos pagos por cada rota de processamento; 3) análise do fluxo de caixa de cada rota e, 4) análise de sensibilidade.

Quantificação de biomassa de Caatinga

Nesta metodologia foram utilizados os resultados dos estudos desenvolvidos na Metodologia 3.2, no qual analisou a relação existente entre o IVDN, gerado a partir do comportamento espectral de imagens Landsat TM, e a biomassa estimada por meio das equações alométricas, ajustando um modelo de regressão linear, que permita realizar estimativa da biomassa aérea e arbustivas da Caatinga. A partir daí, foi utilizado o modelo linear entre a biomassa medida em campo e os valores de Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (IVDN) para estimar a biomassa de toda a área de estudo, 2600 hectares, aplicando-se esta equação a todos os pixels da imagem com o IVDN, resultando em uma imagem, na qual cada pixel equivale a um valor de biomassa, o que possibilita uma visualização da distribuição espacial da biomassa aérea.

Energia disponível na biomassa

A estimativa da energia disponível por hectare (E_{DH}) foi realizada utilizando-se dados de poder calorífico inferior (PCI) de algumas espécies identificadas e da produção média de biomassa em tMS por hectare ($\text{tMS} \cdot \text{ha}^{-1}$).

O PCI das espécies foi calculado a partir do poder calorífico superior (PCS), medido com bomba calorimétrica a volume constante, modelo C2000 IKA. O PCI é a quantidade de calor total liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível, sem considerar o calor latente de condensação da umidade presente nos produtos de combustão. O PCS difere do PCI por não levar em conta o calor latente de condensação, sendo em torno de 20 a 30% mais elevado (BRAND, 2010).

O PCI (kcal.kg^{-1}) foi calculado utilizando a Equação 3.7, onde H é a porcentagem média de hidrogênio (H) da madeira, que na madeira tem valor médio igual a 6% (BRAND, 2010).

$$PCI = PCS - 600 \times \frac{9 H}{100} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Análise da viabilidade econômica

A avaliação econômica das diferentes rotas de uso da lenha foi feita considerando-se uma área de Caatinga com 2600 hectares, que tenha as mesmas características vegetacionais da área de estudo (Figura 4), que esteja submetida ao manejo florestal sustentável (MFS), e que o tempo de regeneração da vegetação seja igual a 13 anos (SAMPAIO et al., 1998; SAMPAIO, FREITAS, 2008).

Da área total, 20% foram reservados para área de preservação legal, conforme o Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012a). A área restante foi dividida em 13 lotes de 160 hectares, para utilização ao longo de 13 anos, com extração da biomassa de um lote por ano. No 14º ano, o primeiro lote teria supostamente sua capacidade de geração de biomassa restaurada e seria reiniciado o ciclo de extração.

A avaliação da viabilidade econômica foi feita considerando cinco possíveis cenários: 1) produção de lenha para comercialização direta; 2) produção de carvão em fornos tradicionais; 3) produção de carvão em fornos cilíndricos; 4) uso da lenha para geração termelétrica utilizando ciclo a vapor com turbinas de condensação; e 5) uso da lenha para geração termelétrica utilizando ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa. Em todos esses cenários foram incluídos custos com tributos e impostos, com compra da área e plano de MFS e os custos específicos de implantação e manutenção DAE cada rota de uso energético da lenha. A seguir são apresentados os parâmetros para os cálculos de custos e receitas para o aproveitamento energético nessas diferentes rotas.

Tributos e encargos

Os cálculos da análise de viabilidade econômica foram feitos incluindo os seguintes tributos e encargos: a) Contribuição para o financiamento da seguridade social (CONFINS) - alíquota de 7,6%, sobre o faturamento mensal; b) Contribuição para o Programa de integração social (PIS) - alíquota de 1,65% sobre o faturamento mensal; c) Taxa de fiscalização de serviços de energia elétrica (TFSEE) - alíquota de 0,5% sobre a receita; d) Imposto de renda de pessoa jurídica (IRPJ) - alíquota de 25% sobre a receita; e) Contribuição social sobre o

lucro líquido (CSSL) - alíquota de 9%; f) Imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e sobre prestações de serviços de transporte interestadual, intermunicipal e de comunicação (ICMS) - alíquota de 12% (BRASIL, 2007).

Custos com a aquisição da área e implantação de manejo florestal sustentável

Os custos com a compra da área e a implantação do manejo sustentável são considerados para todos os cenários. O preço do hectare de caatinga no segundo semestre de 2012 variou de R\$ 250,00 a R\$ 300,00, isso para área de caatinga em propriedades que estejam afastadas dos centros urbanos, sem benfeitorias, e com características de fisionomia e quantidade de biomassa semelhante da área estudada.

A implantação do manejo sustentável numa área de caatinga requer um investimento inicial que varia de 12 a 18 US\$.ha⁻¹, incluindo-se os custos de formulação e aprovação do plano de manejo e assistência técnica para o seu acompanhamento. Neste trabalho foram considerados o preço do hectare R\$ 250,00 e o custo de 18 US\$.ha⁻¹ para colocar a área em MFS (RIEGELHAUPT; PAREYN, 2010).

Extração de lenha da caatinga

A extração anual da lenha nos lotes de 160 ha, com produção média de lenha igual a 30 t.ha⁻¹ requer investimento inicial de cerca de R\$150.000,00 para a construção de um galpão, a aquisição de um caminhão de pequeno porte e a compra de ferramentas para a retirada da lenha. Além disso, considerou-se um custo anual de produção de R\$ 100.400,00 que inclui os gastos com 3 funcionários.

Produção de lenha para comercialização direta

A avaliação da viabilidade econômica da produção de lenha para comercialização direta incluiu custos com a aquisição da área, implantação do manejo florestal e extração de lenha. O preço médio nacional para comercialização da lenha nativa em 2011 foi de 8,1 US\$.m⁻³ segundo o Relatório Final do Balanço Energético Nacional de 2012, relativo ao ano de 2011 (BRASIL, 2012b), entretanto os valores de lenha praticados atualmente em assentamentos no sertão pernambucano, que possuem plano de MFS, com assistência da Associação de Plantas do Nordeste – APNE variam de R\$ 55,00 a 65,00 (US\$ 27,5 a 32,5). Este custo se refere ao preço da lenha no assentamento, sem os custos com transporte até o consumidor final. A avaliação dessa rota foi feita considerando o valor de venda de uma tonelada de lenha igual a US\$ 27,50.

Produção de carvão

A avaliação da viabilidade econômica da produção de carvão foi feita considerando dois sistemas de produção: o sistema de carbonização tradicional, em fornos tradicionais de alvenaria e argila (rabo quente) e o sistema de carbonização em fornos cilíndricos verticais (Figura 3.2). No sistema tradicional, cada forno tem capacidade para 16 estéreis de lenha para a produção de 8 a 10 m³ de carvão vegetal, num ciclo de até 10 dias, com rendimento gravimétrico na faixa de 25 a 30 %, o que resulta numa produtividade média igual a 2250 kg de carvão em 10 dias. No sistema de fornos cilíndricos podem ser executadas carbonizações em 8 a 10 horas, com rendimento gravimétrico na faixa de 35 a 40% devido à requeima dos gases (SANTOS, 2011).

A análise da viabilidade do sistema tradicional de produção de carvão foi feita considerando que o rendimento gravimétrico foi igual a 25 %, a produtividade mensal de um forno foi igual a 6750 kg de carvão vegetal, o custo da construção de um forno foi igual a R\$ 1.530,00, a manutenção mensal de um forno é igual a R\$ 50,00 (COLOMBO *et al.*, 2006). Assim, considerando a produtividade de lenha da área de estudo, são necessários 15 fornos tradicionais para a conversão da lenha em carvão e 5 funcionários para operar os fornos.

Figura 3.2: Fornos cilíndricos verticais (a) e fornos tradicionais (b) para produção de carvão



A análise do sistema com fornos cilíndricos foi feita considerando que o rendimento gravimétrico é igual a 0,35%, a produtividade mensal de um forno é igual 27 toneladas, o custo de um forno é de R\$ 37.500, com taxa de manutenção de 5% em cima do faturamento anual e ainda despesa com energia de R\$ 5,96 para produção de 1 m³ de carvão (COLOMBO *et al.*, 2006). Assim, para a área de estudo são necessários 6 fornos cilíndricos verticais e 8 funcionários para operação.

O preço da tonelada de carvão vegetal comercializado considerado foi igual a R\$700,00 que é o valor médio dos preços praticados na região em outubro de 2012, de acordo com informações pessoais.

Uso da lenha para geração termelétrica

A análise da viabilidade econômica da geração termelétrica a partir da lenha da caatinga foi feita utilizando duas vias tecnológicas: ciclo a vapor com turbinas de condensação e ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa.

O Plano Nacional de Energia 2030 (BRASIL, 2007) apresenta alguns custos relativos à instalação, transmissão, encargos e impostos que incidem sobre a geração termelétrica a partir da biomassa. Vale ressaltar a dificuldade em conhecer esses valores de forma precisa, uma vez que esses custos variam bastante em função da tecnologia adotada.

Ciclo a vapor com turbinas de condensação

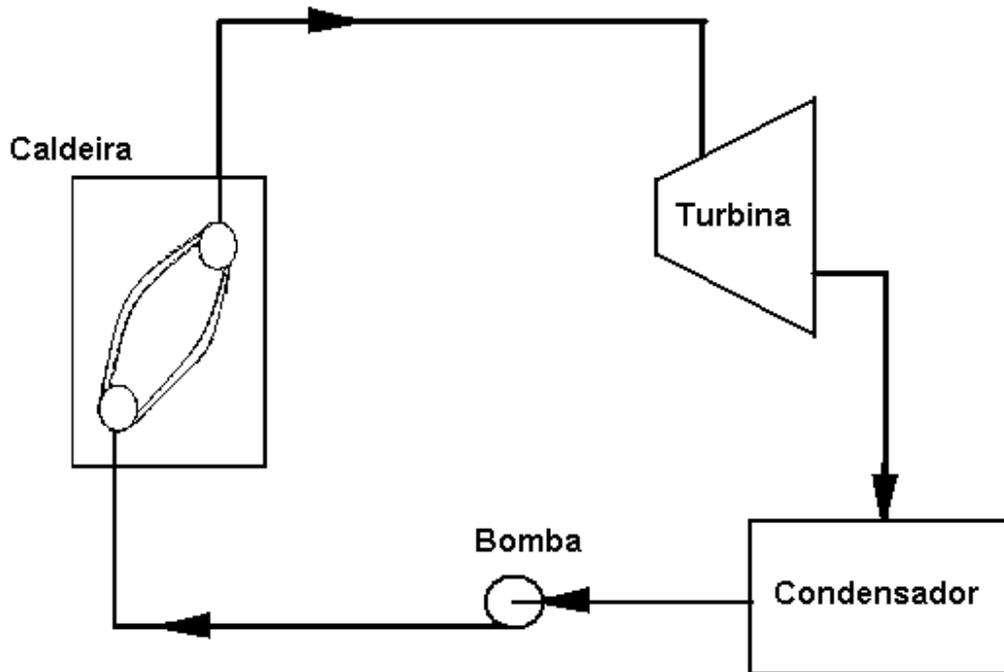
Os ciclos a vapor de condensação têm por princípio o ciclo Rankine, no qual o combustível é queimado em uma caldeira para produzir vapor que, ao se expandir na turbina a vapor produz trabalho mecânico, e após a expansão, o vapor é condensado e retorna para ser bombeado novamente para a caldeira (Figura 3.3).

Considerando que a capacidade de produção de biomassa da área de estudo, foi dimensionada uma usina termelétrica utilizando o ciclo a vapor com turbinas de condensação com capacidade de 1MW, e eficiência de geração termelétrica de 23%. O custo de investimento de um projeto de geração de energia elétrica pode ser decomposto em custo direto e custo indireto. No direto, estão incluídos a aquisição do terreno, a realização das obras civis, a aquisição dos equipamentos, os custos da montagem e a subestação. No indireto, incluem-se os custos com acampamento e a administração. O custo de investimento inicial com instalações e equipamentos considerado como referência neste estudo foi igual a 1100 US\$.kW⁻¹ instalado (BRASIL, 2007a).

Os custos de operação e manutenção (O&M) são classificados em fixos e variáveis. Os custos fixos são aqueles que existem independentemente da quantidade de energia produzida pela termelétrica. Os custos variáveis aumentam à medida que aumenta a produção de energia. No ciclo a vapor com turbinas de condensação, foram considerados para os custos fixos de O&M um valor referencial médio de 40 US\$.kW⁻¹.ano⁻¹ e para os custos variáveis, 4,3 US\$.MWh⁻¹ (AZOLA *et al.*, 1999; MAZZONE, HAYASHI, 1997; BAIN *et al.*, 2003; LARSON *et al.*, 2001). Outro custo variável considerado foi com tarifas de uso do sistema de

transmissão (TUST). A avaliação econômica foi feita considerando o custo da TUST igual a $2,50 \text{ US}\$.\text{MWh}^{-1}$ (TOLMASQUIM, 2005)

Figura 3.3: Diagrama simplificado do ciclo a vapor com turbinas de condensação (ciclo Rankine)



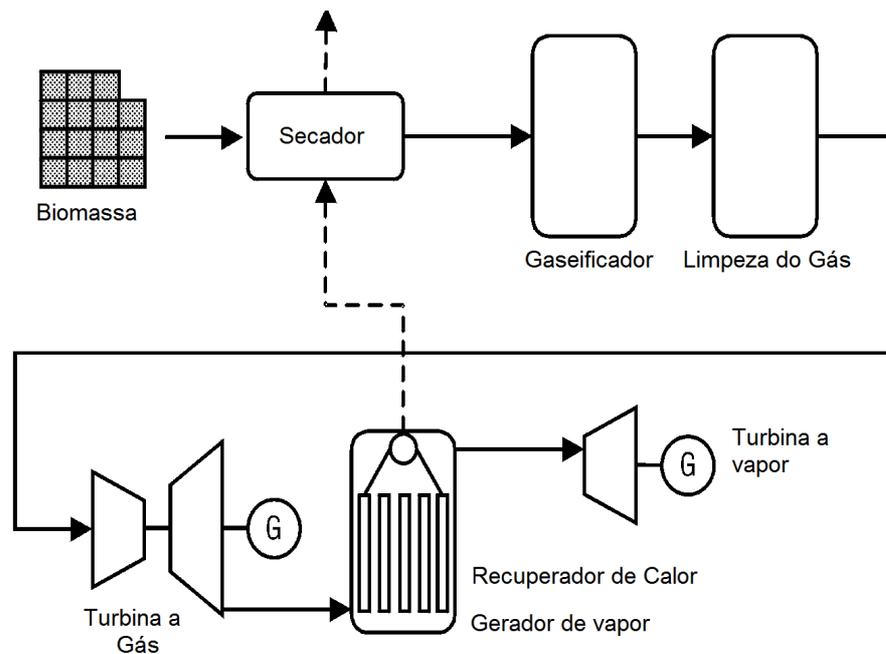
.Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa

Os elementos básicos de uma usina de energia que utilizam o ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa incluem um secador de biomassa (idealmente alimentado por calor), um gaseificador para converter a biomassa em um gás combustível, um sistema de limpeza de gás, uma turbina a gás, alimentada pelo gás derivado da biomassa, um recuperador de calor gerador de vapor, para gerar vapor a partir dos gases quentes de escape da turbina a gás, e uma turbina a vapor que aproveita a energia térmica dos gases de exaustão da turbina a gás para gerar vapor a média/alta pressão e utilizá-lo em uma turbina a vapor, elevando a potência e a eficiência global do ciclo (Figura 3.4) (LARSON et al., 2001).

A tecnologia que integra um sistema de gaseificação de biomassa a um ciclo combinado de geração termelétrica apresenta eficiência de geração termelétrica entre 36% e 45% (BAIN *et al.*, 2003). Considerando a eficiência de 36% e a disponibilidade energética de biomassa da área de estudo, é possível acionar uma usina de 1,5 MW. Isto representa um investimento inicial de R\$ 4.500.000,00. Os custos fixos de O&M são $55 \text{ US}\$.\text{ano}^{-1}$ por kilowatt instalado e os custos variáveis de O&M ficam em torno de $6 \times 10^{-3} \text{ US}\$.\text{kWh}^{-1}$ gerados. Foi

considerada a mesma tarifa de uso de transmissão do ciclo a vapor com turbinas de condensação (Brasil, 2007; BAIN et al, 2003).

Figura 3.4: Diagrama simplificado da geração de energia através do Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa



Adaptado de Larson et al., (2001).

O último leilão de energia elétrica (A5/2011) contemplou dois projetos de geração termelétrica a partir da biomassa, com preço médio de 103,06 R\$.MWh⁻¹. Este foi considerado como o valor de venda de referência da energia gerada pela termelétrica hipotética do estudo. Esse é o preço inicial a ser praticado, como o contrato terá vigência de vinte anos e levando em conta que preço futuro da energia elétrica possui grande variabilidade, a correção do valor pago por MWh gerado será corrigido pelo Índice de Preço ao Consumidor Amplo - IPCA.

A taxa de crescimento anual é estabelecida em contrato e geralmente é utilizado o Índice de Preço ao Consumidor Amplo - IPCA como referência. A taxa utilizada, de 5,45%, equivale ao acumulado entre outubro de 2011 e outubro de 2012. Este mesmo índice foi utilizado para correção anual do valor fixado pelo leilão de energia.

Análise econômica

Valor presente líquido (VPL)

O VPL é o somatório dos valores presentes dos fluxos estimados de uma aplicação, calculados a partir de uma taxa de juros apropriada e seu período de duração (Equação 3.8). Os fluxos estimados podem ser positivos ou negativos, de acordo com as entradas ou saídas de caixa. A taxa mínima de atratividade – TMA fornecida à função representa o rendimento esperado do projeto. Caso ele seja positivo, o valor obtido no projeto pagará o investimento inicial, o que o torna viável.

$$VPL = CF_0 + \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (\text{Equação 3.8})$$

Onde,

VPL = Valor Presente Líquido

CF₀ = Investimento Inicial

FC = Fluxo de Caixa do Período

i = TMA

j = Tempo

Período de recuperação de investimento (PRI)

O PRI, também conhecido como “pay-back”, representa o tempo necessário para recuperar o investimento realizado (CLEMENTE, 2002). Esse indicador é medido em anos, indicando o tempo de retorno do investimento;

Taxa mínima de atratividade (TMA)

A TMA representa o custo de oportunidade do projeto, ou seja, a taxa de juros que deixa de ser obtida na melhor aplicação alternativa quando há emprego de capital próprio (KUHLEN, BAUER, 2001.). A TMA para esta análise foi considerada sobre 100% do CDI de Novembro de 2012 (9,14% ao ano), mais um cupom de 3% ao ano, totalizando uma taxa de 12,14% ao ano. Essa é a taxa de retorno para o capital próprio exigida por um investidor como prêmio/risco ao investir seu capital em determinado ativo.

Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR é uma taxa de desconto hipotética que quando aplicada a um fluxo de caixa faz com que os valores das despesas, trazidos ao valor presente, sejam iguais aos valores dos retornos dos investimentos, também trazidos ao valor presente. Quando comparada com a TMA, a TIR é um importante parâmetro para indicar a viabilidade de um projeto, se o valor da TIR for maior que o da TMA significa que o investimento é economicamente viável, se for

menor, não é atrativo economicamente. Para o cálculo destes parâmetros é necessário calcular os valores de fluxo de caixa operacional ao longo dos 20 anos futuros, que foi o tempo de vida útil para um projeto deste porte. Para encontrar o valor da Taxa Interna de Retorno, se calcula a taxa que satisfaz a Equação 3.9 (SOUZA, CLEMENTE, 2000).

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0 \quad (\text{Equação 3.9})$$

Onde

FC_t= valor presente das entradas de caixa;

I₀ = investimento inicial;

TIR = taxa de interna de retorno

t = tempo de desconto de cada entrada de caixa;

n = tempo de desconto do último fluxo de caixa.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi feita por meio de simulações,, nas quais os parâmetros mais importantes de cada rota foram submetidos a variação de -50% e +50% do valor-base, para verificar a influência desses parâmetros na variação dos resultados e nos indicadores de viabilidade, permitindo traçar diversos cenários na análise da viabilidade econômica, verificando a viabilidade do projeto em face às alterações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados nos subitens 4.1, 4.2 e 4.3 correspondem aos objetivos 1, 2 e 3, respectivamente, que foram apresentados na introdução.

4.1. Estimativa do potencial energético da biomassa produzida anualmente na região Nordeste do Brasil.

As fontes que apresentaram maior produção anual de biomassa foram vinhaça, esterco bovino, bagaço de cana-de-açúcar, lenha da caatinga e resíduos sólidos urbanos (Figura 4.1). Entretanto, após os cálculos da disponibilidade energética, as fontes que apresentaram maior potencial energético foram bagaço de cana, lenha da caatinga, resíduos sólidos urbanos, etanol e coco-baía. (Figura 4.2).

Figura 4.1: Disponibilidade anual de fontes de biomassa para produção de energia no Nordeste do Brasil em milhões de toneladas

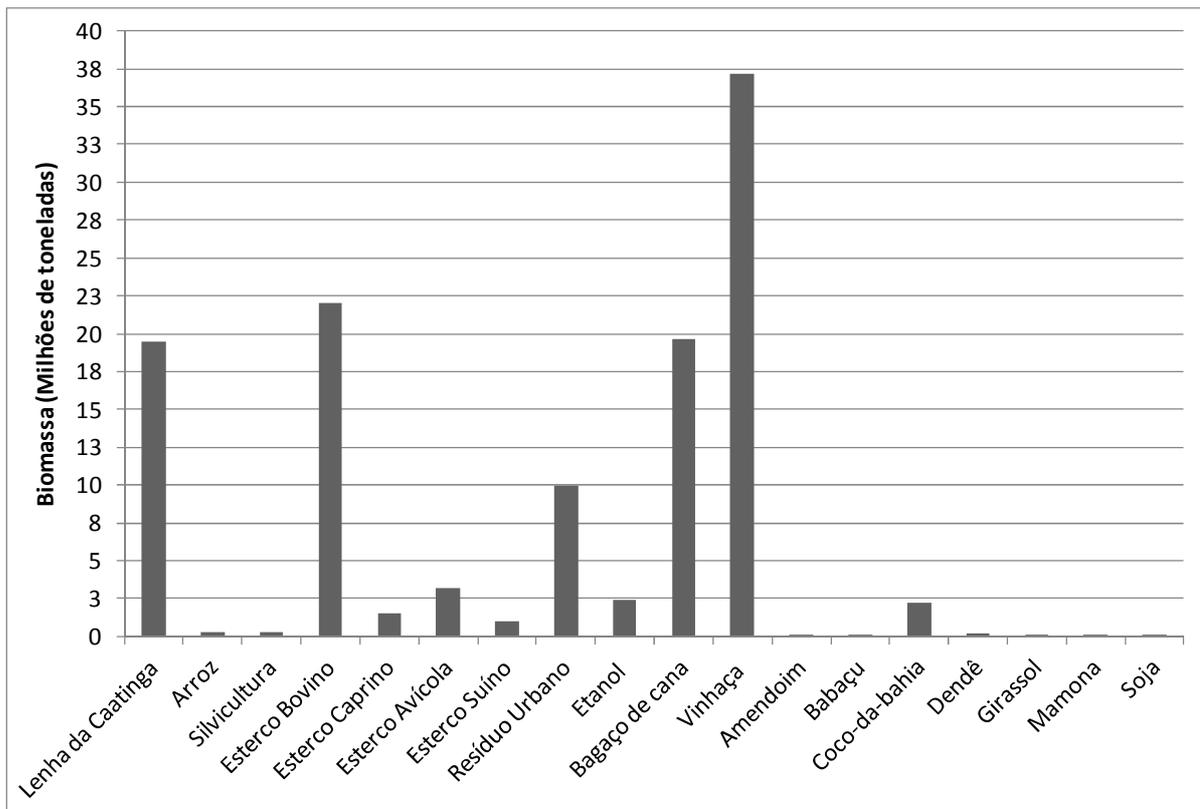
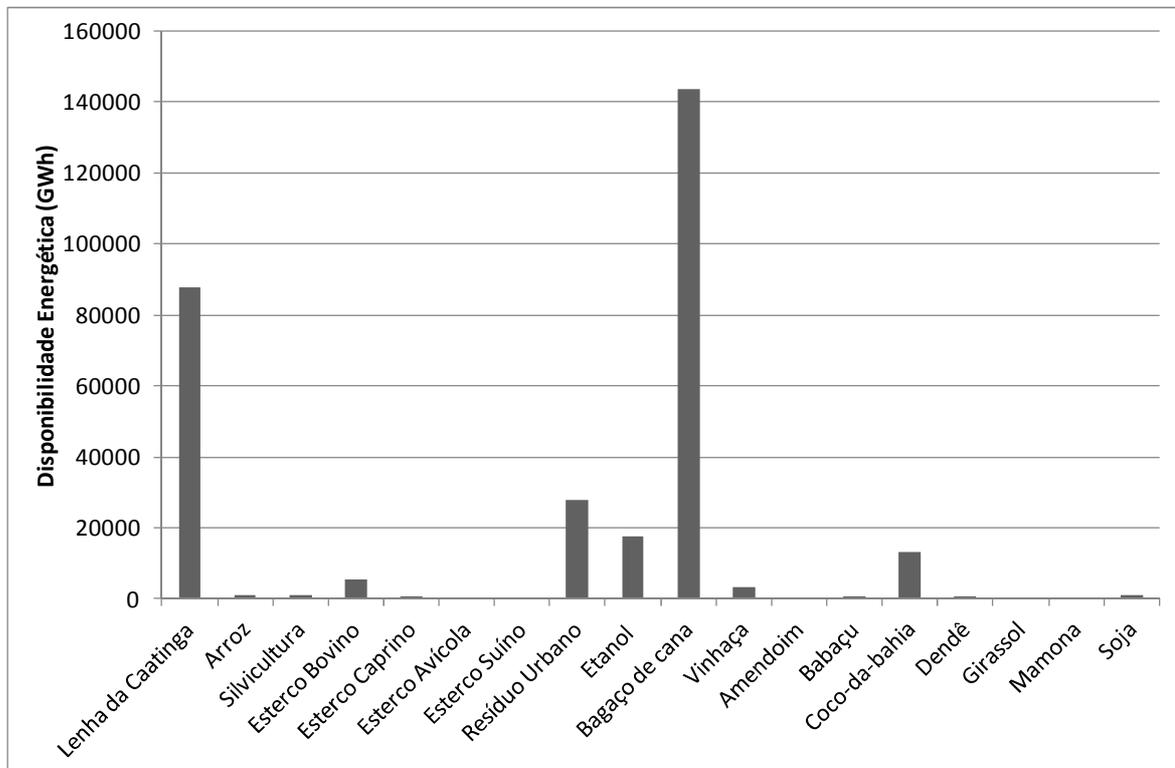


Figura 4.2: Disponibilidade energética anual de fontes de biomassa para produção de energia no Nordeste do Brasil em GWh



A cana de açúcar é produzida em todos os estados, mas a disponibilidade de bagaço de cana e etanol são maiores em Alagoas e em Pernambuco, seguidos por Paraíba, Bahia e Rio Grande de Norte, nos municípios localizados mais próximos ao litoral. A lenha da Caatinga está presente em maior abundância na Bahia, Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, devido à área de caatinga dos estados e na proporção de municípios incluído nessa vegetação. A disponibilidade de RSU é maior na Bahia, Ceará, Maranhão e Pernambuco devido à densidade demográfica. O potencial da biomassa do coco-baía é maior nos litorais dos estados da Bahia, Ceará, Pernambuco e Sergipe (Tabelas 4.1 e 4.2) (APÊNDICE).

As fontes de biomassa selecionadas, se utilizadas em sua totalidade para fins energéticos, somariam cerca de 119,5 milhões de toneladas, salientando-se que os valores indicados são valores potenciais extremos, supondo-se o aproveitamento de toda a biomassa disponível.

O aproveitamento potencial das principais fontes de biomassa seria através de processos de combustão direta (lenha, coco-baía, resíduos sólidos urbanos, bagaço e etanol) ou por biodigestão (vinhaça e esterco). Essa observação é particularmente importante, pois

destaca a relevância potencial dos processos de biodigestão na região Nordeste. Em contrapartida, não há na região a capacidade instalada de infraestrutura e pessoal para operar os biodigestores e sistemas de conversão. Essa deficiência intensifica-se se for levado em conta que os resíduos, se depositados em aterros sanitários, também seriam submetidos à biodigestão e produziram biogás, aumentando, portanto, a geração de energia.

A disponibilidade espacial das biomassas são semelhantes aos encontrados em “O Panorama do potencial de biomassa no Brasil” (COELHO et al., 2002) e o “Atlas de bioenergia do Brasil” (COELHO et al., 2008). Em ambos, para a Região Nordeste, foram apresentados os estudos de quantificação e potencial da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar, da casca de arroz, da casca da castanha de caju, da casca do coco e dos resíduos da silvicultura, para toda a região e do óleo de palma, apenas na Bahia. Se fosse aplicada a mesma metodologia de cálculo destes trabalhos, que considerou a eficiência termelétrica e o tempo de operação, os resultados seriam de mesma ordem de grandeza, entretanto difeririam por não terem utilizado o mesmo ano da base do IBGE.

O potencial de geração energética de algumas fontes merece ser discutido em detalhes, como, por exemplo, o da lenha da caatinga sob manejo sustentável. A geração de energia elétrica por usinas térmicas convencionais, ou seja, com o uso de combustíveis fósseis, na Região Nordeste foi de 7.265 GWh em 2010 (BRASIL, 2012a), que corresponde a apenas 1/3 da energia elétrica que poderia ser produzida anualmente utilizando-se lenha da Caatinga sob manejo florestal sustentável em usina termelétrica com 25% de eficiência, que seria de 21.934 GWh.ano⁻¹. Os estudos indicam que o potencial energético anual do bagaço de cana é 12.146 GWh. Se cerca de 60% de todo bagaço da cana-de-açúcar fosse destinado a termelétricas com eficiência de 25%, essa biomassa seria suficiente para acionar todas as termelétricas que usam combustível fóssil da Região Nordeste, tornando a matriz energética totalmente acionada por fontes renováveis.

Além de abastecer os fornos do comércio e a da indústria do interior do Nordeste de forma sustentável, a lenha da caatinga poderá vir a ser usada também como combustíveis em termelétricas. Para isso, são necessárias pesquisas direcionadas para o desenvolvimento de tecnologias que possam melhorar a eficiência de conversão energética, ou ainda incentivos governamentais para a redução de impostos que incidem sobre estes tipos de sistemas de geração. Além de aumentar a oferta de energia ao sistema elétrico, a energia produzida através de biomassa de manejo florestal sustentável, que é uma fonte limpa e renovável, seria uma forma de desenvolvimento social local. Pois a instalação de termelétricas a lenha na região semiárida poderia gerar empregos e renda diversas áreas da região, trazendo benefícios

socioeconômicos potencialmente significativos. O impacto potencial dessa alternativa poderia ser ainda maior se for considerada a possibilidade da co-geração nas termelétricas, o que aumentaria o aproveitamento da lenha como fonte energética. Sendo assim, seria importante aprofundar os estudos sobre a viabilidade desse processo de conversão energética.

A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos merece uma discussão específica, tendo em vista a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida na Lei 12.305/2012 e regulamentada no Decreto 7.404/2010 (BRASIL, 2012). De acordo com essa nova legislação, a partir de 2014, os lixões e aterros controlados não serão mais permitidos e todos os rejeitos deverão ser destinados a aterros sanitários. Porém, nos aterros sanitários, só poderão ser depositados resíduos sem qualquer possibilidade de reuso, reaproveitamento ou reciclagem. Dessa forma, a biomassa residual, inclusive a fração orgânica, deverá necessariamente ser processada através de compostagem ou aproveitamento energético. O processamento através da compostagem pode ser limitado pelas grandes quantidades de biomassa disponíveis, o que iria demandar grandes áreas para os pátios de compostagem, além de grandes quantidades de água e energia para a irrigação e movimentação das leiras de composto durante o processo de decomposição (que pode demorar meses). Sendo assim, provavelmente, o aproveitamento energético da fração de biomassa dos RSU será um processo que terá grande demanda em curto prazo. A região carece da infraestrutura e de pessoal qualificado para operar os sistemas na escala que será requerida, ou seja, essa é uma lacuna que deve ser considerada pelos setores competentes.

Nas potencialidades locais, merece destaque a biomassa do babaçu, do coco-baía e do dendê. O coco babaçu comtem alta produção no Maranhão (Figura 4.3) (TEIXEIRA, 2003), região carente de combustível para a produção de ferro gusa. Parte significativa da produção de aço no Brasil ainda é produzida com biomassa a partir de florestas energéticas ou também de desmatamento ilegais de florestas nativas. Sendo assim, o aproveitamento da biomassa residual do babaçu poderia ser uma importante fonte de biomassa sustentavelmente produzida para a indústria do ferro gusa.

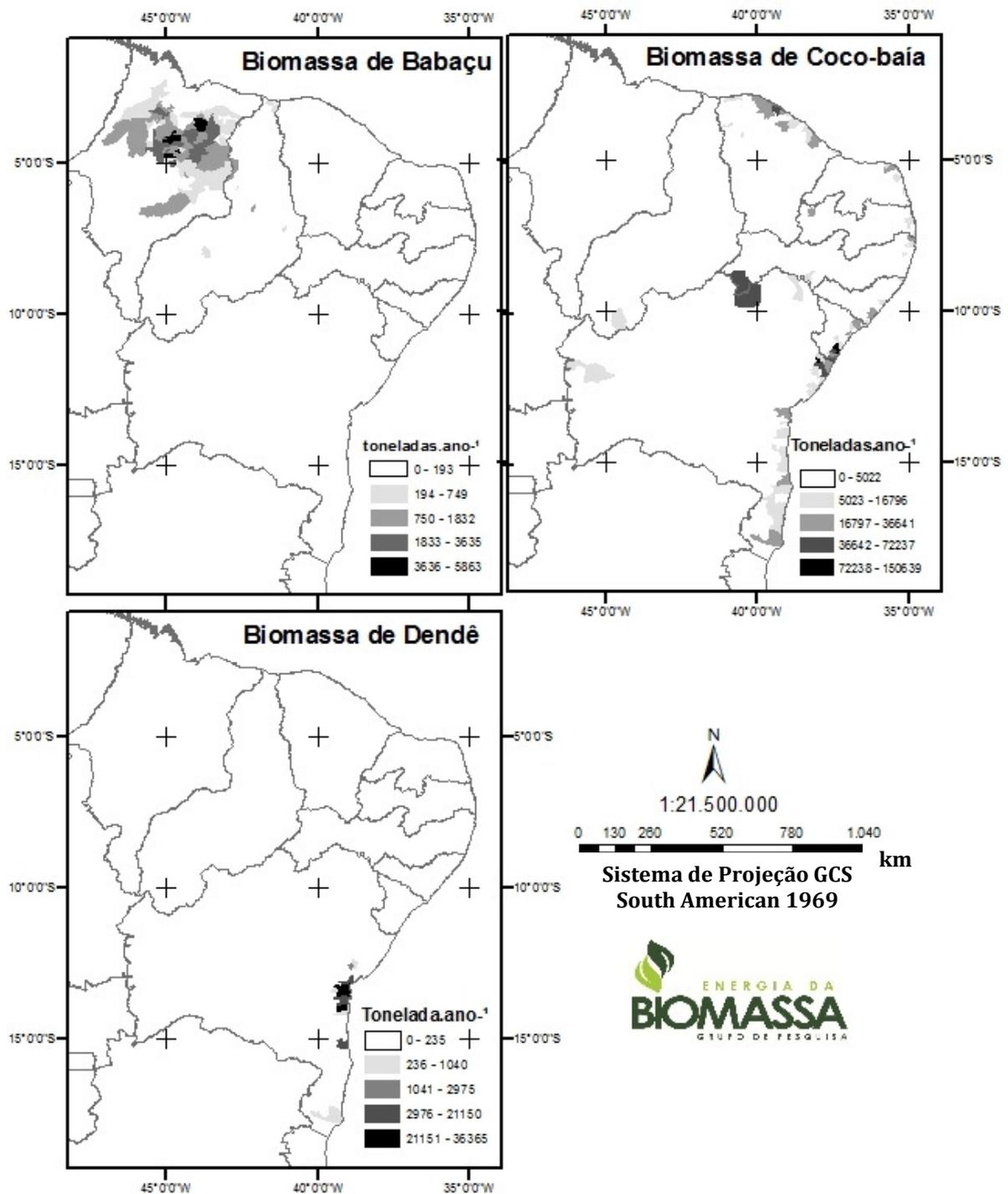
A biomassa do coco-baía é abundante nos litorais do Ceará, Bahia e Sergipe e nos perímetros irrigados no Vale do São Francisco (Figura 4.3). Alguns estudos têm destacado a qualidade da biomassa do coco para a produção de carvão (VALE *et al.*, 2004), o que poderia agregar valor a essa biomassa, que geralmente tem alto teor de água o que encareceria seu transporte. Ceará e da Bahia produzem juntos mais de 9 milhões de toneladas desta biomassa, que poderiam gerar cerca de 1.774 GWh de energia para calor, vapor ou termelétricidade, mas não são usadas.

A biomassa do dendê é abundante no Sudeste da Bahia (Figura 4.3). Apesar do destaque dentre as fontes oleaginosas, a produtividade anual do dendê no Sul da Bahia é baixa (4 t.ha^{-1} de cachos), comparada às áreas de cultivo de dendê no Pará (15 t.ha^{-1} de cachos) e outros locais na região norte do país (MENEZES et al., 2011). Atualmente, o óleo de dendê no Brasil é utilizado primordialmente para fins alimentícios, mas as demais frações dos cachos são subaproveitadas do ponto de vista energético. Melhorias tecnológicas nos sistemas de cultivo do dendê no sul da Bahia ou até aumentos na área cultivada se houver incentivos para a produção de óleo poderiam aumentar ainda mais a disponibilidade dessa fonte na região Nordeste.

Algumas biomassas estudadas apresentam grandes potenciais e ainda são subaproveitadas para a geração de energia. Um exemplo é a vinhaça, que é gerada em grande escala. Talvez por motivos como a falta de incentivos, desenvolvimento de tecnologia e capacitação, ainda não está sendo utilizada em grandes escalas. O uso energético da vinhaça também tem importância ecológica, pois seu descarte no ambiente pode resultar em contaminação.

As principais oleaginosas selecionadas neste estudo apresentam menor contribuição para produção de energia. Em primeiro lugar, devido à pequena produção de biomassa em relação ao total de biomassa na região. Em segundo porque a destinação prioritária da maioria das oleaginosas é a alimentação humana, uma vez que os preços dos grãos são muito superiores ao preço pago pelo mercado de biodiesel, que seria o processo de aproveitamento energético dos óleos vegetais. No caso da mamona, que não produz óleo comestível, a sua produtividade na região semi-árida é muito limitada, apesar dos incentivos governamentais nos últimos 10 anos para essa cultura como uma fonte potencial de óleo para biodiesel, sua adaptação ao Nordeste em condições de sequeiro foi inadequada, de forma que a área efetivamente plantada e a produção de biomassa é relativamente pequena, com pouca perspectiva de aumento em curto e médio prazo. Uma parte do óleo de soja já é destinada para o biodiesel, pois é a única oleaginosa que tem preço competitivo para esse fim, uma vez que o óleo é um resíduo da produção de ração animal (MENEZES et al., 2010).

Figura 4.3: Disponibilidade energética anual de fontes de biomassa para produção de energia no Nordeste do Brasil em GWh



No caso do esterco, podem ser considerados dois destinos possíveis para a geração de energia. O primeiro seria a geração em grandes propriedades, em que a tecnologia e os custos para instalação de biodigestores e aproveitamento energético do biogás são viáveis e já amplamente utilizados em outras regiões do Brasil. Entretanto, ainda há necessidade de

incentivos adicionais para viabilizar a implantação dos sistemas, como por exemplo a regulamentação para a venda da energia excedente na rede. O segundo destino seria a biodigestão em pequenas propriedades. Para ela, ainda são necessários investimentos no desenvolvimento de biodigestores de pequena escala, com custo e tecnologia viáveis, e ações de capacitação para facilitar a adoção pelos agricultores.

Tabela 4.1: Potencial de produção anual das diferentes fontes de biomassa, por estado, em milhares de toneladas.

	AL	BA	CE	MA	PB	PE	PI	RN	SE	TOTAL
Lenha da Caatinga	133	5.677	3.383	271	1.455	1.564	5.626	1.209	125	19.442
Arroz	3	10	19	177	0	5	34	2	15	265
Silvicultura	0	211	8	36	-	7	24	1	3	291
Esterco Bovino	931	7.980	1.946	5.371	959	1.792	1.312	896	874	22.060
Esterco Caprinos	22	493	262	53	91	266	236	83	15	1.520
Esterco Aves	116	764	641	232	181	844	160	157	137	3.231
Esterco Suinos	24	281	186	221	23	24	154	31	16	958
Resíduos Urbanos	568	2.761	1.748	1.163	661	1.625	555	566	364	10.012
Etanol	922	159	80	97	217	669	30	146	90	2.409
Bagaço de cana	7.505	1.296	651	791	1.765	5.445	241	1.193	730	19.616
Vinhaça	14.217	2.456	1.233	1.498	3.343	10.314	456	2.260	1.383	37.158
Amendoim	12	-	-	-	-	-	-	-	-	12
Babaçu	-	0	0	103	-	-	5	-	-	109
Coco-da-baía	89	779	433	12	106	217	29	102	466	2.232
Dendê	-	206	-	-	-	-	-	-	-	206
Girassol	-	2	1	-	-	-	-	1	-	4
Mamona	-	67	8	-	0	2	1	0	-	79
Soja	4	21	3	70	-	-	44	-	-	142
TOTAL	24.208	21.327	9.858	9.637	8.474	21.798	8.734	6.390	4.036	114.463

Tabela 4.2: Potencial energético anual das diferentes fontes de biomassa, por estado, em gigawatthora.

	AL	BA	CE	MA	PB	PE	PI	RN	SE	TOTAL
Lenha da Caatinga	600	25.618	15.266	1.222	6.567	7.056	25.388	5.458	565	87.740
Arroz	12	34	65	599	0	18	114	5	49	897
Silvicultura	2	762	30	130	-	24	85	5	10	1.047
Esterco Bovino	238	2.041	498	1.374	245	458	336	229	224	5.643
Esterco Caprino	9	205	109	22	38	110	98	34	6	632
Esterco Avícola	7	49	41	15	12	54	10	10	9	207
Esterco Suíno	11	135	89	106	11	11	74	15	8	459
Resíduos Urbanos	1.587	7.706	4.877	3.246	1.846	4.535	1.549	1.579	1.016	27.941
Etanol	6.752	1.166	585	712	1.588	4.899	217	1.073	657	17.649
Bagaço de cana	54.990	9.499	4.768	5.795	12.930	39.893	1.763	8.740	5.349	143.725
Vinhaça	1.244	215	108	131	293	902	40	198	121	3.251
Amendoim	45	28	4	0	3	0	0	-	8	90
Babaçu	-	2	2	554	-	-	28	-	-	585
Coco-baía	519	4.562	2.534	67	623	1.268	167	596	2.727	13.063
Dendê	-	769	-	-	-	-	-	-	-	769
Girassol	-	13	9	-	-	-	-	9	-	31
Mamona	-	330	39	-	1	12	6	0	-	389
Soja	27	149	19	487	-	-	305	-	-	988
TOTAL	66.042	53.283	29.043	14.460	24.156	59.242	30.181	17.950	10.748	305.106

4.2. Estimativa de biomassa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação

A densidade média das plantas foi de 780 indivíduos por hectare (ind.ha^{-1}), apresentando variação de 150 a 1900 ind.ha^{-1} (Tabela 4.3). O valor médio de densidade foi semelhante ao relatado por Ferraz (2011), que encontrou 781 ind.h^{-1} em uma área de caatinga com vegetação arbustivo-arbórea, em pousio há 22 anos, após retirada total da vegetação, em Floresta, PE.

Entretanto, foi inferior aos de estudos feitos no Seridó-RN, que encontraram 3.247 ind.ha^{-1} (AMORIM *et al.*, 2005), em Areia-PB, 2.780 ind.ha^{-1} (PEREIRA *et al.*, 2003) e em Rodal *et al.* (2008), apresentando densidades entre 1876 e 2172 ind.h^{-1} , em duas áreas de caatinga arbustivo-arbóreas em Floresta, PE. Nestes estudos foram incluídos na amostragem indivíduos mortos em pé e também a família Cactaceae, mas os valores referentes a estes não foram altos.

A espécie que apresentou maior densidade foi a *Caesalpinia pyramidalis* (catingueira), seguidas por *Croton sonderianus* (marmeleiro), *Manihot pseudoglaziovii* (maniçoba) e *Mimosa tenuiflora* (jurema preta). Esta última apresentou maior índice de valor de importância (IVI), e maior biomassa, 10,11 t.ha^{-1} (Tabela 4.4).

Os valores de biomassa da área de estudo estimados pelas equações alométricas variaram de 5,93 a 60,74 t.ha^{-1} (Tabela 4.3). As quantidades estimadas de biomassa por hectare foram inferiores aos valores de 270 a 334 t.ha^{-1} estimados por Brandão *et al.* (2007) para a vegetação em Barbalha, Cear. Por outro lado, foram superiores aos valores de 2 a 45 t.ha^{-1} , encontrados por Costa *et al.* (2009), e 20 a 25 t.ha^{-1} encontrados por Amorim *et al.* (2005), em estudos realizados na vegetação de Seridó, Rio Grande do Norte, região considerada como de baixa biomassa.

Nas 20 parcelas foram amostrados 312 espécies vegetais com DAP maior ou igual a 3 cm, pertencentes a 16 espécies e a seis famílias (Tabela 4.4). As famílias com maior número de espécie foram Fabaceae e Euphorbiaceae, ambas com seis espécies, sendo as outras quatro famílias representadas por apenas uma espécie cada. Estes resultados corroboram a revisão de Sampaio (2002) que verificou que as famílias Fabaceae, Euphorbiaceae e Cactaceae apresentavam o maior número de espécies, em áreas de caatinga arbustivo-árboreas do nordeste. As únicas espécies vegetais que

apresentaram DAP superior a 30 cm foram *Amburana cearensis*, com densidade da madeira de $0,43 \text{ g.cm}^{-3}$ e *Jatropha phyllacanta*, com densidade da madeira de $0,55 \text{ g.cm}^{-3}$ (MAIA, 2004).

Tabela 4.3: Identificação, localização e parâmetros fitossociológicos das parcelas de caatinga em Petrolina, PE

Parcelas	Coordenadas	Densidade (plantas.ha ⁻¹)	Area basal (m ² .ha ⁻¹)	H * (m)	Biomassa (t.ha ⁻¹)	Número de Espécies
1	9,081°S 40,320°W	700	7,76	4,21	36,91	8
2	9,069°S 40,312°W	1450	7,33	3,92	33,07	9
3	9,080°S 40,320°W	1000	9,7	4,25	41,37	7
4	9,032°S 40,314°W	650	8,22	3,96	38,89	4
5	9,079°S 40,320°W	700	9,32	4,61	47,44	7
6	9,032°S 40,315°W	250	8,62	5,4	43,31	2
7	9,080°S 40,319°W	450	11,1	4,44	39,40	5
8	9,080°S 40,321°W	1300	12,2	4,31	60,74	5
9	9,079°S 40,320°W	600	11	4,5	36,62	4
10	9,057°S 40,329°W	850	7,29	4,32	33,78	5
11	9,070°S 40,313°W	1750	10,7	4,44	48,88	9
12	9,069°S 40,313°W	1900	11,9	4,44	57,45	6
13	9,070°S 40,312°W	650	7,42	4,42	34,40	3
14	9,058°S 40,329°W	550	3,81	4,11	16,90	3
15	9,079°S 40,342°W	250	5,62	4	25,46	2
16	9,081°S 40,320°W	1000	5,67	3,49	18,39	4
17	9,058°S 40,328°W	200	1,92	4,38	8,63	2
18	9,079°S 40,320°W	250	12,1	5,1	26,67	3
19	9,033°S 40,315°W	150	1,24	4,43	5,93	2
20	9,081°S 40,321°W	950	4,01	3,69	17,18	3

* H = altura média das plantas

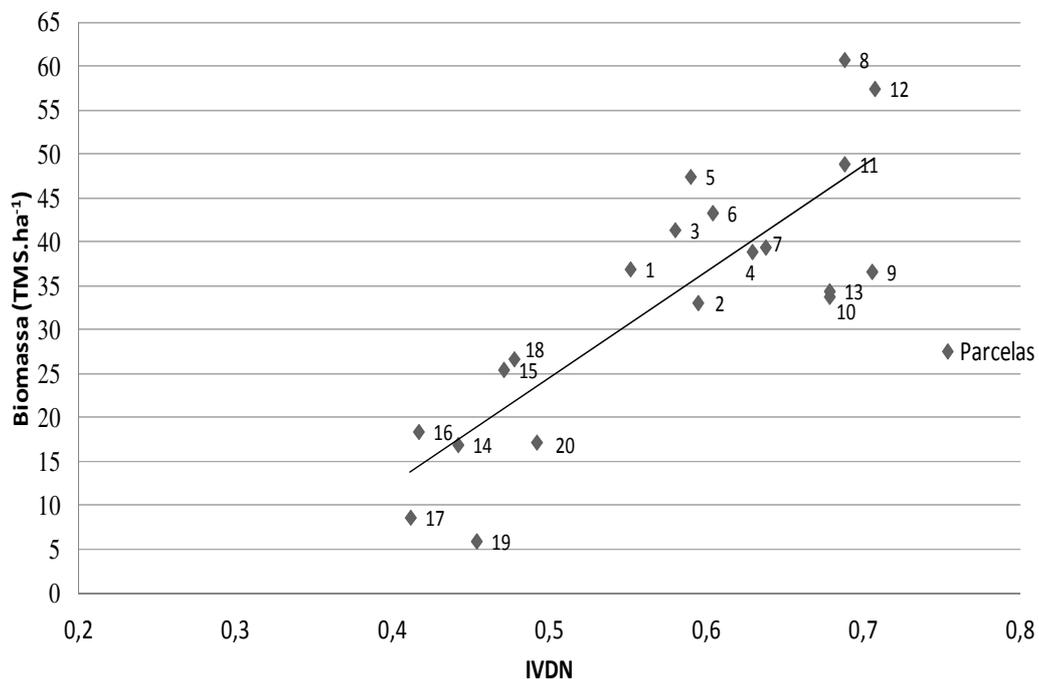
Tabela 4.4: Famílias, espécies, nome popular e parâmetros fitossociológicos e índice de valor de importância (IVI) de espécies arbustivo-arbóreas nas parcelas da caatinga em Petrolina - PE

Família	Nome botânico	Nome popular	D*	AB*	H*	Biomassa (t.ha⁻¹)	IVI
Leguminosae	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul.	catingueira	157,50	1,010	3,72	4,49	15,39
Euphorbiaceae	<i>Croton sonderianus</i> Muell. Arg.	marmeleiro	125,00	0,702	4,12	3,43	10,83
Euphorbiaceae	<i>Manihot pseudoglaziovii</i> Pax & K.Hoffm	maniçoba	120,00	0,383	4,03	1,55	12,31
Leguminosae	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	jurema preta	117,50	1,978	4,54	10,11	20,07
Euphorbiaceae	<i>Cnidoscolus phyllacanthus</i> Mull. Arg. Pax k. Hoffm	favela	80,00	1,459	4,64	6,64	15,57
Apocynaceae	<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart	pereiro	47,50	0,302	4,66	1,32	4,67
Anacardiaceae	<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl	barauna	32,50	0,494	5,62	2,60	4,99
Bignoniaceae	<i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S. Grose	casculo	30,00	0,210	4,13	1,00	3,92
Euphorbiaceae	<i>Sapium lanceolatum</i> Huber	burra leiteira	20,00	0,198	4,56	0,92	2,23
Leguminosae	<i>Amburana cearensis</i> (Allem) A.C Smith	umburana	20,00	1,011	4,75	3,02	4,38
Leguminosae	<i>Bauhinia cheilantha</i> Bong. Steud	mororo	10,00	0,031	3,13	0,12	0,92
Leguminosae	<i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke	jurema branca	7,50	0,030	4,00	0,12	1,92
Euphorbiaceae	<i>Croton conduplicatus</i> Humb., Bonpl. & Kunth subesp	quebra-faca	5,00	0,021	3,25	0,09	0,96
Leguminosae	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan var. <i>cebil</i>	angico	2,5	0,012	5,00	0,05	0,49
Euphorbiaceae	<i>Jatropha mollissima</i> Auta	pinhão	2,5	0,002	3,00	0,01	0,86
Bombacaceae	<i>Pseudobombax marginatum</i> (A. St.-Hil., Juss. & Cambess.) <i>A. Robyns</i>	umburuçu	2,5	0,005	3,00	0,02	0,48

* **D:** densidade (plantas.ha⁻¹), **AB:** área basal (m².ha⁻¹), **H:** altura média das plantas (m) e **IVI** =índice de valor de importância

Os valores de IVDN relacionados à vegetação variaram entre 0,4161 e 0,7067, apresentando-se positivamente correlacionados com os valores de biomassa estimados pelas equações alométricas, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,84 e $p < 0,01$ (Figura 4.4).

Figura 4.4: Correlação entre quantidade de biomassa arbustiva-arbórea aérea, em toneladas de matéria seca (TMS), e o índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN).



A regressão linear entre IVDN e a biomassa, calculada com uso de equações alométricas, feita com o método dos mínimos quadrados resultou na Equação 4.1 com coeficiente de determinação $R^2 = 0,70$ e desvio padrão de $8,43 \text{ tMS.ha}^{-1}$.

$$\text{Biomassa (t.ha}^{-1}\text{)} = 121,29 \text{ IVDN} - 36,08$$

Equação 4.1

O erro de predição na estimativa da biomassa, obtido do pelo método da validação cruzada (LOOCV), foi igual a 31%, considerado satisfatório para um método indireto e para esse tipo vegetacional, que apresenta uma distribuição espacial muito heterogênea (VIANA *et al.*, 2009). Os parâmetros da regressão são semelhantes aos de Viana *et al.* (2009), que

quantificou, por um método direto, a biomassa vegetal aérea de plantas arbustivas lenhosas na região de Viseu, Portugal, chegando a um índice de determinação $R^2=0,7$ e erro de estimativa de 31%, com o IVDN variando entre 0,25 e 0,43 e a biomassa lenhosa local variando entre 1 e 32 tMS.ha⁻¹.

O coeficiente de correlação de Pearson, $R=0,84$, é superior ao da relação entre IVDN e biomassa em Seridó (RN) encontrado por COSTA *et al.* (2002), $R=0,72$, que através da estimativa de biomassa pelo IVDN obteve uma fitomassa aérea total estimada de $4,51 \times 10^7$ tMS, com média aproximada de 9 tMS.ha⁻¹, em parcelas em estado avançado de degradação, valor inferior ao da área de caatinga em Petrolina do presente estudo (Figura 2.1).

Os valores de IVDN, biomassa e o índice de determinação entre estas duas grandezas são inferiores aos que Brandão *et al.*, (2007) estimou para vegetação em Barbalha (CE), pelo método da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e pelo modelo de eficiência da luz. Para esta região, a faixa de IVDN foi até 0,8, com média de 0,34, e a biomassa estimada para vegetação em Barbalha variou entre 270 a 334 t.ha⁻¹. O coeficiente de determinação entre biomassa e IVDN foi igual a 0,74 para a relação nas áreas de vegetação rala, e igual a 0,9 nas áreas de vegetação densa.

Estas diferenças entre os valores de biomassa e IVDN em diferentes locais da caatinga - Petrolina (Figura 2.1), Seridó (COSTA *et al.*, 2002), e Barbalha (BRANDÃO *et al.*, 2007) – são relativos, provavelmente, às características edafoclimáticas prevalentes nesses locais e também aos níveis de antropização de cada localidade.

O modelo de predição da biomassa da caatinga desenvolvido no presente estudo a partir da biomassa estimada com uso de equações alométricas e com uso do índice de vegetação pela diferença normalizada (IVDN) permitiu estimativas de biomassa, de forma não destrutiva, sobre áreas extensas com rapidez com um erro-padrão de 8,93 t e valor médio de erro absoluto de 31%. O erro de predição encontrado pode ser decorrente do grau de precisão da aplicação das equações alométricas utilizadas no presente estudo, $R^2=0,92$ (SAMPAIO; SILVA, 2005), associado aos erros originados durante a medição das árvores amostrais e de coletas de dados feitas em diferentes ocasiões por equipes distintas.

O erro de predição pode ser atribuído ainda aos procedimentos de sensoriamento remoto, que também incluem graus variáveis de imprecisão. Os erros podem ser devidos às transmitâncias entre folhas e também podem estar relacionados à dispensa de plantas com DAP inferior a 3 cm, já que o IVDN considera toda a área com cobertura vegetal.

De acordo com QI *et al.* (1994), quando o ruído é limitado a menos de 30% no domínio de reflectância, as propriedades ópticas podem variar até 15%, e levar a erro na estimativa de parâmetros vegetacionais de até 40%.

Nas imagens de IVDN os principais tipos de ruído se devem a fatores atmosféricos, fatores relacionados ao solo e dossel e fatores relacionados ao sensor. Os ruídos na atmosfera são ocasionados pela contaminação da imagem por nuvens e pela presença de gases e aerossóis. O ozônio e o vapor d'água são os principais absorvedores da radiação no visível e no infravermelho, sendo que o ozônio produz aumento nos valores de IVDN, e o vapor d'água sua diminuição (JUSTICE *et al.*, 1991). A cor e umidade do solo influenciam o IVDN de forma irregular devido ao aumento de absorção da radiação na faixa do infravermelho próximo. Solos mais escuros tendem a aumentar o valor de IVDN (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2011). Entretanto, a ocorrência de áreas com solo nu ou com galhos e necromassa misturados à vegetação verde desviam o IVDN em direção a valores negativos (BITENCOURT, 1997). Aspectos relacionados ao sensor, como a ocorrência de problemas técnicos ou a resolução espacial, tem influência direta sobre a obtenção da imagem de IVDN. No caso do sensor LANDSAT TM, que tem uma resolução espacial de 30 metros, a composição do pixel ou pureza espectral é afetada, pois pixels com esta resolução incluem maior número de elementos da cobertura superficial com naturezas espectrais diferentes (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2011; LIU, 2007).

O aumento na precisão da estimativa pode ser obtido com algumas estratégias, como o desenvolvimento de estudos de previsão de biomassa utilizando imagens de satélites com maior resolução espacial, como por exemplo o sensor IKONOS, com resolução de 1 metro, que apesar de não serem distribuídas gratuitamente como o LANDSAT-TM, podem ser utilizadas para aumentar o grau de precisão. Outra opção é o uso de outros índices de vegetação para o desenvolvimento de modelos de regressão estatística com menores graus de incerteza, como por exemplo, o índice de vegetação ajustado para o solo (IVAS) (HUETE, 1988), que minimiza os efeitos do solo no resultado final do índice, ou ainda o índice de vegetação resistente à atmosfera (KAUFMAN, TAURÉ, 1993) que pode reduzir a dependência do IVDN às condições atmosféricas.

O desenvolvimento e aprimoramento desses modelos podem ser de grande importância na estimativa da biomassa para áreas de caatinga, pois permite a modelagem da distribuição espacial dessa biomassa em áreas de interesse, como por exemplo, estudos de

viabilidade de manejo florestal sustentável, constituindo um suporte para estimação de produtividade primária líquida.

4.3. Viabilidade econômica do uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável para geração de energia.

A biomassa na área de caatinga apresentou variação na distribuição espacial, com uns locais que apresentaram baixa densidade de biomassa e outros com alta densidade, com valores máximos de até 53 tMS.ha⁻¹ (Figura 4.5).

A biomassa aérea média, quantificada com uso do modelo matemático (Equação 4.1), foi igual a 33,7 tMS.ha⁻¹, com desvio padrão de 11,16 tMS.ha⁻¹, e a biomassa modal de 39 tMS.ha⁻¹, com os valores entre 1 e 52 tMS.ha⁻¹ (Figura 4.5). Na área de estudo ocorrem com maior frequência áreas com biomassa entre 30 e 45 tMS (Figura 4.6a) e 54% das áreas apresentam biomassa superior a 32 tMS por hectare (Figura 4.6b). Os 10% de áreas com biomassa de até 5 tMS.ha⁻¹ equivalem ao pixels localizados próximos à estrada e aos pixels correspondentes às áreas abertas para cultivos experimentais (Figura 4.6).

Estes valores de produção de biomassa corroboram os indicados por Sampaio e Freitas (2008) que verificaram que na maioria das áreas de caatinga, a biomassa aérea varia de 30 a 50 t.ha⁻¹. Entretanto, no bioma Caatinga há locais com valores em média mais altos e locais com valores médios mais baixos que os da área estudada. O valor médio de biomassa aérea da área estudada foi menor que o encontrado por Brand et al. (2009), que apresentou valor médio de biomassa aérea igual a 106 t.ha⁻¹ e também que o encontrado por Brandão et al. (2007), numa área de caatinga no Ceará, com biomassa variando de 270 a 334 ton.ha⁻¹, esses valores são altos para o bioma, mas justificados pelas características edafoclimáticas locais. Por outro lado, a quantidade estimada de biomassa por hectare foi superior aos valores encontrados por Costa e colaboradores (2009), que quantificaram a biomassa aérea em duas microrregiões do semiárido do Rio Grande do Norte, onde o valor médio de biomassa foi cerca de 9 t.ha⁻¹.

Figura 4.5: Estoques de biomassa numa área de caatinga (ton.ha⁻¹) estimados com uso do IVDN.

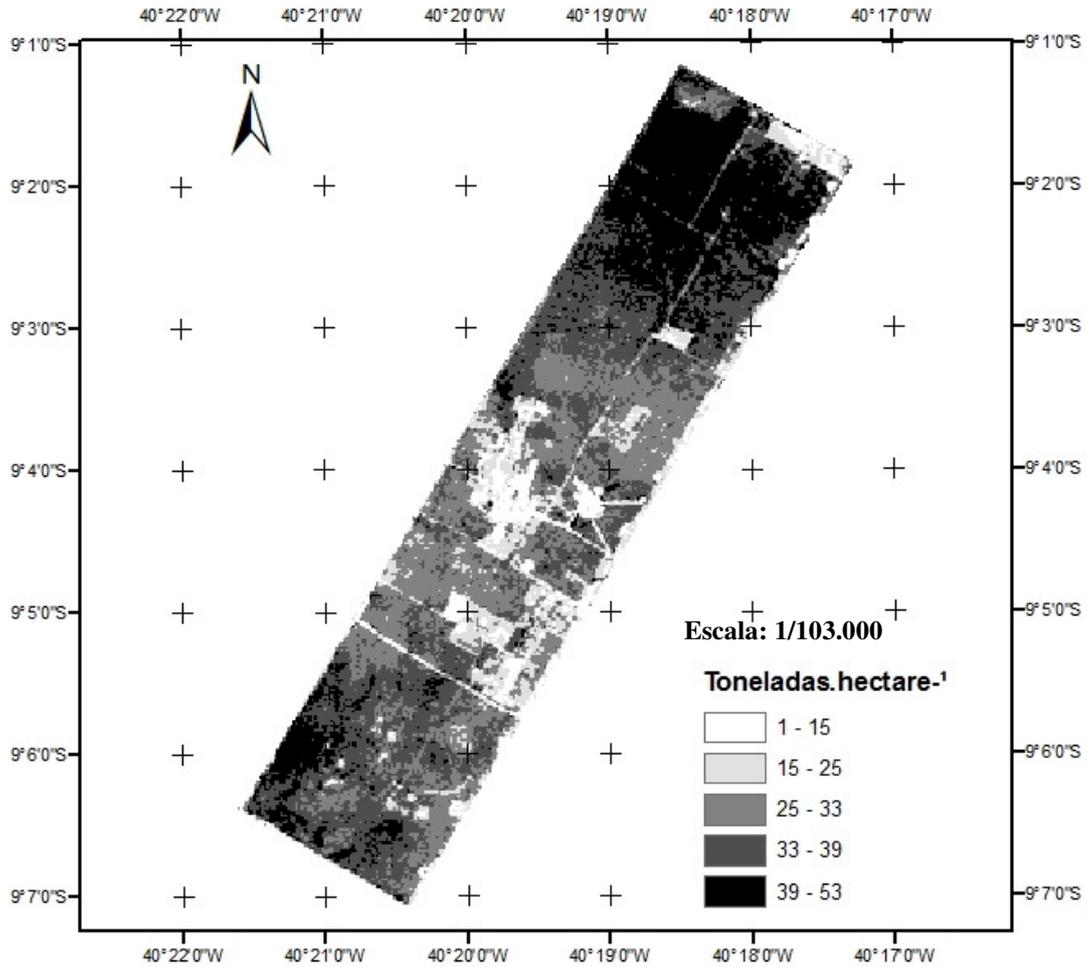
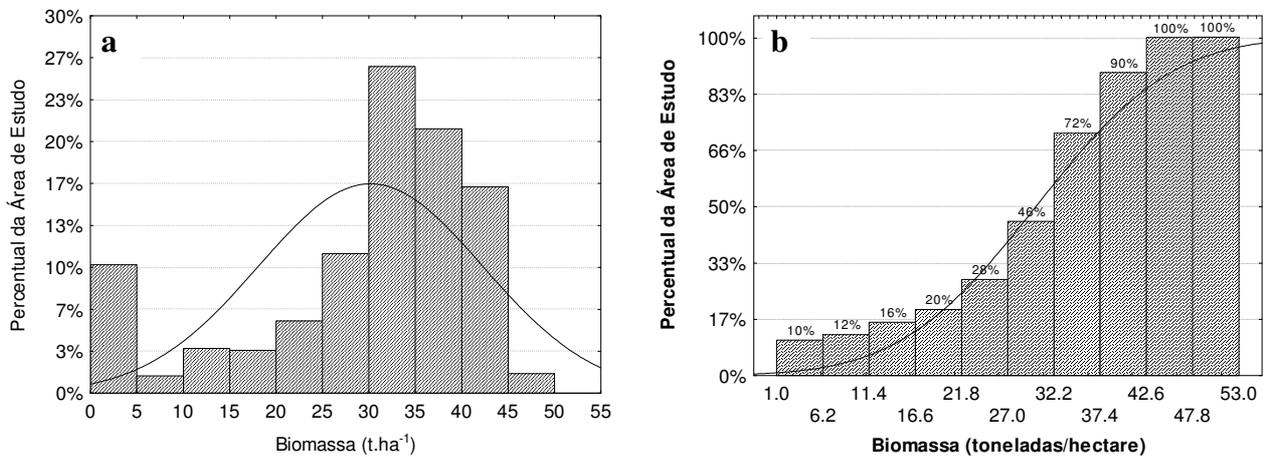


Figura 4.6: Distribuições de frequência simples (a) e acumulada (b) da quantidade de biomassa estimada com uso do IVDN.



A quantificação final da lenha da biomassa foi feita considerando que cerca de 10% da biomassa aérea da caatinga é formada por folhas e galhos finos, com menos de 1 cm de diâmetro (SILVA; SAMPAIO, 2008), resultando que na área de estudo o estoque de lenha médio de 30 tMS.ha⁻¹.

O poder calorífico inferior (PCI) da lenha das sete espécies vegetais mais frequentes nas parcelas analisadas variou de 3648 a 4327 kcal.kg⁻¹, valores que correspondem à maniçoba e à jurema preta, respectivamente (Tabela 4.5). Estes valores são semelhantes aos encontrados por Lima et al. (1996) numa avaliação sobre as características físico-mecânicas e energéticas de plantas da caatinga. A jurema preta apresenta alta densidade e dominância com maior valor de biomassa/ha na área de estudo, sendo um forte indicativo do valor energético da vegetação local. Para simplificação dos cálculos de conversão energética da biomassa, foi considerado o poder calorífico inferior de 3910 kcal.kg⁻¹, média dos valores encontrados na área de estudo.

As espécies vegetais da Caatinga apresentam elevado PCI, com destaque para a *Mimosa tenuiflora* com PCI igual a 4327 kcal/kg, e a *Amburana cearensis* com PCI igual 4132 kcal/kg, valores bem mais elevados que a lenha de eucalipto, que tem PCI igual a 3100 kcal/kg (BEN, 2012).

Tabela 4.5: Espécies de plantas da área de estudo e poder calorífico superior e inferior (kcal/kg)

Nome Popular	Nome Botânico	PCS ¹ (kcal/kg)	PCI ² (kcal/kg)
Jurema Preta	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	4651	4327
Umburana	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	4456	4132
Catingueira	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul.	4190	3866
Burra Leiteira	<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	4079	3755
Baráúna	<i>Schinopsis glabra</i> ou <i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl.	4070	3746
Maniçoba	<i>Manihot pseudoglaziovii</i> Pax & K.Hoffm	3972	3648

¹PCS – poder calorífico superior; ²PCI – poder calorífico inferior.

Os valores anuais de receitas, impostos, tributos, manutenção e outras taxas levantadas para os cinco cenários de uso energético da biomassa da caatinga, considerando que o dólar americano cotado em 2,00 R\$/US\$ em outubro de 2012. Os custos iniciais para a implantação das rotas de processamento como a aquisição de terra, implantação do manejo

florestal sustentável e equipamentos e estrutura para extração de lenha estão incluídos não só na rota de produção de lenha como também nas rotas de geração de energia e produção de carvão (Tabela 4.6).

O custo inicial para a extração de lenha de uma área de caatinga de 2600 hectares, com 30 t.ha⁻¹ de biomassa, sob manejo florestal ficou em torno de R\$ 893.600,00 (Tabela 3.2). Caso a lenha seja destinada para a produção de carvão este custo pode variar entre 0,9 e 1,1 milhões de reais, dependendo do tipo de forno que será utilizado. Entretanto, se a lenha for usada para a produção de energia em termelétricas, os custos totais poderão chegar a R\$5.393.600,00 com a instalação do ciclo combinado a gaseificação.

O lucro líquido da exploração energética da lenha, calculado considerando a incidência dos tributos e encargos sobre a receita bruta, variou de 70 a 470 mil reais dependendo da rota de conversão energética, que corresponde a um lucro de 26 a 180 R\$.ha⁻¹ (Tabela 4.7). O lucro líquido da produção de lenha tem os menores valores e os cenários que incluem a produção de carvão apresentam os maiores valores (Tabela 4.7). A produção de carvão pelas duas rotas tecnológicas avaliadas apresentaram os maiores valores de lucro líquido (300 a 470 mil reais), isto porque são processos com alto rendimento gravimétrico, custos iniciais relativamente baixos e produto final valorizado.

Tabela 4.6: Custos com investimento inicial para exploração energética da lenha da caatinga nas rotas energéticas analisadas

Investimento	Rotas Produção de Lenha (R\$)	Geração de Energia (R\$)		Produção de Carvão (R\$)	
		Ciclo a vapor condensado	Ciclo combinado a gaseificação	Fornos Tradicionais	Fornos Cilíndricos
Aquisição da terra	650.000,00	650.000,00	650.000,00	650.000,00	650.000,00
Implantação de MFS¹	93.600,00	93.600,00	93.600,00	93.600,00	93.600,00
Extração de lenha	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00	150.000,00
Instalação e equipamentos.	—	2.200.000,00	4.500.000,00	22.950,00	225.000,00
Inicial total	893.600,00	3.093.600,00	5.393.600,00	916.550,00	1.118.600,00

¹MFS – manejo florestal sustentável.

O lucro líquido da geração de energia pelos processos termelétricos variou entre 200 e 400 mil reais (Tabela 4.7), valores intermediários entre a produção de carvão e de lenha, devido ao alto custo de instalação e aos baixos valores conseguidos em leilões de energia de biomassa, onerando a geração de energia elétrica. O alto investimento inicial nas termelétricas e o baixo valor de compra da energia elétrica definidos nos leilões de energia diminuí a atratividade da geração termelétrica acionada pela lenha da caatinga.

Tabela 4.7: Receitas e custos anuais (R\$) para as cinco rotas energéticas de uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável

	Produção de Lenha (R\$)	Geração de Energia (R\$)		Produção de Carvão (R\$)	
		Ciclo a vapor condensado	Ciclo combinado a gaseificação	Fornos Tradicionais	Fornos Cilíndricos
Receita Bruta	264.000,00	517.387,20	809.823,45	840.000,00	1.176.000,00
Impostos	- 57.420,00	- 50.445,25	- 78.957,79	- 182.700,00	- 255.780,00
Receita Líquida	206.580,00	466.941,95	730.865,66	657.300,00	920.220,00
Encargos da extração de lenha	- 100.400,00	- 100.400,00	- 100.400,00	-100.400,00	-100.400,00
O&M¹ Fixos	—	- 40.000,00	- 165.000,00	-91.933,20	-67.508,00
O&M Variáveis	—	- 10.040,50	- 15.715,57	—	-40.051,20
Transmissão	—	- 12.550,63	- 19.644,47	—	—
Lucro Operacional	106.180,00	343.950,82	595.105,63	464.966,80	712.260,80
IR/Contr. Social	- 36.101,20	- 116.943,28	- 202.335,91	-158.088,71	-242.168,67
Lucro Líquido	70.078,80	227.007,54	392.769,71	306.878,09	470.092,13

¹ O&M – operação e manutenção.

Na análise de fluxo de caixa para o período de 20 anos, o ano zero incorpora os custos iniciais de cada rota, sendo considerado um valor negativo. A partir do ano 1 é gerada a receita líquida, que nos anos seguintes é acrescida de juros pré-estabelecidos, neste caso o IPCA de 5,45%. (Tabela 4.8). Os valores de fluxo de caixa ao longo de 20 anos, tempo de vida útil considerado neste projeto, apontam para um valor negativo de valor presente líquido (VPL) para a produção de lenha e também para a geração elétrica através de termelétricas (Tabela 5). A taxa interna de retorno (TIR) foi menor que a taxa mínima de atratividade (TMA), isso indica que o investimento nessas rotas não é economicamente atrativo, pois a TIR dessas rotas é superado pela TMA

Considerando a relação entre TIR e TMA a produção de carvão em forno tradicional ou cilíndrico são as únicas rotas que tem valor de TIR maior que de TMA, sendo assim são os investimentos economicamente atrativos. A produção de carvão em fornos cilíndricos verticais é mais viável economicamente que a produção em fornos tradicionais, mesmo tendo custo de investimento inicial maior, tem ainda a vantagem de ser uma alternativa sustentável do ponto de vista ambiental, econômico e social (Colombo et al., 2006).

Os prazos de retorno de investimento (PRI) para a produção de carvão em fornos cilíndricos (2,4 anos) e tradicionais (3 anos) (Tabela 4.9), tempo superior ao encontrado por Colombo et al. (2006), que comparou esses dois sistemas produtivos de carvão vegetal a partir da lenha de eucalipto e obteve PRI de 1,45 para fornos cilíndricos e 0,74 para fornos tipo rabo quente.

O valor presente líquido (VPL) das diferentes rotas de exploração energética da caatinga é indicativo da sua viabilidade comercial, sendo viáveis aqueles que apresentam valores numéricos positivos, como é o caso da produção de carvão, seja em fornos tradicionais seja em fornos cilíndricos. A relação entre a taxa mínima de atratividade (TMA) e a taxa interna de retorno (TIR), no caso a TMA é maior que a TIR, também indica que a produção de carvão é viável economicamente. O VPL e a relação entre a TIR e a TMA da comercialização direta de lenha e das rotas de geração de energia indicam a baixa viabilidade econômica destas rotas energéticas (Tabela 4.9)

Tabela 4.8: Valores de fluxo de caixa anual para as cinco rotas energéticas de uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável num período de 20 anos

Período	Produção de Lenha (R\$)	Geração Termelétrica (R\$)		Produção de Carvão Vegetal (R\$)	
		Ciclo a vapor Condensado	Ciclo combinado a gaseificação	Fornos Tradicionais	Fornos Cilíndricos
ANO 0	-893.600,00	-3.093.600,00	-5.393.600,00	-916.550,00	-1.118.600,00
ANO 1	70.078,80	227.007,54	392.769,71	306.878,09	470.092,13
ANO 2	73.898,09	239.379,45	414.175,66	323.602,94	495.712,15
ANO 3	77.925,54	252.425,63	436.748,24	341.239,30	522.728,46
ANO 4	82.172,48	266.182,83	460.551,01	359.836,85	551.217,16
ANO 5	86.650,88	280.689,79	485.651,04	379.447,95	581.258,50
ANO 6	91.373,36	295.987,38	512.119,03	400.127,87	612.937,09
ANO 7	96.353,20	312.118,70	540.029,51	421.934,84	646.342,16
ANO 8	101.604,45	329.129,17	569.461,12	444.930,29	681.567,80
ANO 9	107.141,90	347.066,70	600.496,75	469.178,99	718.713,25
ANO 10	112.981,13	365.981,84	633.223,83	494.749,24	757.883,12
ANO 11	119.138,60	385.927,85	667.734,53	521.713,07	799.187,75
ANO 12	125.631,66	406.960,92	704.126,06	550.146,44	842.743,48
ANO 13	132.478,58	429.140,29	742.500,93	580.129,42	888.673,00
ANO 14	139.698,66	452.528,43	782.967,23	611.746,47	937.105,68
ANO 15	147.312,24	477.191,23	825.638,94	645.086,65	988.177,94
ANO 16	155.340,76	503.198,16	870.636,26	680.243,88	1.042.033,64
ANO 17	163.806,83	530.622,46	918.085,94	717.317,17	1.098.824,47
ANO 18	172.734,30	559.541,38	968.121,62	756.410,95	1.158.710,41
ANO 19	182.148,32	590.036,38	1.020.884,25	797.635,35	1.221.860,13
ANO 20	192.075,40	622.193,37	1.076.522,44	841.106,48	1.288.451,50

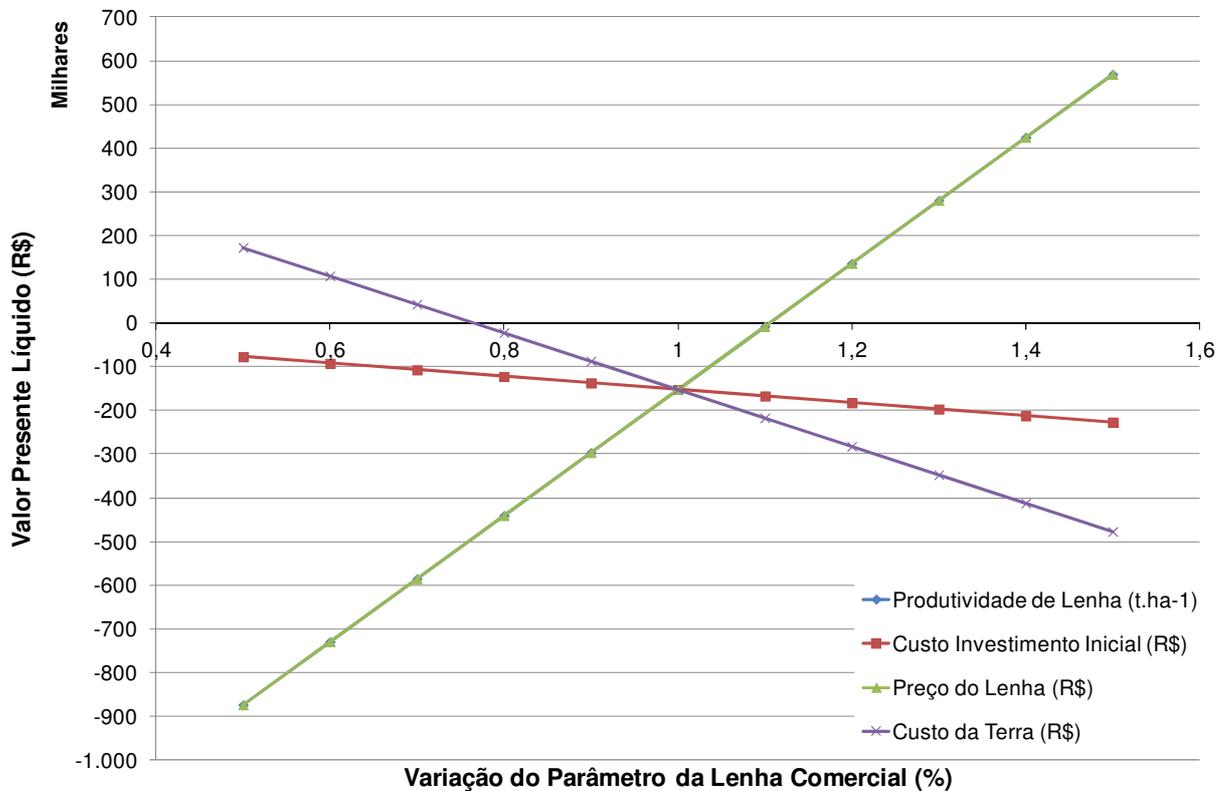
Tabela 4.9: Parâmetros da análise da viabilidade econômica do uso energético de lenha da caatinga

	Produção de Lenha (R\$)	Geração Termelétrica (R\$)		Produção de Carvão Vegetal (R\$)	
		Ciclo a vapor condensado	Ciclo combinado a gaseificação	Fornos Tradicionais	Fornos Cilíndricos
TMA¹	12,14%	12,14%	12,14%	12,14%	12,14%
VPL (R\$)²	-152.196,89	- 691.959,34	- 1.238.267,91	2.330.086,20	3.854.769,49
TIR³	9,80%	9,01%	8,92%	38,79%	47,42%
PRI⁴	12,75	13,63	13,73	2,99	2,38

¹TMA - taxa mínima de atratividade; ²VPL – valor presente líquido ; ³TIR - taxa interna de retorno; ⁴PRI – período de retorno do investimento.

A análise de viabilidade econômica da produção de lenha para comercialização direta foi feita incluindo os custos da terra. Considerando que a produção de lenha seja feita pelo proprietário da terra a TIR passa a 33,98 %, superior à TMA de 12,14 % com VPL igual R\$ 497.803,11 e período de retorno de investimento de 3,5 anos, tornando o investimento mais atrativo. A análise de sensibilidade da comercialização direta da lenha permitiu verificar que a variação dos parâmetros produtividade de lenha, preço da lenha e custo da terra podem tornar positivo o VPL desta rota (Figura 4.7). Se o preço da terra baixar a 70% do valor considerado neste estudo, equivalendo a R\$175,00 o hectare, ou a produção de lenha e o preço da lenha aumentarem em 20% o VPL da comercialização direta da lenha será positivo, indicando a viabilidade econômica da rota.

Figura 4.7: Análise de sensibilidade financeira da comercialização direta da lenha. A curva de produtividade de lenha coincide com o preço da lenha.



Nas termelétricas a variação dos parâmetros produtividade de lenha, custo inicial de instalação e preço de venda de energia podem tornar o investimento mais atrativo, obtendo-se um VPL positivo (Figura 6). Esta variação poderia ser uma redução em 60% do custo inicial de instalação, que para o ciclo combinado equivale a R\$ 2.700.000,00 e para o ciclo a vapor condensado equivale a R\$ 1.320.000,00; ou o aumento de 30% na produtividade de biomassa, que passaria a 39.000 t.ha⁻¹; ou ainda o aumento de 30% no valor de venda da energia, correspondendo a R\$134,00 por megawattthora produzido.

A geração de energia elétrica a partir da lenha da caatinga sob MFS pode ser viabilizada pela adoção de medidas governamentais que favoreçam a inserção desta atividade no semiárido como, por exemplo, o aumento do valor fixado nos leilões pela energia gerada a partir da biomassa e maiores subsídios para a compra de equipamentos diminuindo o investimento inicial

Na produção de carvão, a variação em 50% dos parâmetros produtividade de lenha, custo inicial, preço do carvão ou custo da terra não inviabiliza economicamente a rota tecnológica, pois o VPL permanece positivo. Entretanto, pode-se observar através dos

gráficos da Figura 4.9 que os parâmetros mais importantes para a viabilidade econômica da produção de carvão são produtividade de lenha e preço de venda do carvão (Figura 4.9).

Figura 4.8: Análise de sensibilidade financeira da produção de energia por termelétricas com ciclo combinado (a) e com ciclo a vapor condensado (b).

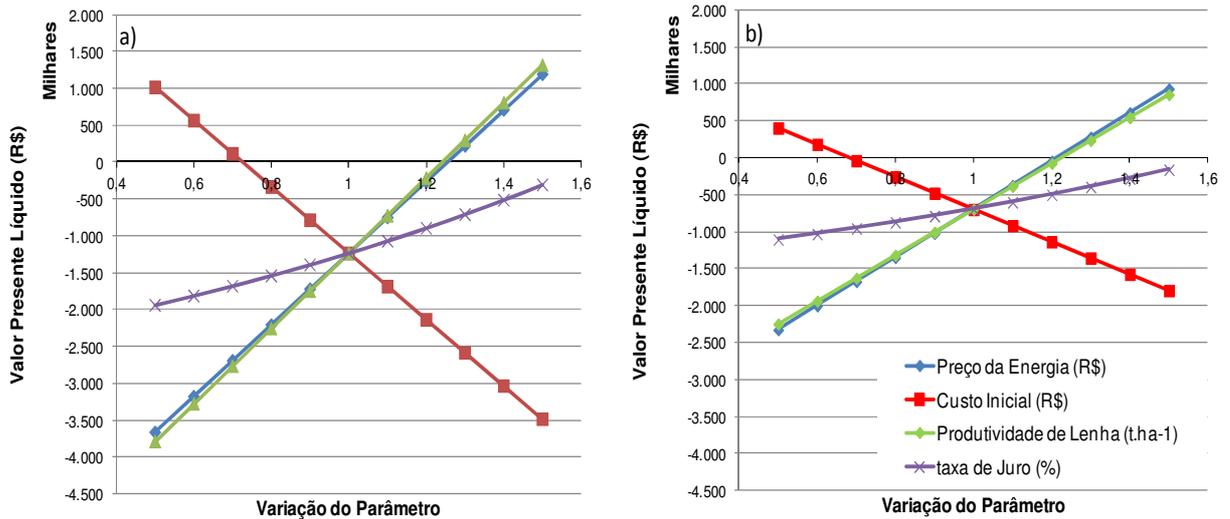
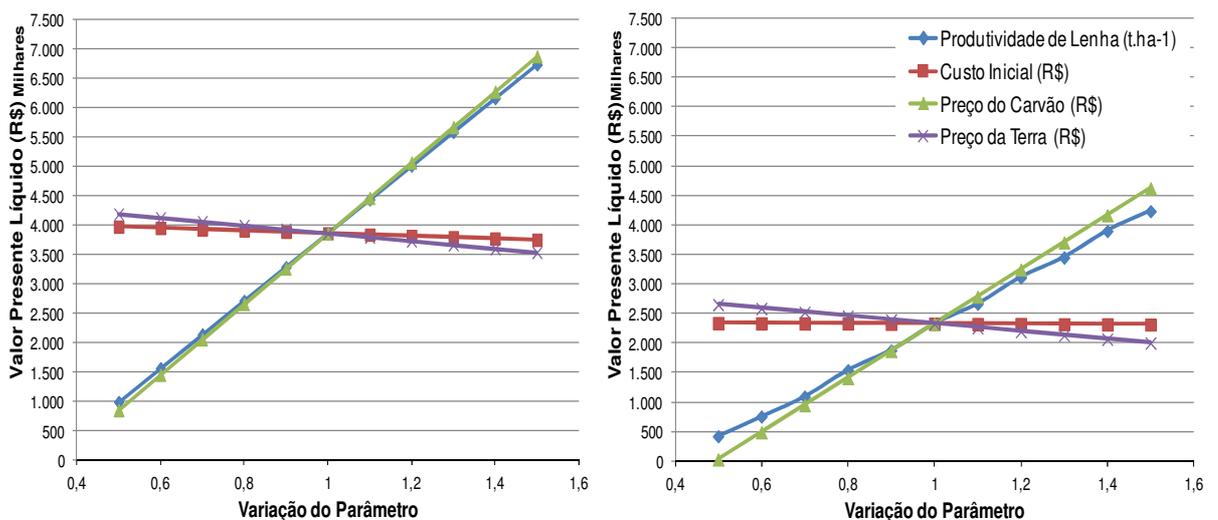


Figura 4.9: Análise de sensibilidade financeira da produção de carvão em fornos cilíndricos (a) ou em fornos tradicionais (b).



5. CONCLUSÕES

As fontes que apresentaram maior produção de biomassa anual foram vinhaça, esterco bovino, bagaço de cana-de-açúcar, lenha da caatinga e resíduos sólidos urbanos. Entretanto, após os cálculos da disponibilidade energética, as fontes que apresentaram maior potencial energético foram bagaço de cana, lenha da caatinga, resíduos sólidos urbanos, etanol e coco-baía. As fontes de biomassa selecionadas para o estudo, se utilizadas em sua totalidade para fins energéticos, somariam cerca de 119,5 milhões de toneladas, salientando-se que os valores indicados são valores potenciais extremos, supondo-se o aproveitamento de toda a biomassa disponível.

Nas potencialidades locais, merece destaque a biomassa do babaçu, do coco-baía e do dendê. O coco babaçu apresenta alta produção no Maranhão, região carente de combustível para a produção de ferro gusa. A biomassa do coco-baía é abundante nos litorais do Ceará, Bahia e Sergipe e nos perímetros irrigados no Vale do São Francisco. A biomassa do dendê é abundante no Sudeste da Bahia. Apesar do destaque dentre as fontes oleaginosas, a produtividade anual do dendê no Sul da Bahia é baixa, comparada às áreas de cultivo de dendê no Pará e outros locais na região norte do país.

Na área em que foi avaliada a relação entre o índice de vegetação e a biomassa estimada em campo por equações alométricas, os valores de IVDN relacionados à vegetação apresentaram-se positivamente correlacionados com os valores de biomassa estimados pelas equações alométricas. O erro de predição na estimativa da biomassa, obtido do pelo método da validação cruzada (LOOCV), foi igual a 31%, considerado satisfatório para um método indireto e para esse tipo vegetacional, que apresenta uma distribuição espacial muito heterogênea.

O aumento na precisão da estimativa pode ser obtido com algumas estratégias, como o desenvolvimento de estudos de previsão de biomassa utilizando imagens de satélites com maior resolução espacial. Outra opção é o uso de outros índices de vegetação para o desenvolvimento de modelos de regressão estatística com menores graus de incerteza, como por exemplo, o índice de vegetação ajustado para o solo (IVAS, que minimiza os efeitos do solo no resultado final do índice, ou ainda o índice de vegetação resistente à atmosfera que pode reduzir a dependência do IVDN às condições atmosféricas.

As espécies vegetais estudadas apresentaram poder calorífico inferior relativamente alto, variando entre 3600 - 4600 kcal/kg. Esses valores ressaltam a importância energética da vegetação nativa da Caatinga e a necessidade de pesquisas que venham acrescentar novas perspectivas de aproveitamento sustentável desta fonte de energia.

Na análise de viabilidade de aproveitamento energético da caatinga a jurema preta apresenta alta densidade e dominância com maior valor de biomassa por hectare na área de estudo, e maior poder calorífico, sendo um forte indicativo do valor energético da vegetação local.

Considerando a relação entre a taxa interna de retorno (TIR) e a taxa mínima de atratividade (TMA) a produção de carvão em forno tradicional ou cilíndrico são as únicas rotas que tem valor de TIR maior que de TMA, sendo assim são os investimentos economicamente atrativos. Os prazos de retorno de investimento (PRI) para a produção de carvão em fornos cilíndricos (2,4 anos) e tradicionais (3 anos). O VPL e a relação entre a TIR e a TMA da comercialização direta de lenha e das rotas de geração de energia indicam a baixa viabilidade econômica desta rota energética.

A análise de sensibilidade da comercialização direta da lenha permitiu verificar que a variação dos parâmetros produtividade de lenha, preço da lenha e custo da terra podem tornar positivo o VPL desta rota. Nas termelétricas a variação dos parâmetros produtividade de lenha, custo inicial de instalação e preço de venda de energia podem tornar o investimento mais atrativo, obtendo-se um VPL positivo. A produção de lenha da caatinga para comercialização direta em uma área sob MFS também é pouco atrativa considerando o valor da terra. Contudo, esses custos podem ser minimizados quando o MFS é implantado em terras próprias sobre a administração de cooperativas e o sistema pode se tornar viável nesse contexto.

As condições econômicas atuais tornam pouco atrativo o aproveitamento da lenha da caatinga sob MFS para conversão energética em termelétricas, devido ao valor pago pela energia gerada a partir de biomassa, e também ao nível de desenvolvimento tecnológico que eleva os custos de instalação e que tem baixos níveis de eficiência na conversão energética. Entretanto, se esse processo receber subsídios para sua implantação, como melhor valor pago pela energia e diminuição de impostos durante a implantação de termelétricas para geração de energia a partir da lenha da caatinga, esta tecnologia seria favorecida, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico no semiárido, onde já ocorre a exploração predatória de lenha, sem o uso de manejo florestal sustentável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2011.

ACCIOLY, L. J. O.; COSTA, T. C. C.; OLIVEIRA, M. A. J.; SILVA, E. A.; SILVA, J. A.; SILVA, A. B.; SOUZA, A. R. Biomassa das florestas de caatinga nas microrregiões do Seridó Oriental (RN) e Seridó Ocidental (PB). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA NO CONTEXTO DAS MUDANÇAS AMBIENTAIS, 17, 2008, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008. p. 1-4.

ACCIOLY, L. J. O.; PACHÊCO, A.; COSTA, T. C. C. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/LANDSAT. **Revista Engenharia Agrícola**, p. 492-498, 2002.

ALLEN, R. G., TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land)**: advanced training and users manual. Idaho: University of Idaho, version 1.0, 2002.

ALVAREZ, I. A. ; OLIVEIRA, A. R. ; OLIVEIRA, V. M. do N. ; GARRIDO, M. A. . Potencial energético de área conservada de caatinga em Petrolina-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS, Belo horizonte: Embrapa floresta, 2009.

ALVES JUNIOR, F. T. **Biomassa e volumetria de uma área de caatinga**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

AMORIM, I. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAUJO, E. L. Flora e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil. **Acta Botanica Brasilica** v.19, n.3, p. 615-623. 2005.

ANTUNES, A. F. B.; LINGNAU, C. Uso de índices de acurácia para avaliação de mapas temáticos obtidos por meio de classificação digital. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO, 3, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Sagres, 1997.

ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R. A.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, B. L.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* L.) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v.28, n.5, p. 707-714, 2004.

ARAÚJO, G. S. **Produção de biodiesel a partir do óleo de coco (*Cocos nucifera* L.)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

ARLOT, S.; CELISSE, A. A survey of cross-validation procedures for model selection. **Statistics Surveys**, v.4, p. 40-79, 2010.

BAIN, R. L.; AMOS, W. A.; DOWNING, M.; ERLACK, R. L. **Biopower technical assessment: state of the industry and technology**. Golden/Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2003.

BERGMEIR, C.; BENÍTEZ, J. M. On the use of cross-validation for time series predictor evaluation. **Information Sciences**, v.191, p. 192-213, 2012.

BITENCOURT, M. D.; MESQUITA JR, H. D.; MANTOVANI, W.; BATALHA, M. A.; PIVELLO, V. R.; LEITE, L. L.; SAITO, C. H. **Identificação de fisionomias de cerrado com imagem índice de vegetação: contribuição ao conhecimento ecológico do cerrado**. Brasília: Universidade de Brasília, p. 316-320, 1997.

BRAGA, C. C.; A, S. S.; DANTAS, F. R. C.; SILVA, B. B. Relação preliminar entre IVDN obtidos do AVHRR/NOAA e TM/LANDSAT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.

BRAGA, C. C.; DANTAS, F. R. C.; NEVES, D. G. Estimativa da cobertura vegetal no setor leste de Pernambuco utilizando dados do AVHRR/NOAA. **Revista Verde** v.4, n.3, p. 99-107, 2009.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2010.

BRAND, M. A.; OLIVEIRA, L. C.; MARTINS, S. A.; LACERDA, S. R.; SOUTO, L. Potencialidade de florestas nativas sob manejo sustentável para a geração de energia. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 5, 2009, Belém/PA. **Anais...**, Belém, 2009.

BRANDÃO, Z. N.; BEZERRA, M. V. C. B.; SILVA, B. B. **Uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 2007, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis: INPE, 2007. p. 75-81.

BRASIL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002.

BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2007a.

BRASIL. **Balanco nacional da cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007b.

BRASIL. **Balanco energético nacional 2011**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2012a.

BRASIL. **Decreto no 7.404 de 23 de Dezembro de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder executivo, Brasília, DF, 2012b.

CAMARGO, C. A.; USHIMA, A. H.; RIBEIRO, A. M. M. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool: manual de recomendações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.

COSTA, T. C. C.; ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. A. J.; BURGOS, N.; SILVA, F. H. B. B. Phytomass mapping of the “Seridó caatinga” vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices. **Scientia Agricola**, v.59, p.707-715, 2002.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; BARSÍ, J. A. Revised Landsat 5 thematic mapper radiometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 4, n.3, p. 490-494, 2007.

COELHO, S. T.; SILVA, O. C.; CONSIGLIO, M.; PISETTA, M.; MONTEIRO, M. B. C. A. **Panorama do potencial de biomassa no Brasil**. São Paulo: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2002.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; GHILARDI, A.; KARNIOL, M. R. **Atlas de bioenergia do Brasil**. São Paulo: Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), 2008.

COLOMBO, S. F. O.; PIMENTA, A. S.; HATAKEYAMA, K. Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais : um modelo sustentável. SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13, 2006, Bauru. **Anais...** Bauru, 2006.

COLTRI, P. P.; RAMIREZ, G. M.; WALTER, M. K. C.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S.; NASCIMENTO, C. R.; GONÇALVES, R. R. V. Utilização de índices de vegetação para estimativas não-destrutivas da biomassa, estoque e sequestro de carbono do cafeeiro arábica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 121-128.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: UNICAMP, 2008..

COSTA, T. C. C.; OLIVEIRA, M. A. J.; ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, F. H. B. B. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 961-974, 2009.

COSTA, T. C. C.; ACCIOLY, L. J. O.; OLIVEIRA, M. A. J. ; BURGOS, N.; SILVA, F. H. B. Phytomass mapping of the “Seridó Caatinga” vegetation by the plant area and the normalized difference vegetation indices. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 4, p. 707-715, 2002.

COUTO, L. C.; WATZLAWICK, L. F. Ways of energy valuation of biomass. **Biomassa & Energia**, v.1, n.1, p. 71-92, 2004.

CRUZ, P. T. A.; NOGUEIRA, M. F. M. Oportunidades para o desenvolvimento da biomassa energética no Brasil. **Biomassa & Energia**, v.1, n.1, p. 37-44, 2004.

DRUMMOND, A. R. F.; GAZINEU, M. H. P.; ALMEIDA, L.; MAIOR, A. S. Produção e valor energético da torta de mamona do agreste pernambucano. In: Congresso Brasileiro de Mamona, 2, 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju, 2006.

DUTRA, E. D.; PRADO, A. G.; RODRIGUES, T. R. Estimativas do potencial de geração de energia elétrica na região semiárida a partir da biodigestão anaeróbica de esterco animal. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOPROCESSOS, 17, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009.

FERRAZ, J. S. F. **Análise da vegetação de caatinga arbustivo-arbórea em Floresta, PE, como subsídio ao manejo florestal.** 2011. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; LIMA, E. R. V.; BANDEIRA, M. M.; SILVA, B. B. Mapeamento da Caatinga com uso de geotecnologia e análise da umidade antecedente em bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.5, n.3, p. 676-693, 2012.

FURLAN JÚNIOR, J. **Dendê: manejo e uso dos subprodutos e dos resíduos.** Belém: Embrapa/MAPA, 2006.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga.** Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

GAZZONI, D. L.; FELICI, P. H. N.; CORONATO, R. M. S.; RALISCH, R. Balanço energético das culturas de soja e girassol para produção de biodiesel. **Biomassa & Energia**, v.2, n.4, p. 259-265, 2005.

GOMES, R. P. **O coqueiro-da-baía**, 5. ed. São Paulo: Editora Nobel, 1984.

HAACK, S. C. **Análise técnica e econômica para aproveitamento dos dejetos de caprinos em biodigestores no semiárido baiano.** 2009. Dissertação (Mestrado em Economia), Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

HENRIQUES, R. M. **Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação.** 2009. Tese (Doutorado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

HUETE, A. R.. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295–309, 1988.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: <<http://ibge.gov.br>>. Acesso em 01 de março de 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente - Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2. ed. São Paulo: Editora Parêntese, 2009.

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 261–270, 1992.

KING, D. Allometry and life history of tropical trees. **Journal of Tropical Ecology**, n. 12, p. 25-44, 1996.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. **Manual do biodiesel**. São Paulo: Editora Blucher, 2006.

KUNTSCHIK, G. **Estimativa de biomassa vegetal lenhosa em cerrado por meio de sensoriamento remoto óptico e de radar**. 2004. Tese (Doutorado em Ecologia). Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. São Paulo.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S. Tratamento anaeróbico de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.9, n. 4, p. 280-284, 2004.

LIMA, J. L. S.; SÁ, I. B.; SERPA, F. G.; MENDONÇA, A. L.; DUARTE, E. S.. Características físico-mecânicas e energéticas de madeiras do trópico semi-árido do Nordeste do Brasil. **Comunicado Técnico**. Embrapa Cpatsa, Petrolina, v.1, n.1, p. 1-14, 1996.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. São Paulo: Editora Uniderp, 2006.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. São Paulo: Editora D&Z, 2004.

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. **Int. Journal of Remote Sensing**, v.8, n.3, p.517-523, 1987.

MELO, V. T. M. O Manejo florestal visto como um ativo ambiental impulsionador do desenvolvimento local com a geração de emprego e renda. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 9, 2007. Curitiba, **Anais...Curitiba**, 2007.

MENEGHETTI, S. M. P.; MENEGHETTI, M. R.; MEDEIROS, A. C. Obtenção de biodiesel metílico e etílico a partir do óleo de amendoim (*Arachis hipogea*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CATÁLISE, 14, 2007. **Anais...** Recife: Editora Universitária da UFPE, 2007.

MENEZES, R. S. C., LIMA, J. P. R., SAMPAIO, E. V. S. B., SICSÚ, A. B., FREITAS, A. D. S., LOPES, G. M. B., SILVEIRA, H. L. F., MENDES, L. N., GARRIDO, M. S., FERREIRA, M. O., WANDERLEY, M. B., SILVEIRA, S. K. Produção de óleos vegetais em Pernambuco para conversão em biodiesel diagnóstico e indicação de alternativas. Recife: Editora Universitária UFPE, 2011. p. 242.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente** –. Serviço Florestal Brasileiro - Manejo Florestal Sustentável. 2010. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/>>. Acesso em: 20 dez. 2010.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. Wood Energy: Principles and Applications. **Nota técnica**: Núcleo de Excelência em Geração Termoeletrica Distribuída do Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2002.

PAREYN, FRANS GERMAIN CORNEEL. O Papel do Manejo Florestal Sustentável. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (Eds.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro**, 2010. p. 99-113.

PARO, A. C.; COSTA, F. C.; COELHO, S. T. Estudo comparativo para o tratamento de resíduos sólidos urbanos: aterros sanitários x incineração. **Revista Brasileira de Energia**, v. 14, n. 2, p. 113-125, 2008.

PEREIRA, I. M.; ANDRADE, L. A.; SAMPAIO, E. V. S. B., BARBOSA, M. R. V. 2003. Use-history effects on structure and flora of caatinga. **Biotrópica**, v. 35, n. 2, p. 154–165, 2003.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, 1999.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos: Editora PA, 2007.

QI, J.; CABOT, F.; MORAN, M. S.; DEDIEU, G. Biophysical parameter estimations using multidirectional spectral measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 54, n.1, p. 71-83, 1995.

REGO, E. E.; HERNÁNDEZ, F. D. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar. contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Proceedings online**...Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100053&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 20 dez. 2011.

RIEGELHAUPT, E. M.; PAREYN, F. G. C. A Questão Energética. In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. (Eds.). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga**. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010. p. 65-75.

RODAL, M. J. N.; MARTINS, F. R.; SAMPAIO, E. V. S. B. Levantamento quantitativo das plantas lenhosas em trechos de vegetação de caatinga em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21; n. 3; p. 192-205, jul/set 2008.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 1, p. 57-67, 2005.

SAMPAIO, E.V.S.B.; ARAÚJO, E.L.; SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H. Regeneração da vegetação de caatinga após corte e queima, em Serra Talhada, PE, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n.º 5, p. 621-632, 1998.

SAMPAIO, E. V. D. S. B.; FREITAS, A. D. S. Produção de biomassa na vegetação nativa do semi-árido nordestino. In: MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; SALCEDO, I. H. (Eds.). **Fertilidade do solo e produção de biomassa no semi-árido**. Recife, 2008. p. 11-25.

SAMPAIO, E. V. S. B. Uso das plantas da caatinga. **Vegetação & Flora da Caatinga**: 2002; Recife, p. 49-90, 2002.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, G. C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. **Acta bot. bras.** V. 19, n. 4: p. 935-943. 2005.

SANTOS, N. O. **Termodinâmica aplicada às termelétricas - teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro. Editora: Interciência, , 2006.

SILVA, G. C.; SAMPAIO, E. V. DE S. B. Biomassas de partes aéreas em plantas da caatinga. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 567-575, 2008.

SILVA, J. P. F.; PAREYN, F. G. C.; SOARES, D. G. Manejo Florestal Sustentável da Caatinga: Adequação Ambiental e Produção de Energia Agroecológica em Projetos de Assentamento e Propriedades Coletivas do Plano Nacional de Reforma Agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 977-980, 2009.

SILVA, M. S.; MACEDO, L. C.; SANTOS, J. A. B., MOREIRA, J. J. S., NARAIN, N., SILVA, G. F. Aproveitamento de co-produtos da cadeia produtiva do biodiesel de mamona. **Revista Exacta**, v. 8, n. 3, p. 279-288, 2010.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 185-206, 2008.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A.. **Matemática Financeira**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

TEIXEIRA, M. A. Estimativa do potencial energético na indústria do óleo de babaçu no Brasil. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200045&lng=en&nrm=abn>. Acesso em setembro de 2011.

THAPA, K.; BOSSLER, J. Accuracy of spatial data used in geographic information systems. **Photogrammetric engineering and remote sensing**. v. 58, n. 6, p. 835-841, 1992.

THOMAZ, C.; DA COSTA, C.; DE OLIVEIRA, M. A.; LUCIANO, J. D. O.; SILVA, F. H. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient**, v. 13, p. 961-974, 2009.

TOLMASQUIM, M. T. **Geração de Energia Elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2005.

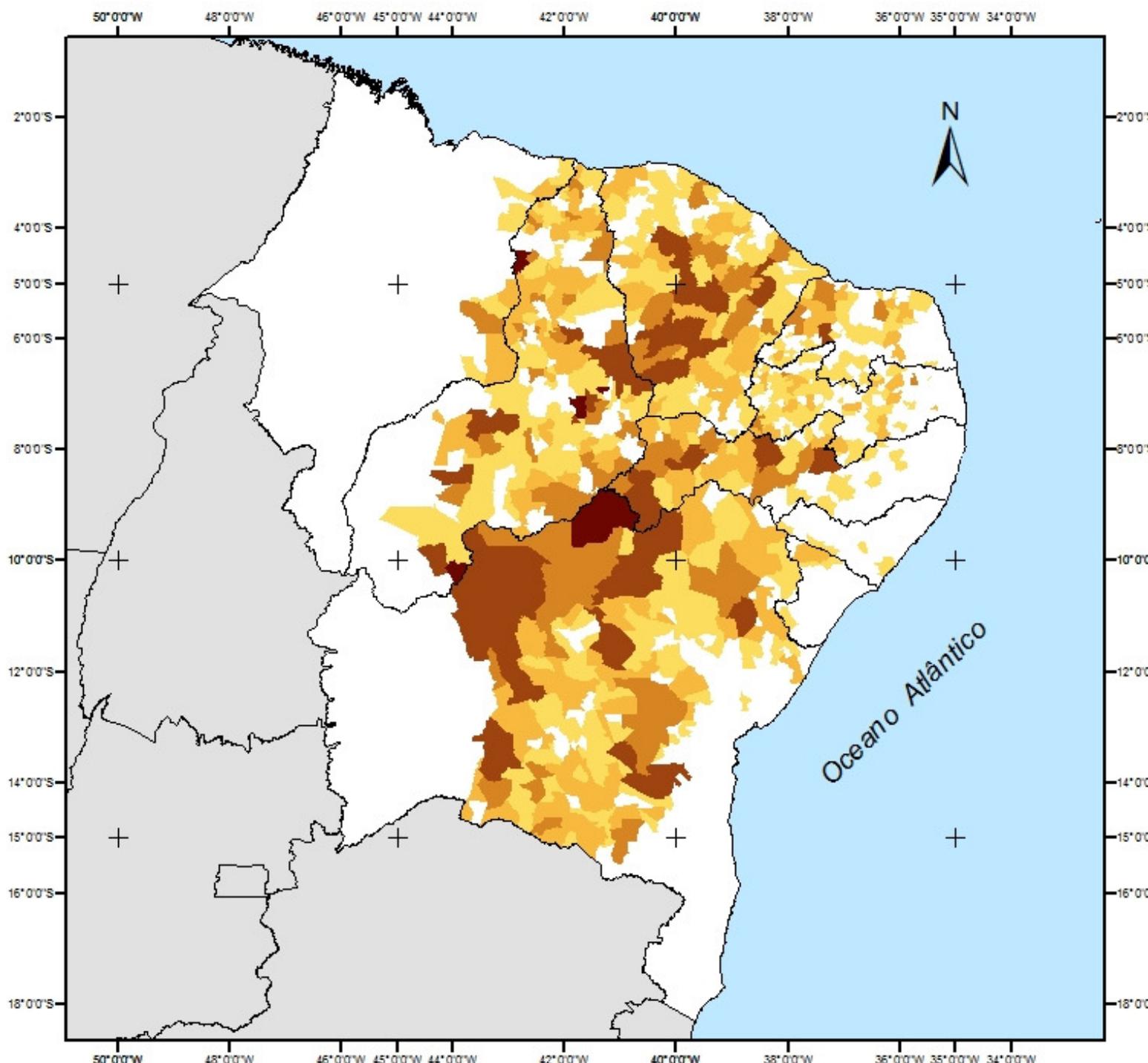
VALE, A. T.; BARROSO, R. A.; QUIRINO, W. F. Caracterização da biomassa do coco-baía (*Cocos nucifera* L.) para uso energético. **Biomassa e Energia**, v. 1, n. 4, p. 365-370, 2004.

VIANA, H.; LOPES, D.; ARANHA, J. Predição de Biomassa Arbustiva lenhosa empregando dados do inventário e o índice de diferença normalizada extraído em imagens landsat5 TM. **Revista Millenium**, v. 35, p. 0-6, 2009.

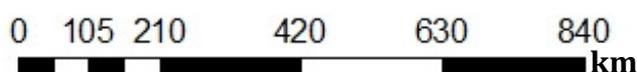
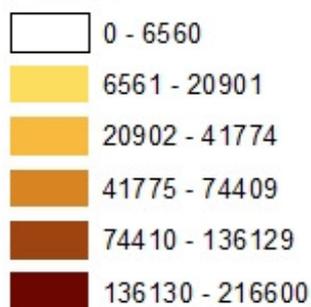
WALTER, A.; NOGUEIRA, L. A. H. Sistemas de Produção de Eletricidade a Partir da Biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, EDGARDO OLIVARES (Eds.). **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora Unicamp. p. 573-607, 2008

7. APÊNDICE – ATLAS DA BIOMASSA NA REGIÃO NORDESTE

Estimativa do Potencial da Produção de Lenha da Caatinga nos Municípios da Região Nordeste

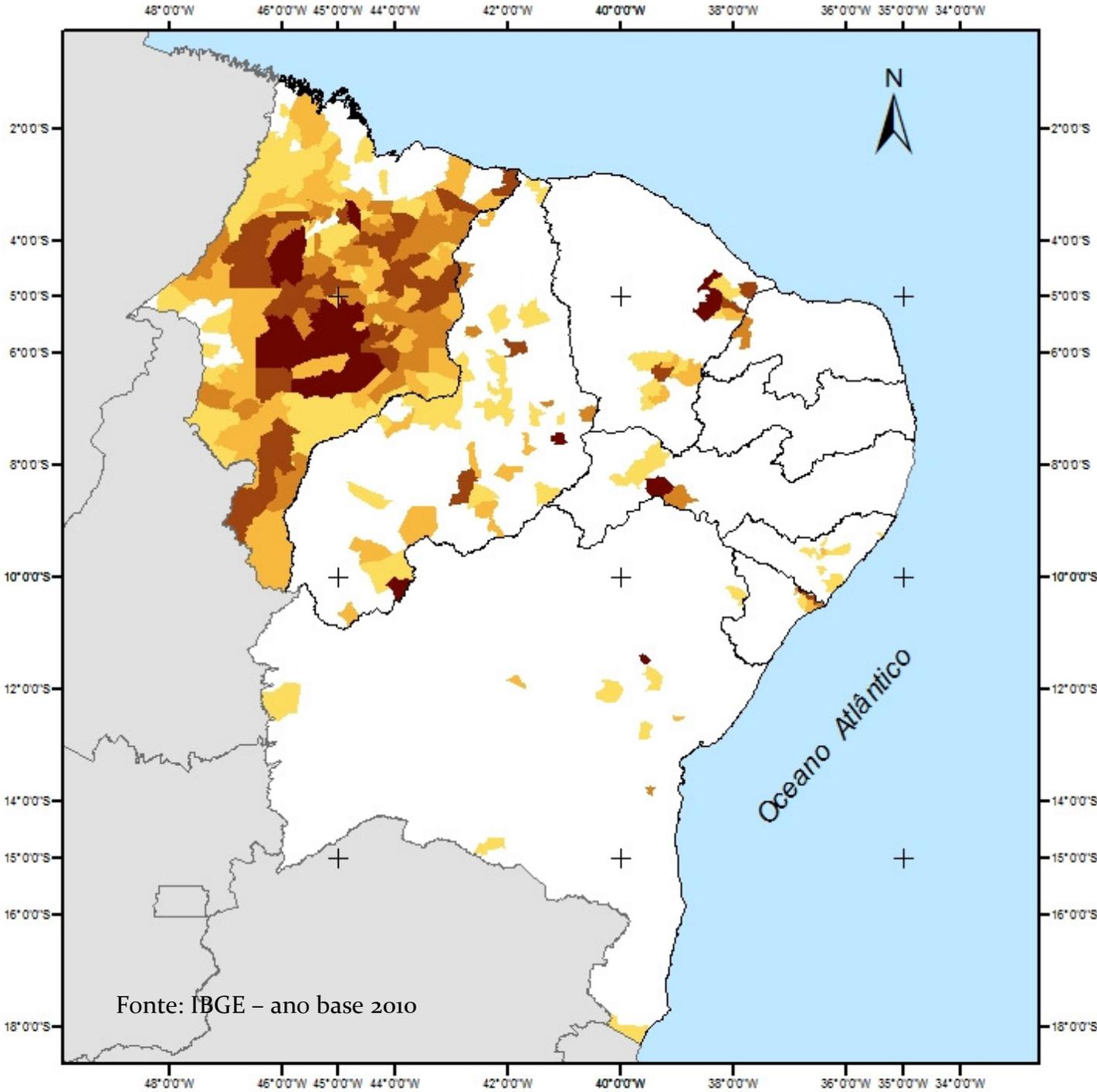


Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa do da Produção de Resíduos do Arroz nos Municípios da Região Nordeste



Potencial de Biomassa
Toneladas.ano⁻¹

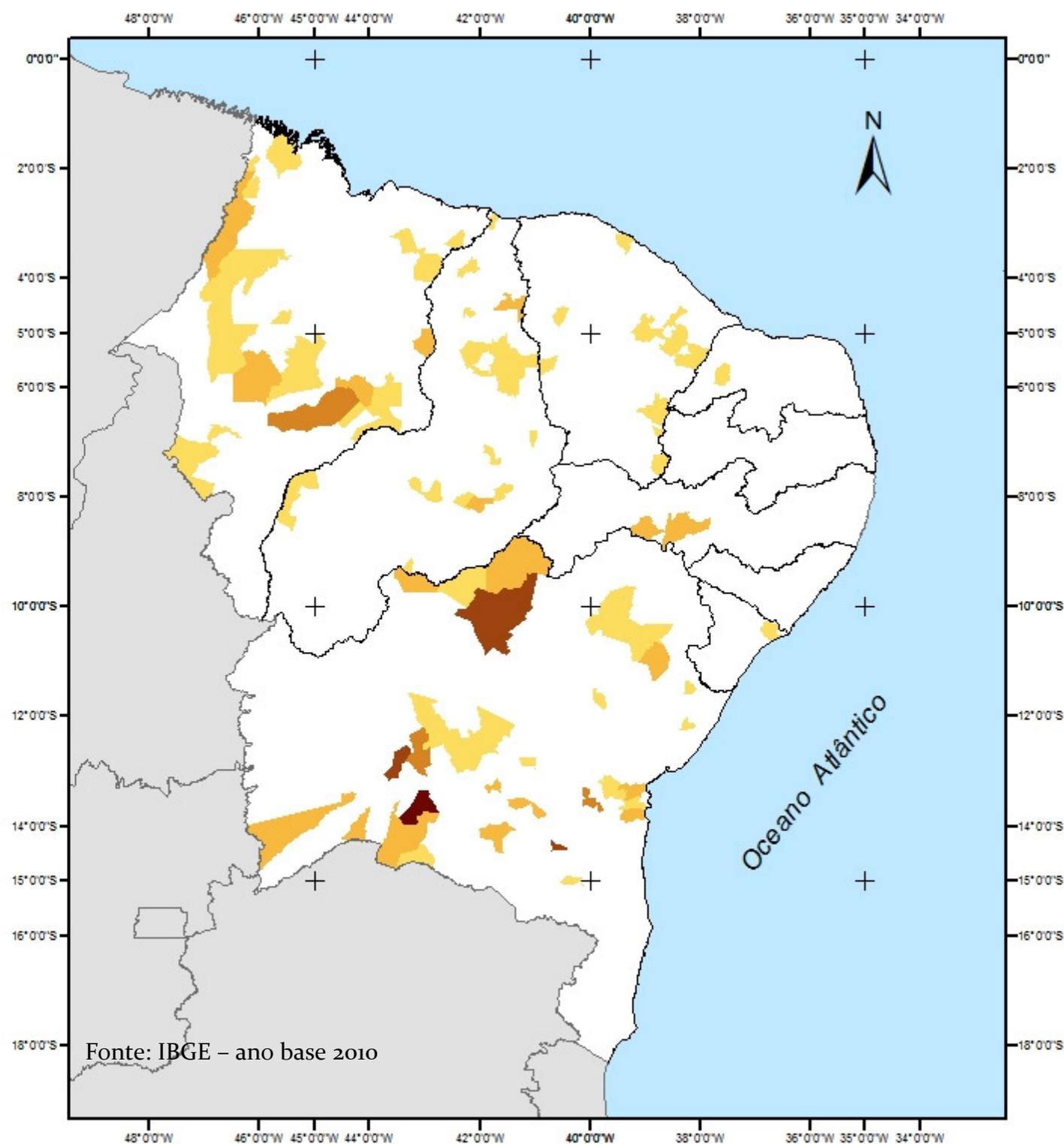
- 0 - 150
- 151 - 488
- 489 - 1015
- 1016 - 1802
- 1803 - 3062
- 3063 - 5801

0 125 250 500 750 1.000 km

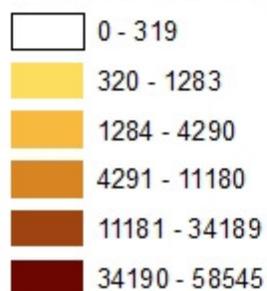
Sistema de Projeção GCS South American 1969



Estimativa da Produção de Resíduos da Silvicultura nos Municípios da Região Nordeste



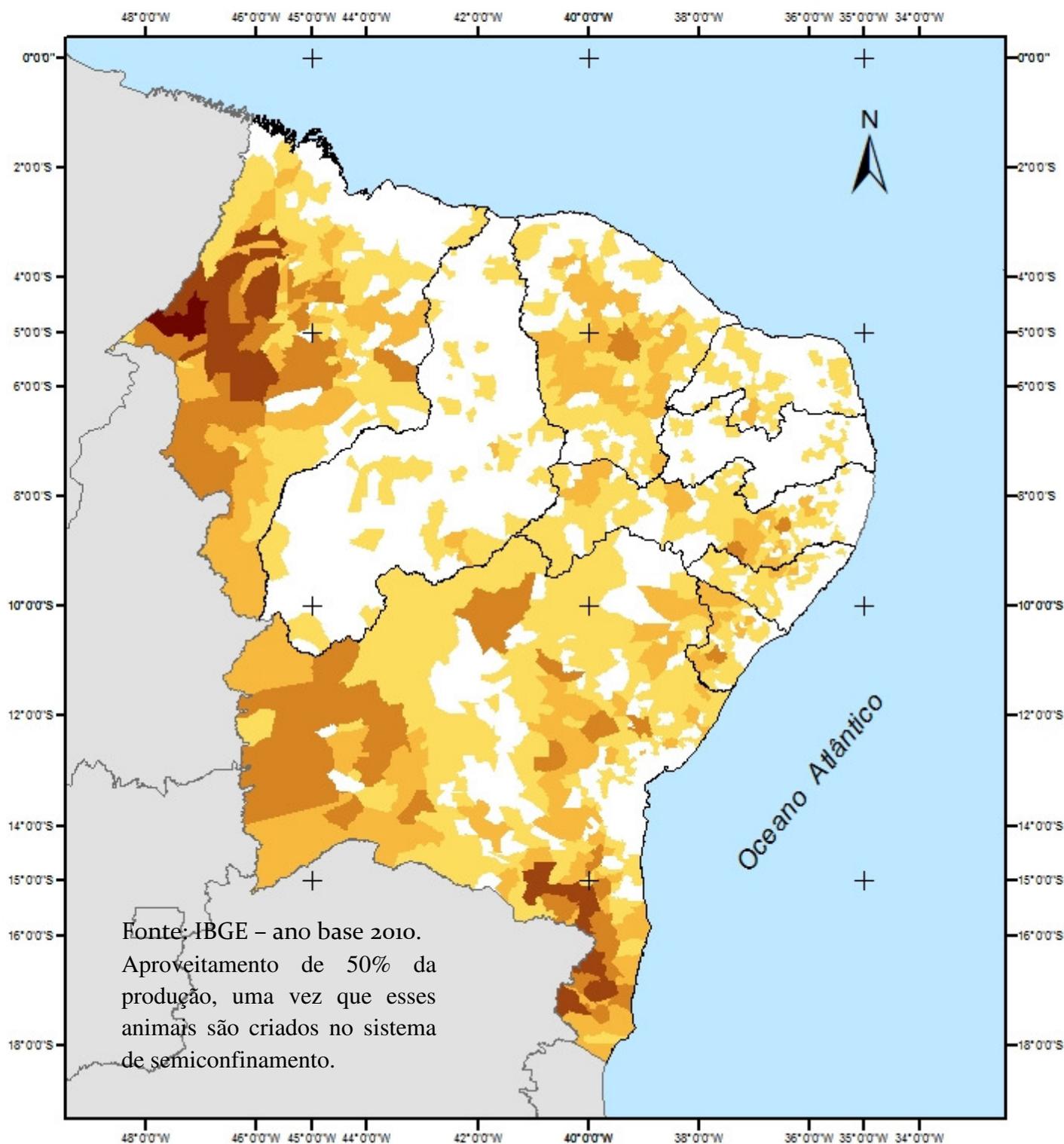
Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



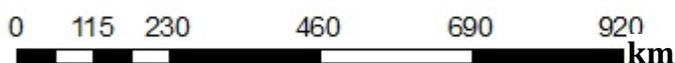
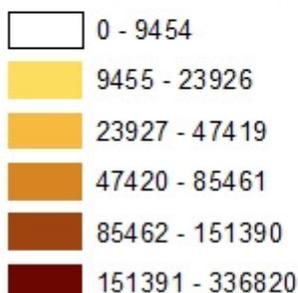
0 115 230 460 690 920 km

Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Esterco Bovino nos Municípios da Região Nordeste

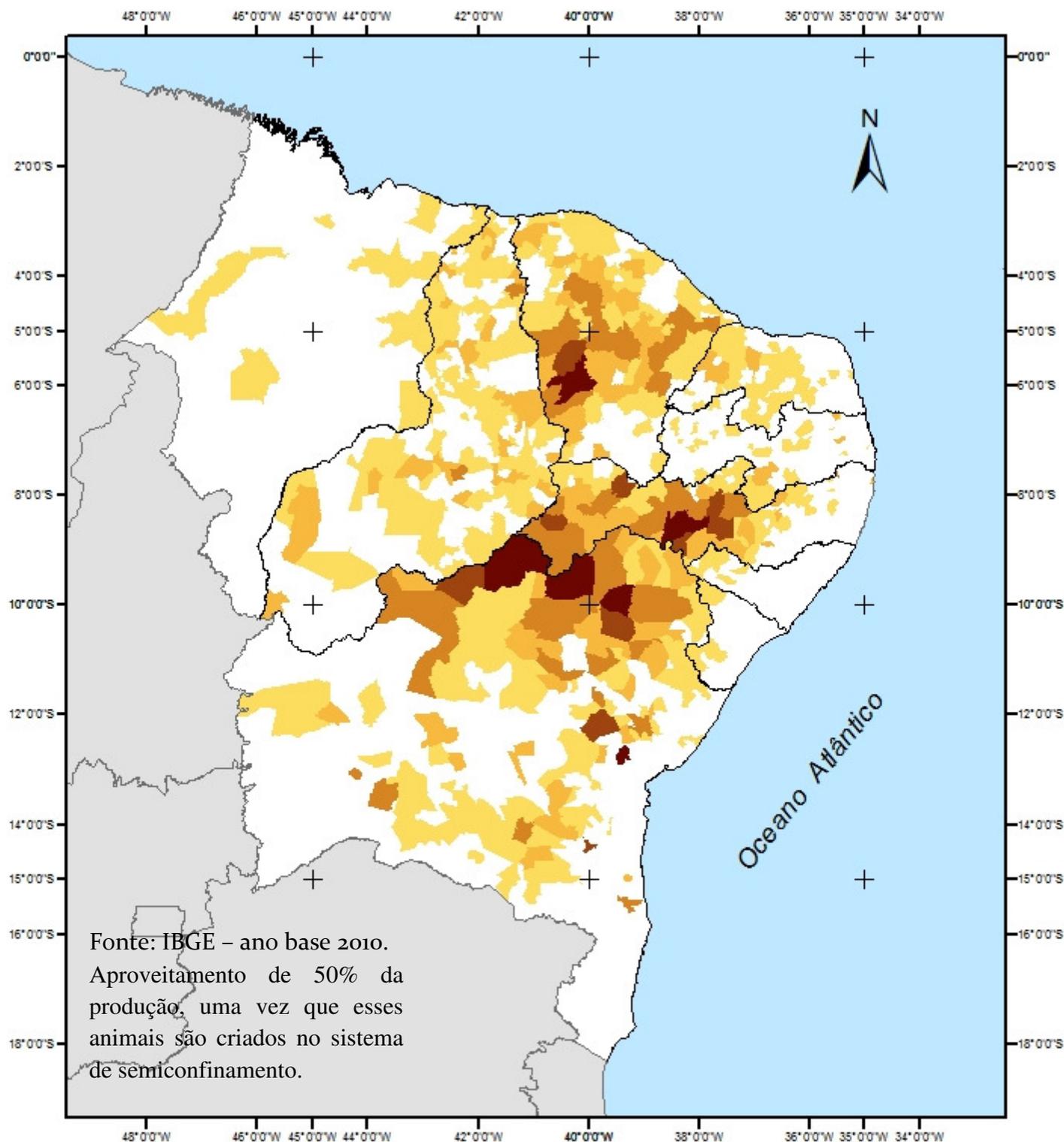


Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Esterco de Caprinos nos Municípios da Região Nordeste

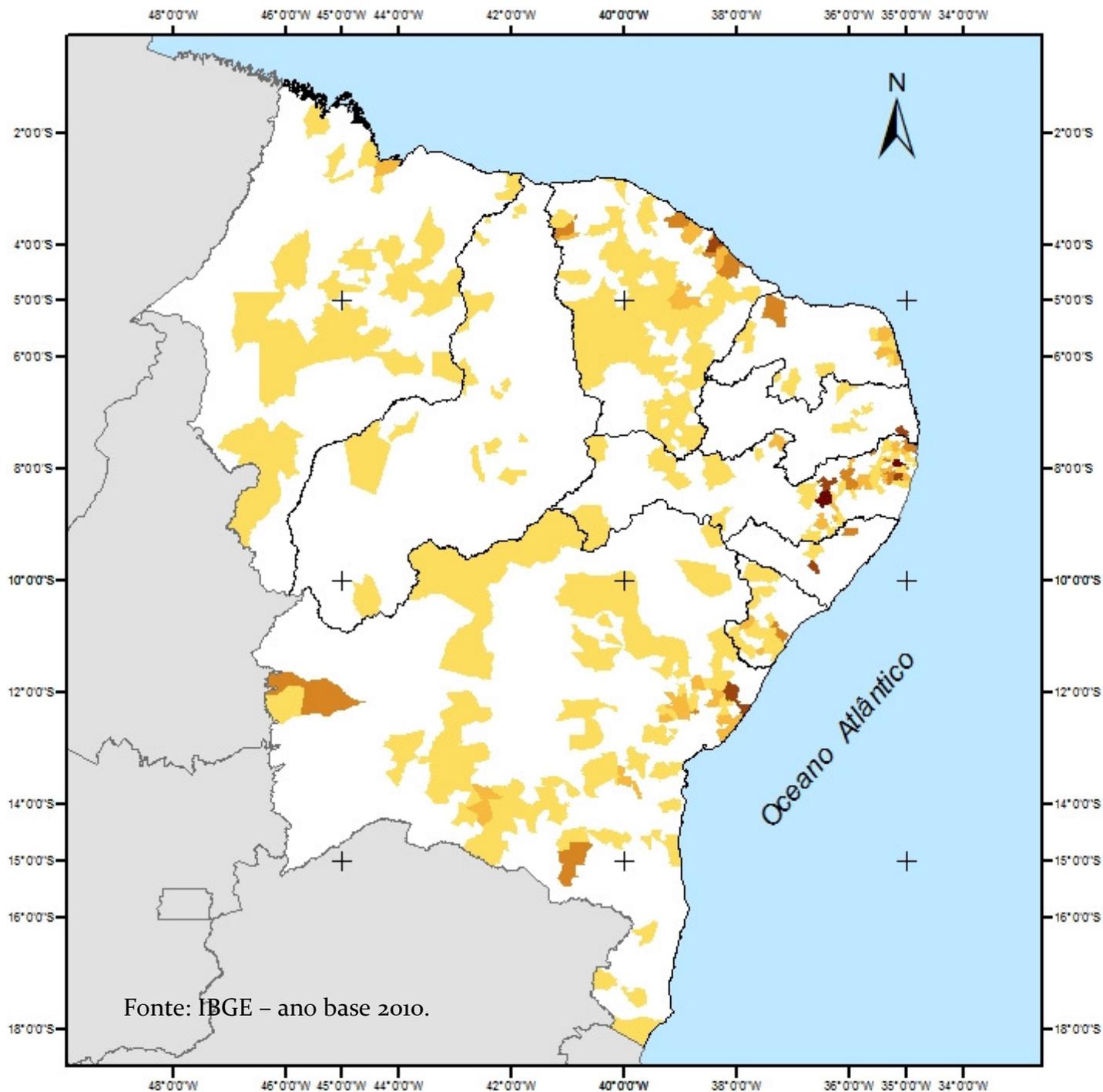


Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹

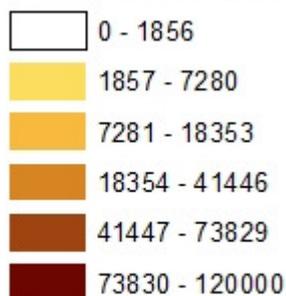


Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Esterco de Aves nos Municípios da Região Nordeste



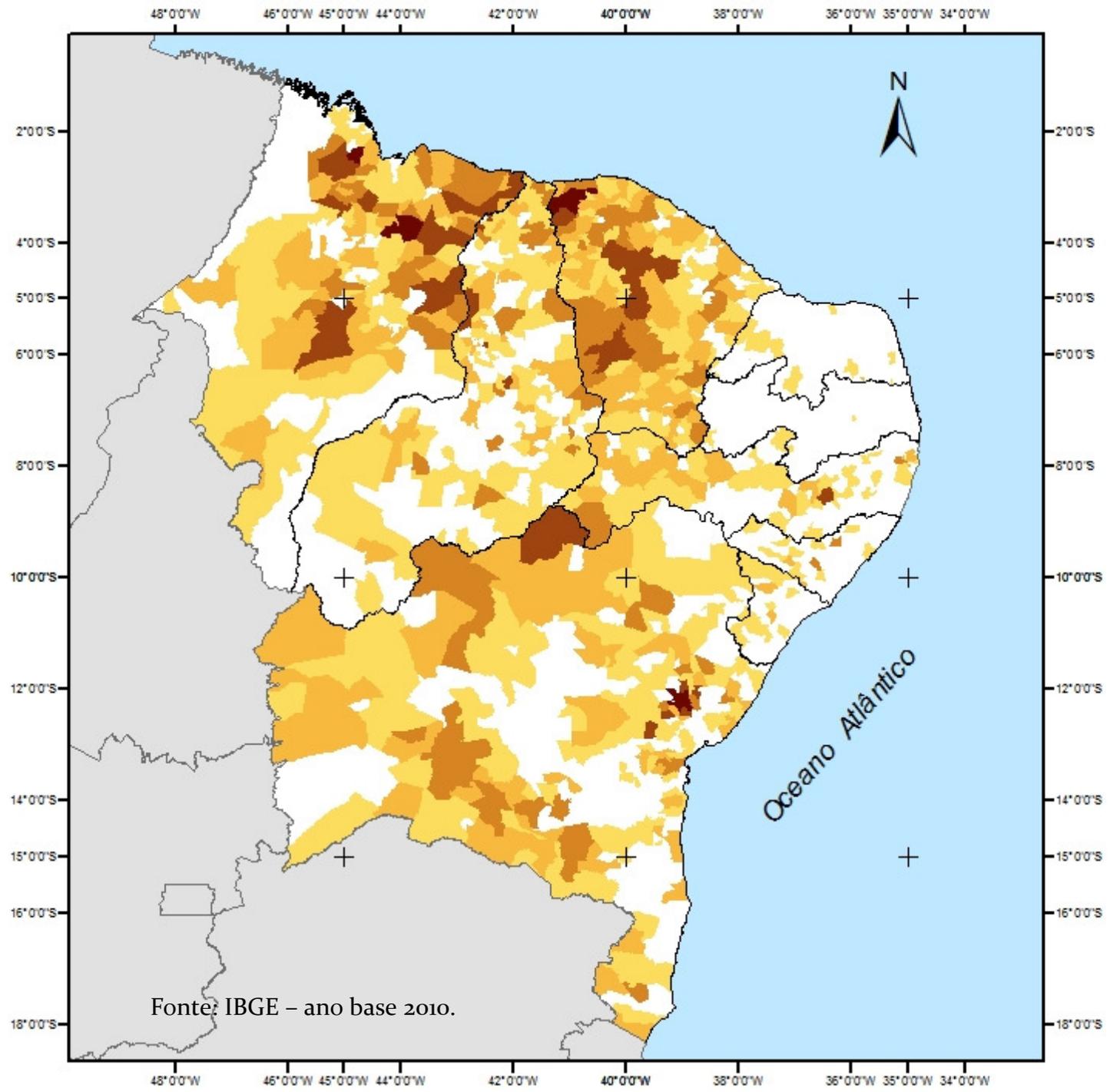
Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



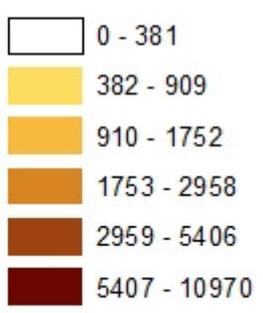
0 125 250 500 750 1.000 km

Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Esterco Suíno nos Municípios da Região Nordeste



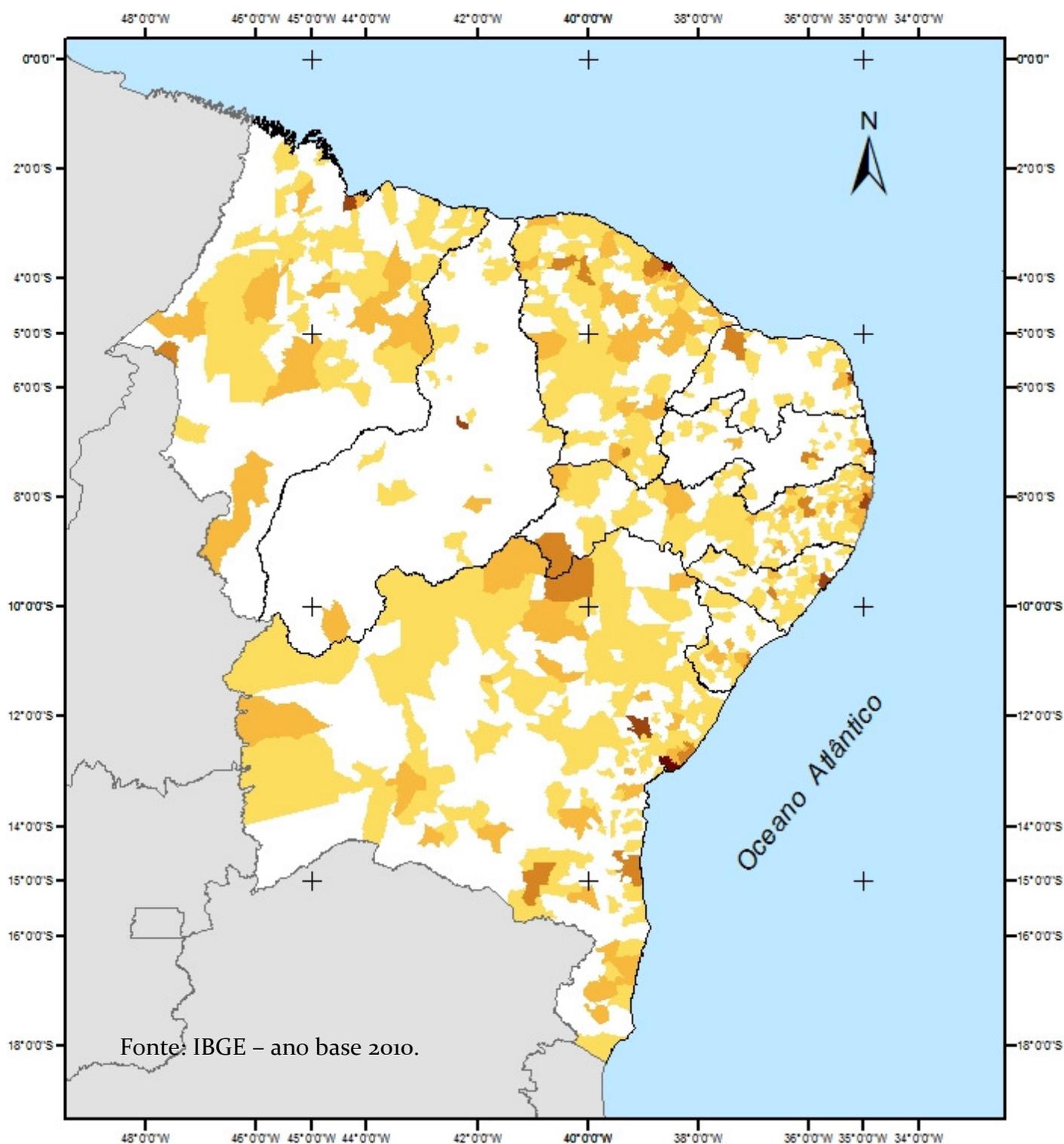
Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



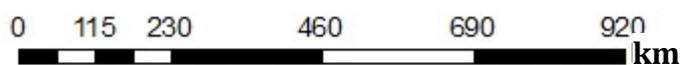
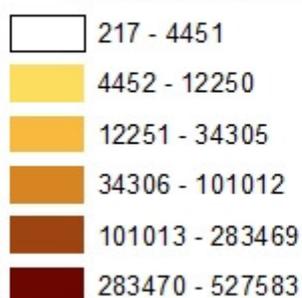
Sistema de Projeção GCS South American 1969



Estimativa da Produção de Resíduos Sólidos Urbanos nos Municípios da Região Nordeste

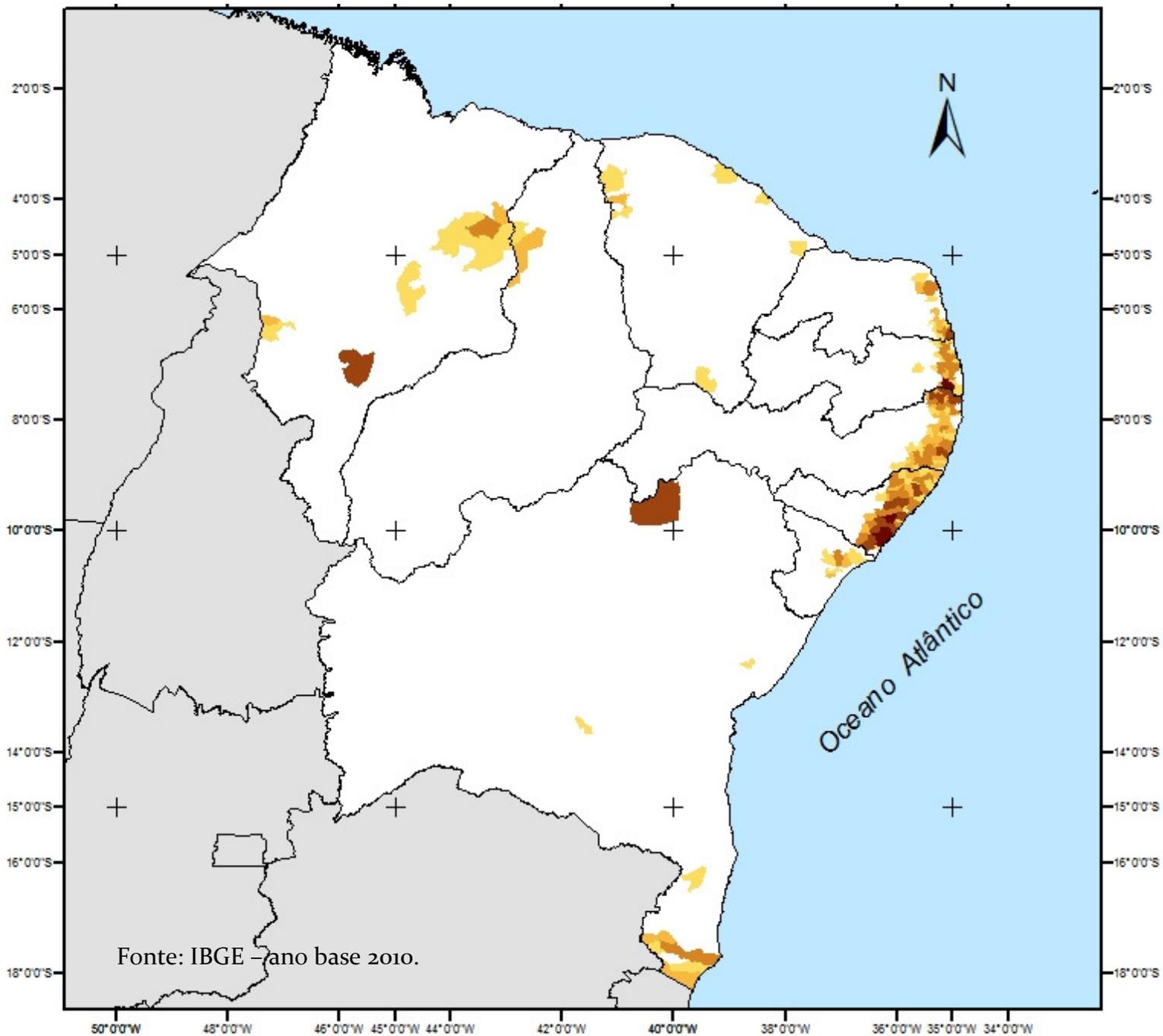


Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹

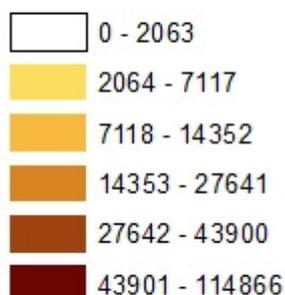


Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa do Potencial da Produção de Etanol nos Municípios da Região Nordeste



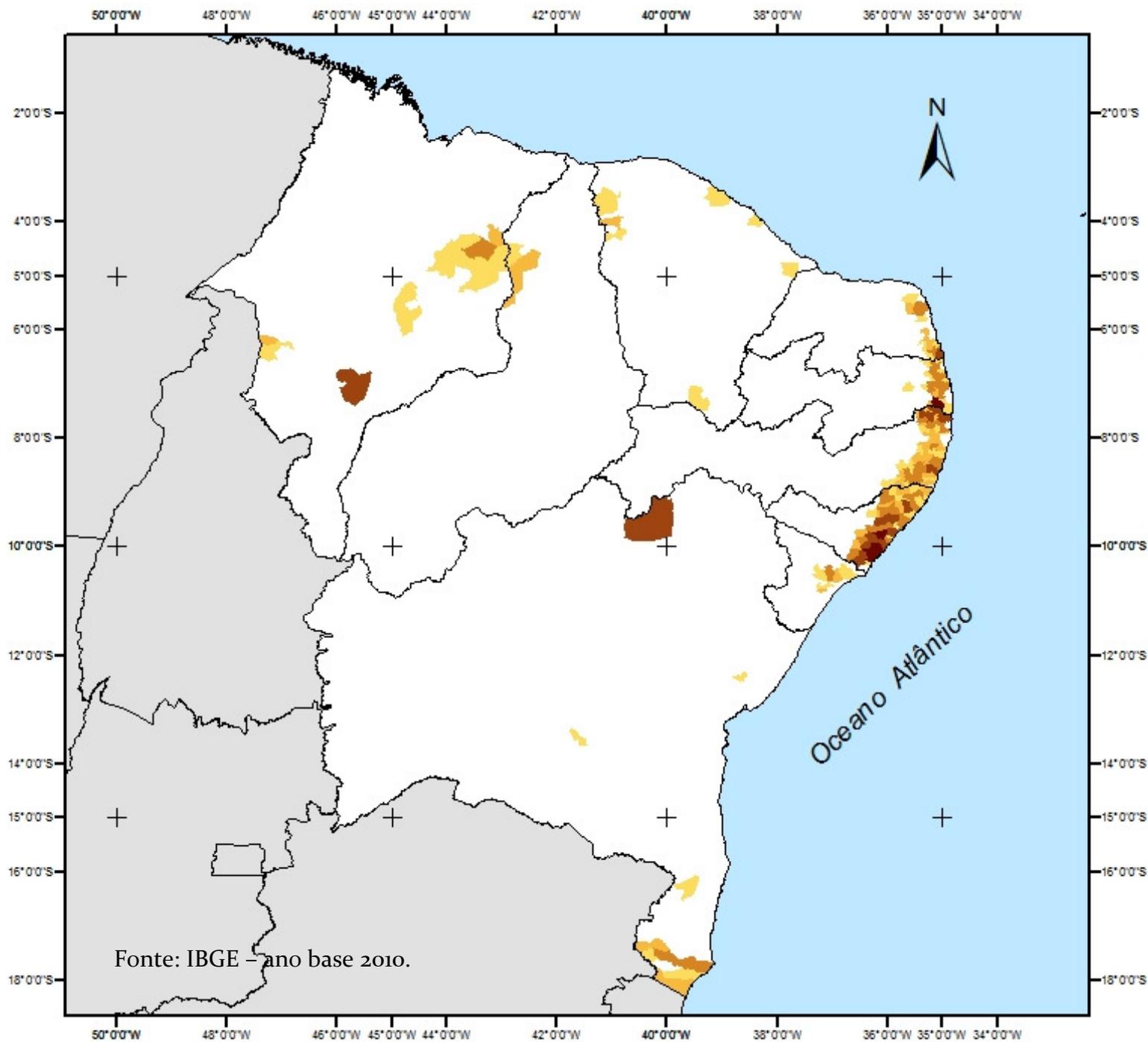
Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



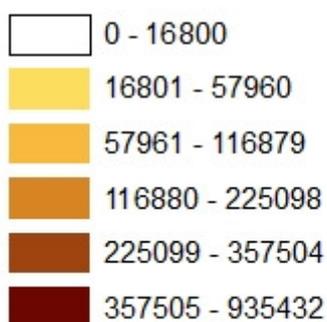
0 105 210 420 630 840 km

Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Bagaço de cana nos Municípios da Região Nordeste



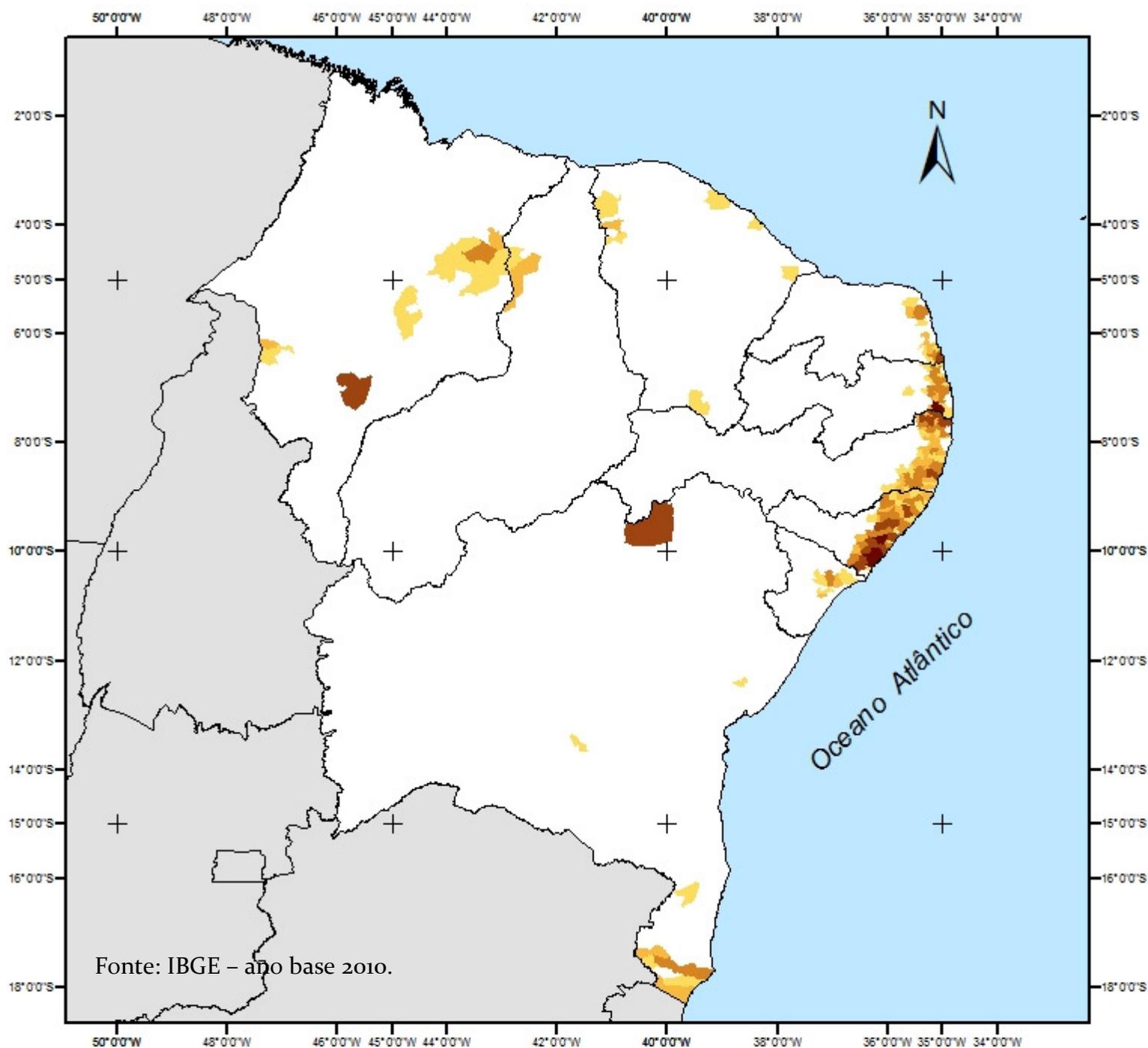
Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



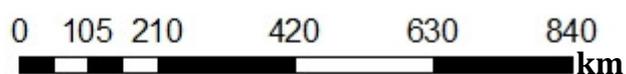
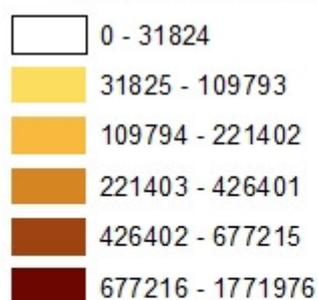
0 105 210 420 630 840 km

Sistema de Projecção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Vinhaça nos Municípios da Região Nordeste

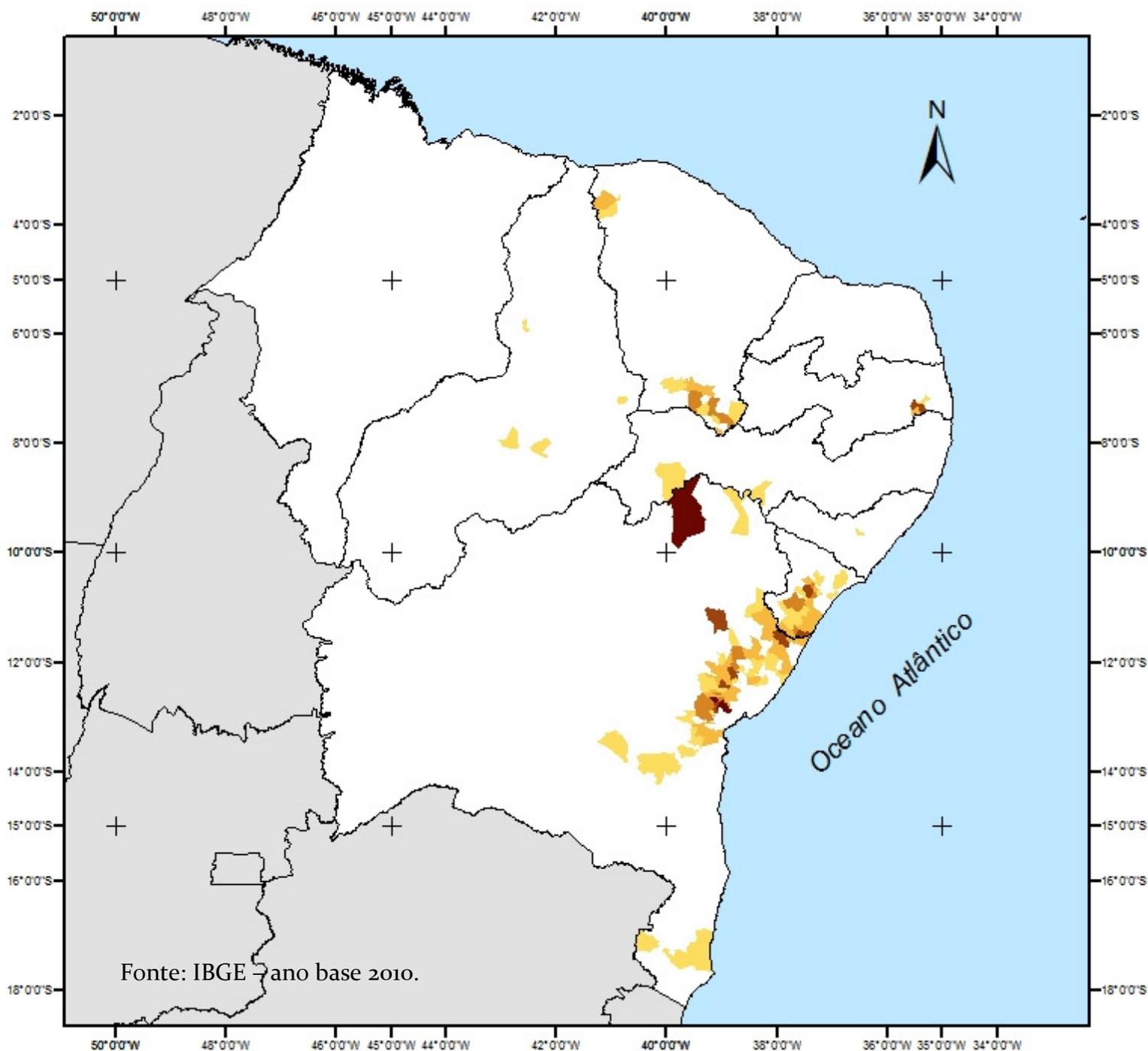


Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹

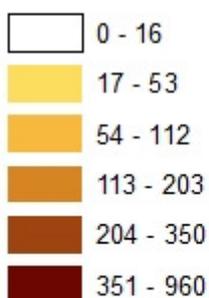


Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Resíduos do Amendoim nos Municípios da Região Nordeste



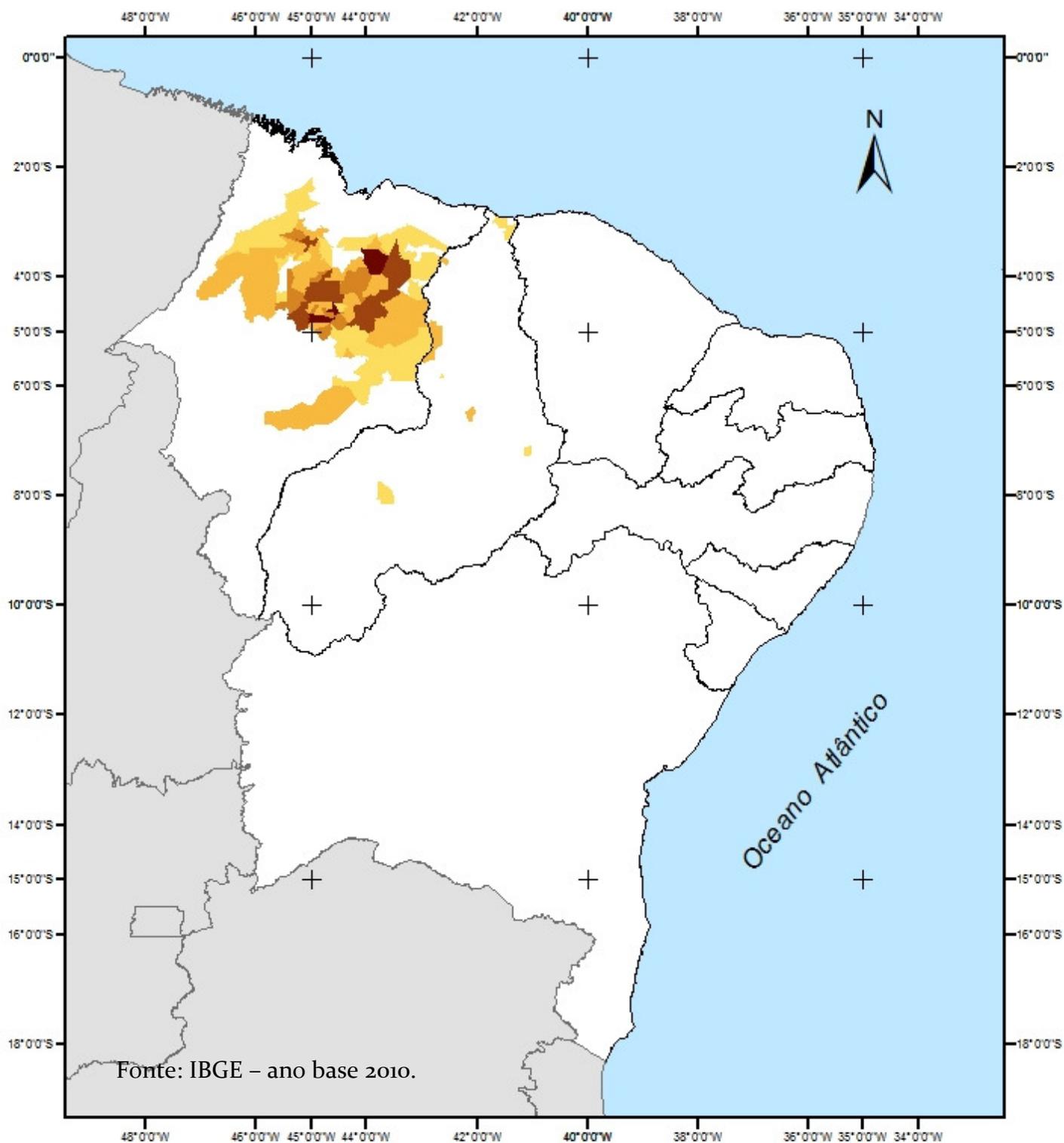
Potencial de Biomassa
Toneladas.ano⁻¹



0 105 210 420 630 840 km

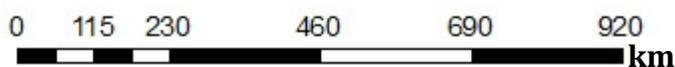
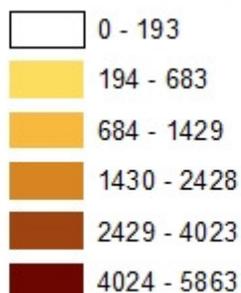
Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Resíduos do Babaçu nos Municípios da Região Nordeste



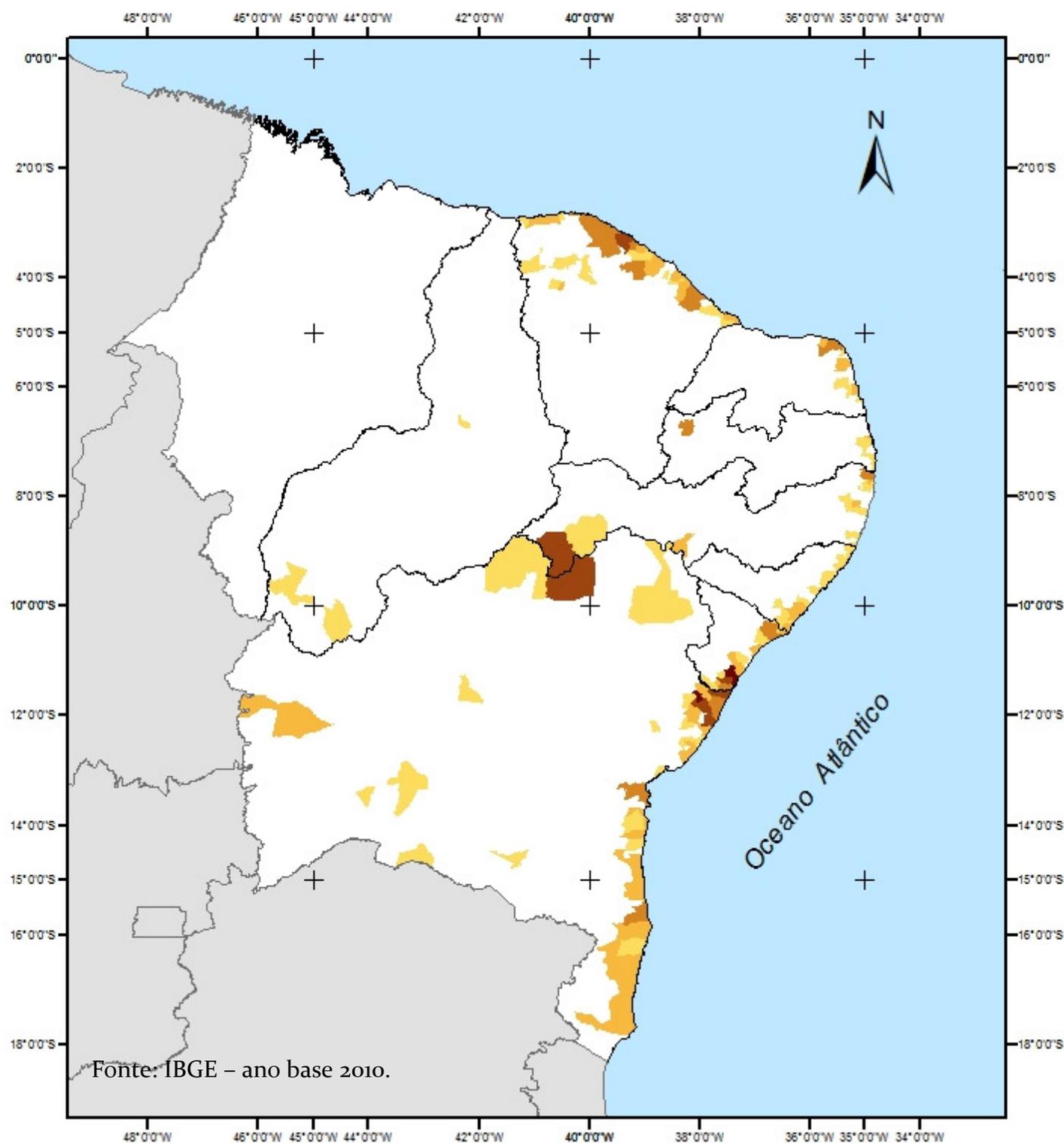
Fonte: IBGE – ano base 2010.

Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹

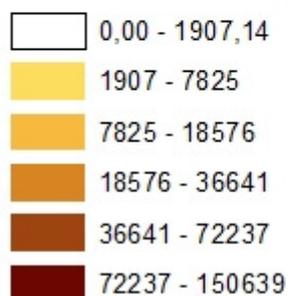


Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Resíduo do Coco-baía nos Municípios da Região Nordeste



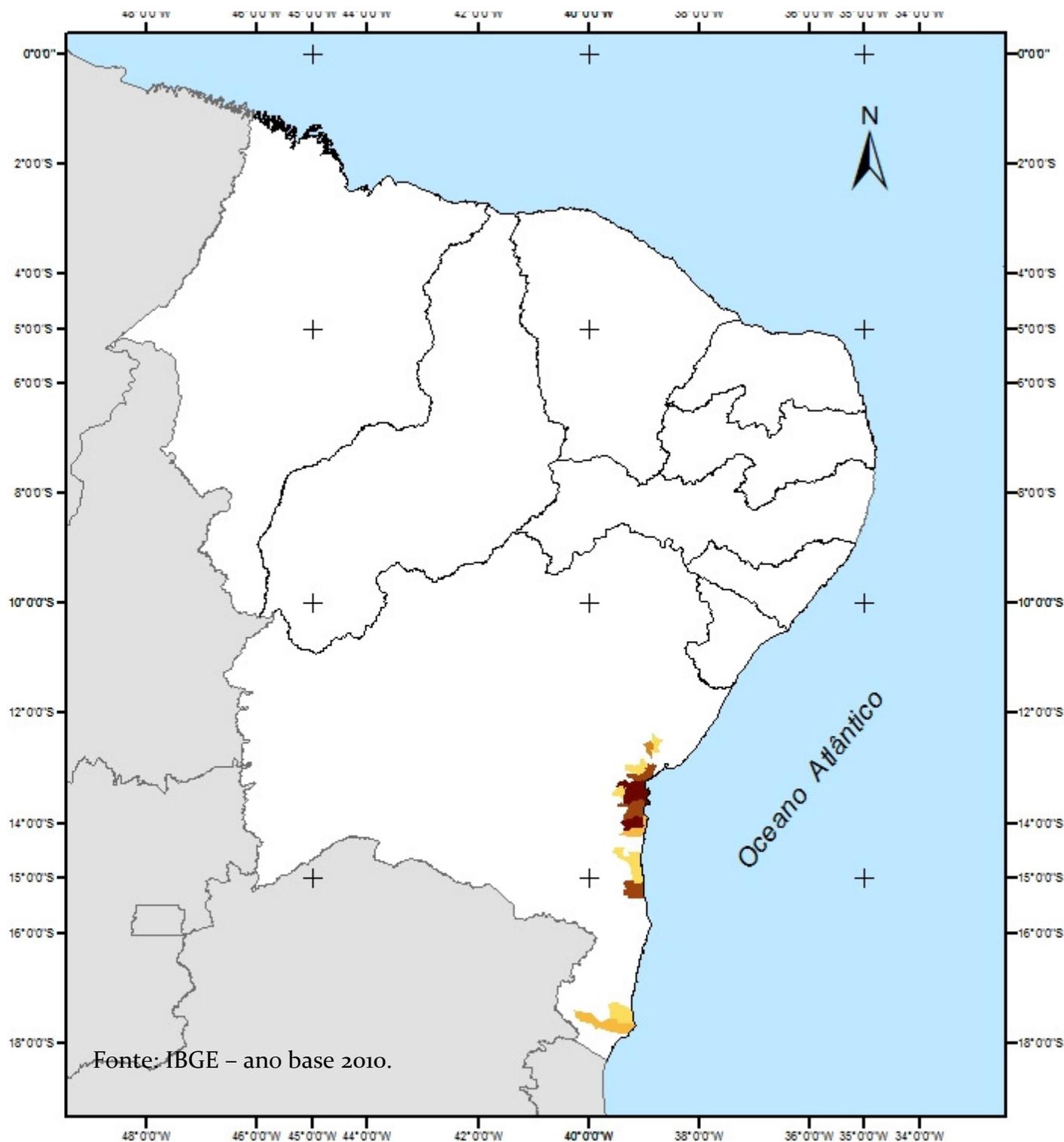
Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



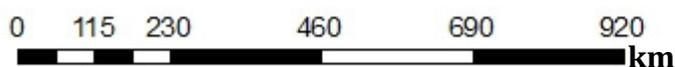
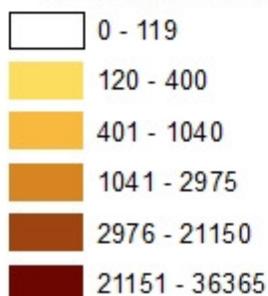
0 115 230 460 690 920 km

Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Resíduo do Dendê nos Municípios da Região Nordeste

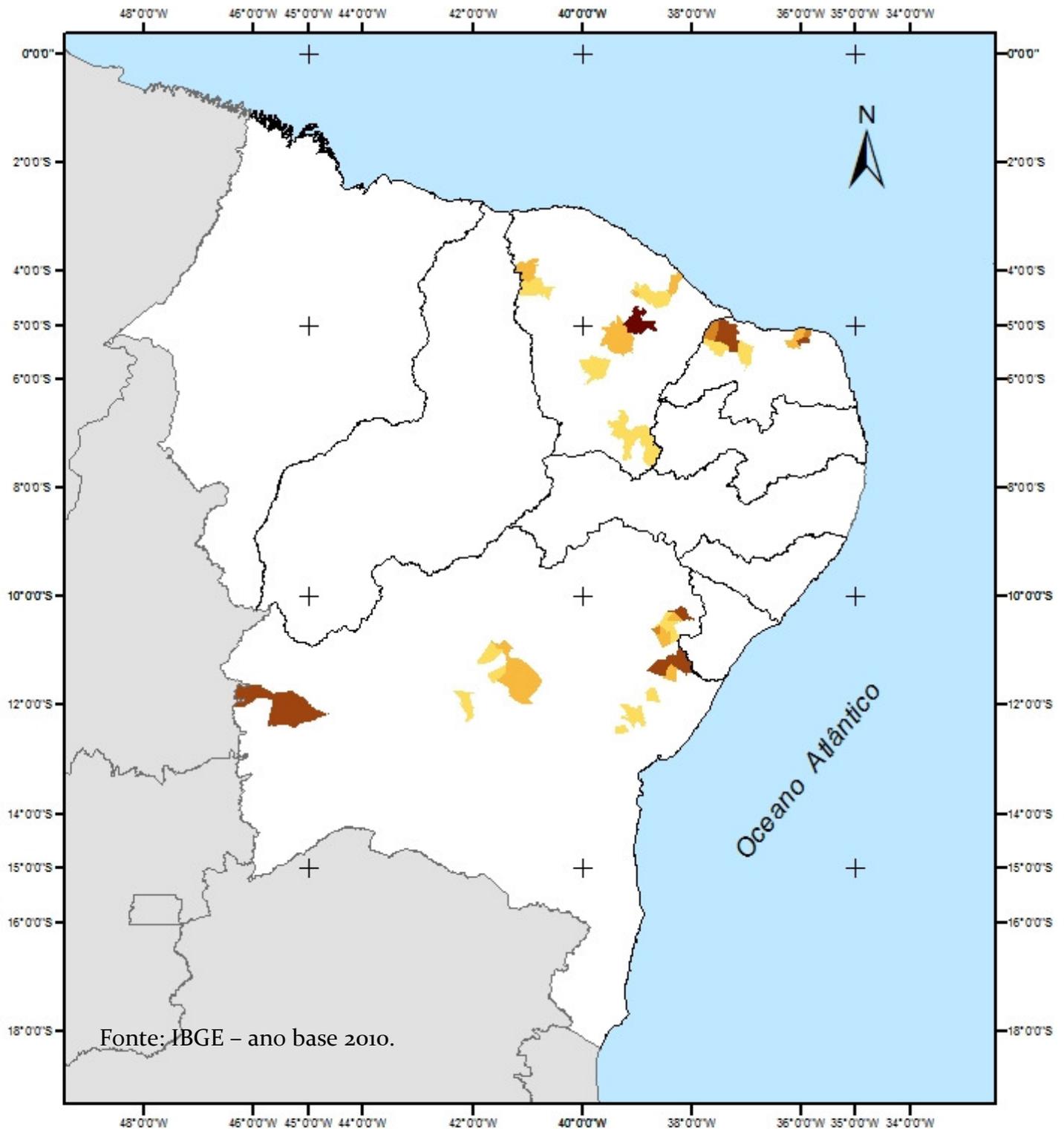


Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹

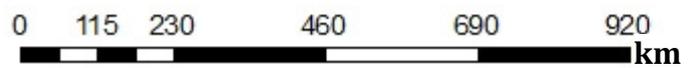
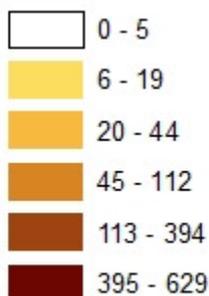


Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Resíduo do Girassol nos Municípios da Região Nordeste

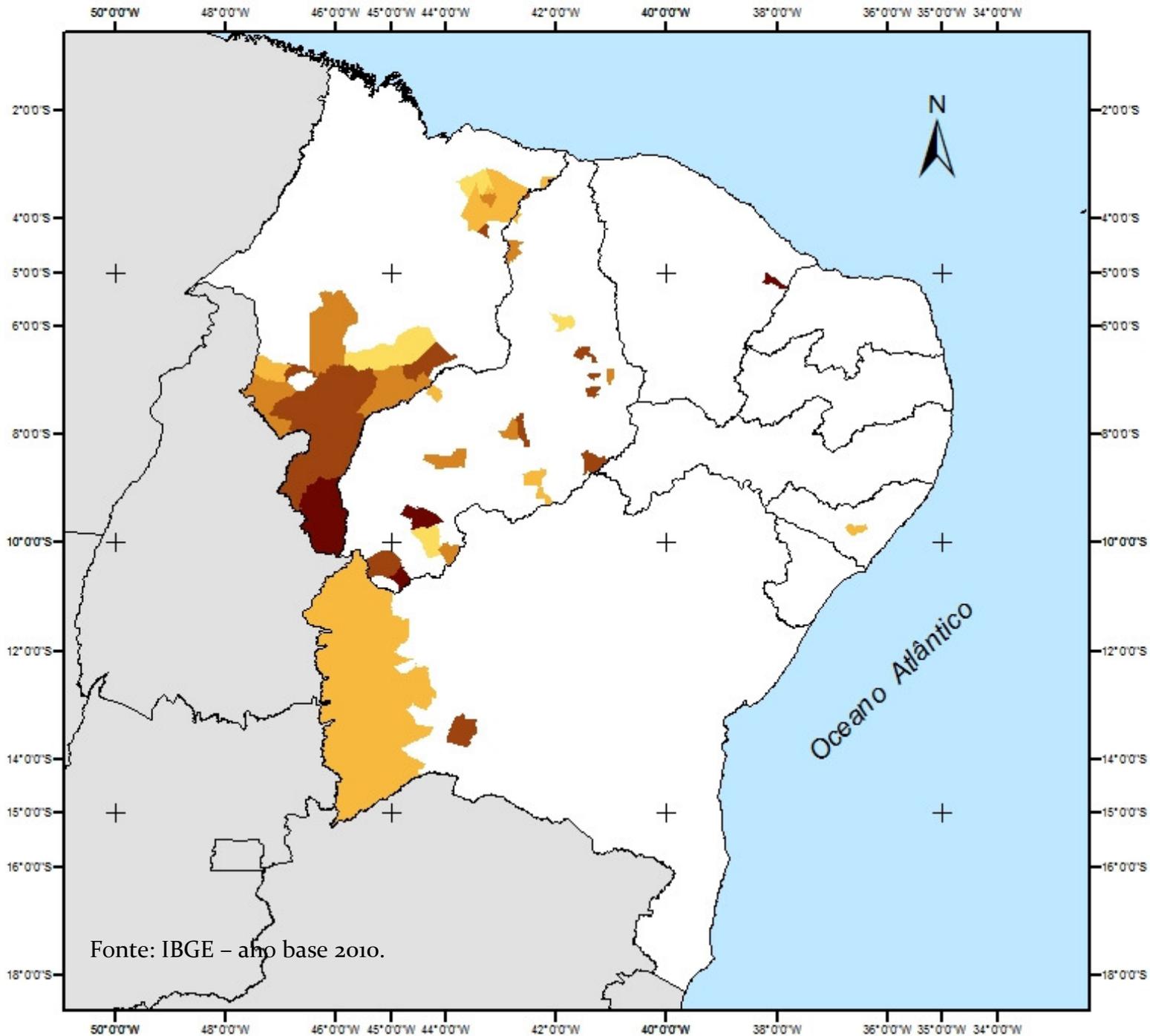


Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹



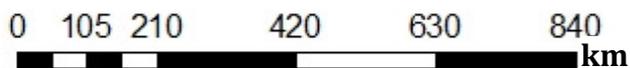
Sistema de Projeção GCS South American 1969

Estimativa da Produção de Resíduo da Soja nos Municípios da Região Nordeste



Potencial de Biomassa Toneladas.ano⁻¹

- 0
- 1 - 1853
- 1854 - 2165
- 2166 - 2378
- 2379 - 2582
- 2583 - 3075



Sistema de Projeção GCS South American 1969

