



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



DISSERTAÇÃO

**ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA  
PARAÍBA POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL**

Marcia Vanessa Gomes Costa

Campina Grande/PB

Agosto/2015

MARCIA VANESSA GOMES COSTA

**ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA  
PARAÍBA POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Área de concentração: **Meteorologia de Meso e Grande Escalas**

Linha de pesquisa: **Sensoriamento Remoto Aplicado**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos

Campina Grande/PB

Agosto/2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C837e Costa, Marcia Vanessa Gomes.  
Estimativa do saldo de radiação na região semiárida da Paraíba por meio de sensoriamento remoto orbital / Marcia Vanessa Gomes Costa. – Campina Grande, 2015.  
90 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro Tecnológico de Ciências Atmosféricas, 2015.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos".  
Referências.

1. Saldo de Radiação. 2. Albedo. 3. Imagens MODIS. 4. Semiárido. 5. Caatinga. I. Santos, Carlos Antonio Costa dos. II. Título.

CDU 551.5(043)

MÁRCIA VANESSA DE MENDONÇA GOMES

ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO NA REGIÃO SEMIÁRIDA DA PARAÍBA  
ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 27/08/2015

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

  
Prof. Dr. RIDELSON FARIAS DE SOUSA  
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Geoprocessamento  
Centro Federal de Educação Tecnológica da Paraíba (PB)  
Tecnologia em Geoprocessamento

*A Deus, que até aqui me susteve com saúde, força e capacidade  
para concluir essa importante etapa em minha vida.*

*Ao meu querido esposo Ewerton Vólney, pelo  
Companheirismo, percorrendo comigo a  
mesma trilha na vida acadêmica.*

*E a minha família.*

*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus (Pai, Filho e Espírito Santo), por ser o Doador da vida, Mantenedor e Consolador. A Ele expressei minha mais profunda gratidão pelo dom da vida, e por Ele fui capaz de obter todas as conquistas. Ele minha fonte de inspiração e que me concedeu perseverança para a conclusão desse trabalho.

Ao meu querido esposo Ewerton Vólney, pelo companheirismo, incentivo, força, compreensão, por toda ajuda a mim concedida, pelo amor e carinho a mim dedicados, e por sempre está ao meu lado nos momentos alegres e mais difíceis da vida.

Ao Professor, Orientador, Dr. Carlos Antonio Costa dos Santos, pela disponibilidade em me orientar, pela força, incentivo e por seus conhecimentos compartilhados.

A minha tia Penha, pelo estímulo e força; ao meu avô José Gomes e ao meu pai Marcos por todo apoio e cuidado.

A Francineide, por sua grande ajuda que foi de fundamental importância para o desenvolvimento desse trabalho, por todo o conhecimento repassado, pela paciência, amizade, compreensão, incentivo e força.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFCG e a todos os professores, pela oportunidade de ingresso no Mestrado em Meteorologia, e pelos conhecimentos transmitidos.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior), pelos recursos financeiros concedidos durante todo o curso.

A secretária do PPGMET, na pessoa de Divanete Rocha da Cruz, secretária, pela amizade, dedicação e competência.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, em especial a Elder, Francisco e Uelpis, pelos conhecimentos compartilhados, pelo apoio e força.

Ao Professor Dr. Ridelson Farias de Sousa, professor do IFPB, meu Orientador da Graduação, por todos os conhecimentos repassados, pelo incentivo, competência e disponibilidade.

Aos meus sogros, Dulcinéa e Sergivaldo, pela compreensão e por todo o apoio prestado durante a fase final desse trabalho.

E a todos, que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão do presente trabalho.

...A todos, muito OBRIGADA!!!!

“Elevo os meus olhos para os montes; de onde me vem o socorro?

O meu socorro vem do Senhor, que fez os céus e a terra.

Não deixará vacilar o teu pé; aquele que te guarda não dormitará.

Eis que não dormitará nem dormirá aquele que guarda a Israel.

O Senhor é quem te guarda; o Senhor é a tua sombra à tua mão direita.

De dia o sol não te ferirá, nem a lua de noite.

O Senhor te guardará de todo o mal; ele guardará a tua vida.

O Senhor guardará a tua saída e a tua entrada, desde agora e para sempre”.

Salmo 121:1-8, Bíblia Sagrada



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE QUADROS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIV
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
2.1 Objetivo Geral .....	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
3.1 O Semiárido Brasileiro.....	21
3.2 O bioma Caatinga .....	23
3.3 Sensoriamento remoto e dados orbitais .....	27
3.4 Balanço de radiação.....	28
3.5 As componentes do saldo de radiação .....	31
3.5.1 Radiação de onda curta incidente .....	31
3.5.2 Coeficiente de reflexão (albedo).....	31
3.5.3 Radiação de onda longa incidente .....	32
3.5.4 Radiação de onda longa emitida .....	32
3.6 NDVI.....	33
3.7 O satélite <i>Terra</i> e o sensor MODIS.....	33
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
4.1 Material.....	36

4.1.1	Descrição da área de estudo e período estudado .....	36
4.1.2	Dados.....	38
4.1.2.1	Produtos <i>MODIS</i> utilizados.....	39
4.1.3	Para o processamento dos dados .....	39
4.2	Métodos .....	40
4.2.1	Obtenção das variáveis componentes do saldo de radiação .....	40
4.2.1.1	Obtenção da radiação de onda curta incidente .....	41
4.2.1.2	Obtenção da radiação de onda longa incidente .....	42
4.2.1.3	Obtenção da radiação de onda longa emitida .....	42
4.2.1.4	Obtenção do albedo de superfície.....	43
4.2.2	Estimativa do Saldo de Radiação.....	43
4.2.3	Análises estatísticas.....	44
4.2.4	Validação dos resultados.....	45
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
5.1	Análise do albedo.....	47
5.2	Análise do saldo de radiação .....	58
5.2.1	Análise do saldo de radiação versus albedo da superfície.....	73
5.2.2	Análise do saldo de radiação versus NDVI.....	75
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Distribuição espacial do bioma Caatinga, na Região Nordeste Brasileira.....	<b>24</b>
<b>Figura 2:</b> Esquema do balanço energético da Terra. ....	<b>30</b>
<b>Figura 3:</b> Mapa de localização da área de pesquisa.....	<b>37</b>
<b>Figura 4:</b> Localização do tile selecionado.....	<b>38</b>
<b>Figura 5.</b> Localização das torres micrometeorológicas nas áreas de caatinga preservada e degradada.....	<b>46</b>
<b>Figura 6:</b> Torres micrometeorológicas nas áreas de caatinga preservada (a) e degradada (b) para obtenção dos dados de superfície.....	<b>46</b>
<b>Figura 7 .</b> Distribuição espacial do albedo no município de Campina Grande, com o produto MCD43-A3, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).....	<b>48</b>
<b>Figura 8.</b> Distribuição espacial do albedo no município de Campina Grande, calculado a partir do produto MOD09-A1, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).....	<b>50</b>
<b>Figura 9.</b> Distribuição temporal dos albedos estimados (albedo MCD43-A3 e albedo MOD09-A1) e medido, para os DOA's estudados para a área preservada.....	<b>55</b>
<b>Figura 10.</b> Distribuição temporal dos albedos estimados (albedo MCD43-A3 e albedo MOD09-A1) e medido, para os DOA's estudados para a área degradada.....	<b>56</b>
<b>Figura 11.</b> Correlação entre o albedo obtido com MOD09-A1 e o MCD43-A3 para as áreas preservada (a) e degradada (b), para os respectivos dias estudados em cada área.....	<b>57</b>
<b>Figura 12. Saldo com o MCD43-A3</b> referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).....	<b>59</b>
<b>Figura 13. Saldo com o MOD09-A1</b> referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).....	<b>61</b>
<b>Figura 14.</b> Mapa do saldo radiativo, obtido utilizando o albedo calculado a partir do produto MOD09-A1, para o município de Campina Grande, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).....	<b>63</b>

<b>Figura 15.</b> Representação gráfica da precipitação média mensal do ano de 2013 para o município de Campina Grande (pluviômetro localizado na sede da EMBRAPA 7° 13' 33" S e 35° 54' 23" O).....	<b>64</b>
<b>Figura 16.</b> Mapa do saldo radiativo, calculado a partir do produto de albedo pronto MCD43-A3, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).....	<b>65</b>
<b>Figura 17.</b> Representação gráfica do saldo de radiação para os dias em estudo na área preservada.....	<b>69</b>
<b>Figura 18.</b> Representação gráfica do saldo de radiação para os dias em estudo na área degradada.....	<b>71</b>
<b>Figura 19.</b> Correlação entre o saldo de radiação obtido com MOD09-A1 e o MCD43-A3 para as áreas preservada (a) e degradada (b), para os respectivos dias estudados em cada área.....	<b>72</b>
<b>Figura 20.</b> Dispersão entre o albedo e o saldo de radiação estimados para área preservada e degradada, ambos calculados com o MCD43-A3 e com o MOD09-A1....	<b>75</b>
<b>Figura 21.</b> Mapa do <b>NDVI</b> , referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).....	<b>76</b>
<b>Figura 22.</b> Correlações lineares entre o saldo de radiação MCD43-A3 (a) e o saldo de radiação com o MOD09-A1(b) com o NDVI, para a área preservada (para os dias de ordem do ano: 25, 33, 57, 65 81, 105, 137, 169, 193, 209, 217, 233, 249, 281, 289, 313, 329 e 361).....	<b>79</b>
<b>Figura 23.</b> Correlações lineares entre o saldo de radiação MCD43-A3 (a) e o saldo de radiação com o MOD09-A1(b) com o NDVI, para a área degradada (para os dias de ordem do ano: 81, 105, 137, 169, 193, 209, 217, 233, 249, 281, 289, 313 e 361).....	<b>79</b>

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Resultados do cômputo dos albedos para a área de caatinga preservada, utilizando os produtos MCD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).....52
- Tabela 2.** Resultados do cômputo dos albedos para o ponto da torre experimental em área de caatinga degradada, utilizando os produtos MCD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto .....54
- Tabela 3.** Resultados da aplicação do teste estatístico *t*-Student para os albedos estimados (MCD43-A3 e MOD09-A1), onde  $R^2$  é o coeficiente de determinação,  $r$  é o coeficiente de correlação,  $gl$  é o número de graus de liberdade,  $t$ -calculado e  $t$ -crítico.....57
- Tabela 4.** Resultados do saldo radiativo, utilizando albedos obtidos com o MOD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos na torre em área de caatinga preservada, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).....67
- Tabela 5.** Resultados do saldo radiativo, utilizando albedos obtidos com o MOD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos na torre em área de caatinga degradada, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).....68
- Tabela 6.** Valores da radiação de onda curta -  $R_s \downarrow$  estimada e medida para os dias estudados na área de caatinga preservada.....70
- Tabela 7.** Valores da radiação de onda curta -  $R_s \downarrow$  estimada e medida para os dias estudados na área de caatinga degradada.....71
- Tabela 8.** Resultados da aplicação do teste estatístico *t*-Student, onde  $R^2$  é o coeficiente de determinação,  $r$  é o coeficiente de correlação,  $gl$  é o número de graus de liberdade,  $t$ -calculado e  $t$ -crítico.....73
- Tabela 9.** Resultados estimados do saldo radiativo (para os dois tipos de cômputo) -  $R_n$ , radiação de onda curta incidente -  $R_s \downarrow$  e NDVI, para a área preservada e degradada.....78

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Produtos MODIS utilizados na pesquisa.....	39
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer  
AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer  
CERES – Clouds and the Earth’s Radiant Energy System Network  
BRDF - Bidirectional Reflectance Distribution Function  
DOA – Dia de Ordem do Ano  
EMA – Erro médio absoluto  
EMP – Erro médio percentual  
EOS – Earth Observing System  
EP – Erro Percentual  
HDF – Hierarchical Data Format  
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis  
IBGE – Instituto Brasileiro de geografia e Estatística  
INSA - Instituto Nacional do Semiárido  
LIDAR - *Light Detection And Ranging*  
MISR - *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*  
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer  
MOPITT - Measurements of Pollution in the Troposphere  
MRT – MODIS Reprojection Tool  
NASA – National Aeronautics and Space Administration  
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index  
NEB – Nordeste Brasileiro  
PB - Paraíba  
RADAR – Radio Detection And Ranging  
SONAR – Sound Navigation and Ranging  
TSM – Temperatura da Superfície do Mar  
TM – Thematic Mapper  
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

## RESUMO

A energia total que incide sobre a superfície da Terra, afeta diretamente o balanço de radiação à superfície de forma diferenciada, a depender de aspectos biogeofísicos. A obtenção dos fluxos energéticos torna possível o estudo da dinâmica temporal de uma região específica, porém nem sempre é possível obter tais dados, devido ao número limitado de estações micrometeorológicas existentes e/ou disponíveis. Para tanto, torna-se possível a estimativa desses fluxos, como também de índices vegetativos através da utilização de imagens orbitais. O objetivo do presente trabalho é comprovar a eficácia de produtos MODIS/Terra para a estimativa do saldo de radiação para a região semiárida da Paraíba, que é uma região onde predomina o bioma Caatinga, sem a utilização de dados auxiliares de superfície. Foram utilizadas imagens referentes aos dias de ordem do ano: 25, 33, 57, 65, 81, 105, 137, 169, 193, 209, 217, 233, 249, 281, 289, 313, 329 e 361, do ano de 2013, que recobrem o Estado da Paraíba. A metodologia utilizada foi baseada em equações propostas por Bisht e Bras (2011). A validação dos resultados foi realizada com dados de duas torres micrometeorológicas experimentais, ambas estão localizadas em área de caatinga preservada e degradada, situadas no município de Campina Grande, na Paraíba. Para chegar ao resultado do saldo de radiação instantâneo, foram utilizados albedos computados de duas formas: utilizando o MCD43-A3 e o MOD09-A1. Os valores de albedo foram maiores na área degradada. Embora as estimativas tenham sofrido superestimação e subestimação, foi possível comprovar a eficácia do produto MODIS de albedo pronto (MCD43-A3) para a estimativa do saldo de radiação, com o EMP e o EMA de 16,48% e de 79,95 W/m<sup>2</sup>, respectivamente; em contrapartida, o saldo obtido com o MOD09-A1 foi mais satisfatório para a área preservada, com EMP de 16,91% e EMA de 94,35 W/m<sup>2</sup> para a área degradada. O NDVI apresentou uma correlação negativa com o saldo de radiação.

**Palavras-chave:** saldo de radiação, albedo, imagens MODIS, semiárido, caatinga.



## ABSTRACT

The total energy falling on the surface, directly affects the radiation balance at the surface in different ways, depending on biogeophysical aspects. Obtaining of energy flows makes it possible to study the temporal dynamics of a specific region, but it is not always possible to obtain such data, due to the limited number of micrometeorological stations and / or available. Therefore, it becomes possible to estimate these flows, as well as vegetation indices using satellite images. The objective of this study is to prove the effectiveness of product MODIS / Terra to estimate the net radiation for the semi-arid region of Paraíba, which is a region dominated the Caatinga biome, without the use of auxiliary surface data. Images were used referring to days order of year 25, 33, 57, 65, 81, 105, 137, 169, 193, 209, 217, 233, 249, 281, 289, 313, 329 and 361, the year 2013 that cover the state of Paraíba. The methodology used was based on equations proposed by Bisht and Bras (2011). The validation of the results was performed with two micrometeorological towers experimental data, both are located in preserved and degraded area, located in the city of Campina Grande, Paraíba. To get to the result of the instantaneous net radiation, computed albedos were used in two ways: using the MCD43-A3 and the MOD09-A1. The albedo values were higher in degraded areas. Although estimates have been overestimation and underestimation, it was possible to prove the effectiveness of MODIS Product ready albedo, MCD43-A3, with EMP 16.48% for the radiation balance and the EMA was 79.95 W / m<sup>2</sup>; on the other hand, the balance obtained with the MOD09-A1 was more suitable for the preserved area with EMP 16.91% and EMA of 94.35 W / m<sup>2</sup> for the degraded area. The NDVI showed a negative correlation with the radiation balance.

**Key words:** net radiation, albedo, MODIS images, semiarid, caatinga.

## 1. INTRODUÇÃO

Regiões de clima semiárido estão constantemente sob o efeito de intensa radiação solar. Os efeitos e causas do aumento da temperatura é um dos assuntos mais discutidos por estudiosos em âmbito global. A energia total incidente afeta diretamente o balanço de radiação à superfície, e isso ocorre de forma diferenciada, a depender de sua intensidade de emitância, das condições atmosféricas para absorção, reflexão, transmitância, reemitância, espalhamento; além de fatores topográficos e diversos outros fatores ambientais e antrópicos.

De acordo com Suassuna (2002), um fator natural que tem influência marcante nas características climáticas do Nordeste Brasileiro (NEB) é a proximidade da linha do Equador. As baixas latitudes condicionam à região temperaturas elevadas (média de 26° C), número elevado de horas de sol por ano (estimado em cerca de 3.000) e índices acentuados de evapotranspiração, devido à incidência perpendicular dos raios solares sobre a superfície do solo.

A Caatinga é um bioma genuinamente pertencente ao Brasil, e possui características peculiares. Por causa da associação da Caatinga ao déficit hídrico da região semiárida, muitos têm a visão de que ela é um bioma pobre, onde existe pouca vida, mas na verdade esta “esconde” uma grande diversidade de espécies biológicas. O clima da Caatinga é classificado como semiárido (de acordo com a classificação de Köppen), e quando comparado ao clima de outros biomas brasileiros, apresenta muitas características extremas dentre as quais estão: o mais alto índice de radiação solar, a mais alta temperatura média anual, as mais baixas taxas de umidade relativa, baixa nebulosidade, índices elevados de evapotranspiração potencial e, sobretudo, baixos índices pluviométricos.

As trocas de energia radiativa de fluxos de calor e umidade são indispensáveis para o desenvolvimento da biosfera. Os meteorologistas sempre consideraram o mapeamento da energia solar que alcança a superfície como o principal objeto para fornecer informações para engenheiros e cientistas que trabalham na agricultura, projetos de construção e outras esferas da economia onde a energia solar desempenha um papel importante (RIMÓCZI – PAÁL, 2005).

O saldo de radiação à superfície é o resultado dos fluxos de energia radiativa descendentes e ascendentes de onda curta e longa, que se dá entre a superfície e a atmosfera. A radiação solar é imprescindível à vida terrestre, tendo papel fundamental no processo de formação e desenvolvimento biológico dos seres vivos. De acordo com Silva et al. (2005), o saldo de radiação exerce um papel fundamental nos processos de troca de calor e massa na baixa troposfera, uma vez que se constitui no principal responsável pelo aquecimento do solo, do ar e principalmente, pela evapotranspiração da vegetação nativa e das culturas. Portanto, os fluxos radiativos são as fontes primordiais que determinam a temperatura (do ar, da terra, e dos oceanos), e conseqüentemente influenciam o movimento e circulação do ar (a partir do gradiente de temperatura); o que acaba determinando as condições climáticas em todas as escalas.

A quantificação da radiação líquida ( $R_n$ ), bem como a análise de suas componentes, torna-se de suma importância para o estudo dos processos de interação superfície-atmosfera. Servindo de fundamentação na aplicabilidade em diversas subáreas de estudos, como hidrologia, agricultura, clima e tempo, energias renováveis, etc. A obtenção correta do saldo radiativo servirá de base para estudos complementares, como estimar os fluxos de energia à superfície, e  $R_n$  serve como parâmetro de partida para estimar espacialmente a evapotranspiração.

Os dados orbitais vêm sendo utilizados com bastante frequência, no que se diz respeito a estudos climáticos e ambientais e tem sido cada vez mais empregado para o estudo dos fluxos energéticos. Isto é devido à possibilidade de estudar e analisar áreas de maior abrangência territorial simultaneamente. Observações feitas através de sensoriamento remoto fornecem praticamente um “instantâneo” de informações radiativas da superfície terrestre. Apesar disso, ainda há certa carência de integração de dados diurnos de fluxos de superfícies a partir de observações instantâneas. As principais vantagens de trabalhar com dados de sensoriamento remoto são: abrangência de áreas quilométricas (levando em consideração uma cena de uma imagem); e permitem calcular índices climáticos e ambientais de áreas bastante superiores, se comparadas a aquelas medidas com sensores instalados à superfície, tendo em vista que os dados de superfície são pontuais. Nesse contexto, os dados do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), sensor a bordo dos satélites Terra e Aqua, são de grande contribuição para as pesquisas no que condiz a estudos de sistemas de observações terrestres em âmbito mundial.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Utilizar uma metodologia que não necessite de dados de superfície para estimar o saldo de radiação à superfície na região semiárida do estado da Paraíba, a partir de dados orbitais do sensor MODIS; e validar os resultados obtidos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Obter dados e produtos derivados do sensor MODIS;
- Computar as variáveis biofísicas (componentes do saldo de radiação), obtidas a partir de dados e produtos derivados MODIS;
- Estimar o fluxo de radiação líquida instantânea, a partir de imagens MODIS-*Terra*;
- Estimar o NDVI utilizando produto MODIS para fins de comparação com o saldo de radiação;
- Analisar o albedo e o saldo de radiação;
- Validar as estimativas de albedo e de radiação líquida instantânea, utilizando dados medidos à superfície a partir de duas torres micrometeorológicas localizadas no bioma Caatinga.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 O Semiárido Brasileiro**

O Semiárido Brasileiro, segundo dados oficiais do Ministério da Integração, abrange uma área de 969.589,4 km<sup>2</sup> e compreende 1.133 municípios de nove estados do Brasil: Alagoas, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Abriga uma população em cerca de 22 milhões de habitantes (que representa 11,8% da população brasileira), sendo a região semiárida mais populosa do mundo. Possui um clima definido por quatro dos principais sistemas de circulação atmosférica que, ao passarem pela região, provocam longos períodos secos e chuvas ocasionais concentradas em poucos meses do ano, provocados por fenômenos naturais (MOURA et al., 2007).

O clima do Nordeste também sofre a influência de outros fenômenos, tais como: El Niño, que interfere principalmente no bloqueio das frentes frias vindas do sul do país, impedindo a instabilidade condicional na região, e a formação do dipolo térmico atlântico, caracterizado pelas variações de temperaturas do oceano Atlântico, variações estas favoráveis às chuvas no Nordeste, quando a temperatura do Atlântico sul está mais elevada do que aquela do Atlântico norte (SUASSUNA, 2002).

No geral, o semiárido brasileiro tem a maior parte do seu território coberto pela Caatinga – único bioma exclusivamente brasileiro e rico em espécies endêmicas. E uma das características dessa região é o déficit hídrico, ocasionado pela má distribuição da pluviosidade e pelo regime escasso de chuvas, apresentando os mais baixos índices pluviométricos (em torno de 500 a 800 mm anuais) – com grande variabilidade espacial e temporal (OLIVEIRA et al., 2006).

De acordo com Oyama (2003), as áreas mais secas da zona semiárida, cuja precipitação anual é inferior a 500 mm, totalizam cerca de 309.000 km<sup>2</sup> e são as mais susceptíveis à desertificação no Brasil. A acentuada variabilidade da pluviometria em um mesmo ano na Região Nordeste está associada a variações de padrões da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre os oceanos tropicais, os quais afetam a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico, assim como às anomalias de temperatura observadas no Oceano Pacífico, que resultam em anos com *La Niña* e/ou *El Niño*. (AGEITEC, 2012).

No semiárido paraibano, acompanha a gênese do clima e solo que se relacionam entre si. A descrição fisiográfica da vegetação comporta a caracterização típica deste ambiente. Implantada nos terrenos cristalinos, a vegetação do tipo caatinga apresenta aspectos distintos de porte arbóreo arbustivo que se distribuem gradativamente em toda zona seca da região (NETO, 2003). A economia é baseada principalmente na pecuária extensiva, onde se destaca a ovinocaprinocultura; e na agricultura familiar. O semiárido paraibano abriga o município com o menor índice pluviométrico anual já observado no Brasil, 278 mm/ano; além disso, no sertão o período chuvoso compreende, normalmente, apenas dois meses do ano, podendo até em alguns anos ser inexistente, ocasionando as secas regionais.

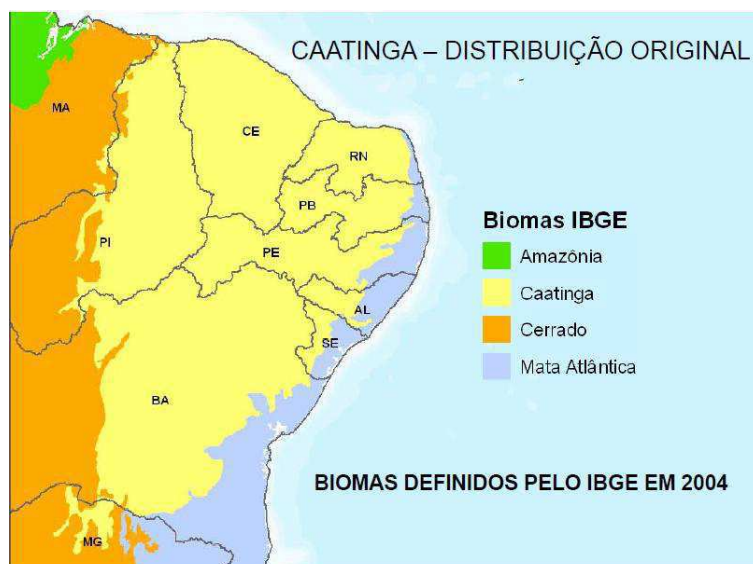
Grande parte do semiárido da Paraíba enfrenta sérios problemas de erosão e redução de fertilidade dos solos, em decorrência dos constantes desmatamentos e da falta de manejo ambiental, o que, conseqüentemente, causam prejuízos também à vegetação (MONTEIRO, 1995).

### **3.2 O bioma Caatinga**

A Caatinga é um bioma único, genuinamente brasileiro, predominante na região Nordeste do país, sendo o principal ecossistema existente nesta Região. O termo “Caatinga” designa uma vegetação dominante; é uma associação de plantas xerófilas - composta por árvores e arbustos com adaptações anátomo-fisiológicas de proteção para o grande período seco que atinge o território nordestino - que imprime ao Nordeste o seu caráter peculiar (LUETZELBURG, 1982). O bioma caatinga é o principal ecossistema existente na Região Nordeste, estendendo-se pelo domínio de climas semiáridos; estende-se pela totalidade do Estado do Ceará (100%) e mais da metade da Bahia (54%), da Paraíba (92%), de Pernambuco (83%), do Piauí (63%) e do Rio Grande do Norte (95%), quase metade de Alagoas (48%) e Sergipe (49%), além de pequenas porções de Minas Gerais (2%) e do Maranhão (1%) (PARAÍBA, 2012). Segundo o IBGE (2004), sua área abrange aproximadamente 844.453 km<sup>2</sup>, como mostra a Figura 1.

O regime de chuvas é marcado pela escassez, acentuada irregularidade espaço-temporal e longos períodos de estiagem, onde a maior parte da precipitação geralmente ocorre em três meses, com média anual inferior a 800 mm. Essas características resultam na ocorrência frequente de dias sem chuvas, ou seja, veranicos, e, conseqüentemente, em eventos de seca (AGEITEC, 2012). Do mesmo modo que a vegetação, o clima da Caatinga também possui suas peculiaridades. Alves et al. (2008) afirmam que não é incomum se observar pesadas formações de nuvens ou neblina nas regiões mais altas no início da manhã, durante a estação seca, o que resulta em menos de cinco horas de insolação por dia no planalto, enquanto que as áreas de planície circunvizinha possuem uma taxa mais alta de insolação diária, sete horas ou mais.





**Figura 1.** Distribuição espacial do bioma Caatinga, na Região Nordeste Brasileira. Fonte de dados: IBGE, 2004.

O bioma Caatinga é muito importante do ponto de vista biológico por apresentar fauna e flora únicas, formada por uma vasta biodiversidade, rica em recursos genéticos e de vegetação com característica seca e espinhosa, que é constituída por espécies lenhosas, herbáceas, cactáceas e bromeliáceas. As espécies vegetais que o compõem possuem as mais diversas adaptações para a captação e contenção hídrica, a fim de sobreviver aos longos períodos de estiagem, inerentes ao clima semiárido; devido à falta de chuvas durante grande parte do ano (a vegetação típica de Caatinga tende a fechar seus estômatos durante o período de déficit hídrico, como modo de “defesa” para evitar uma maior perda de água por transpiração), entretanto, quando chega o período chuvoso, as folhagens voltam a brotar e a paisagem fica verde novamente.

Antigamente acreditava-se que a caatinga seria o resultado da degradação de formações vegetais mais exuberantes, como a Mata Atlântica ou a Floresta Amazônica. Esse pensamento sempre produziu à falsa ideia de que o bioma seria homogêneo, com biota pobre em espécies e em endemismos, estando pouco alterada ou ameaçada, desde o início da colonização do Brasil. Entretanto, estudos apontam a caatinga: (i) como rica

em biodiversidade, endemismos e bastante heterogênea; (ii) considerada um bioma extremamente frágil (ALVES, 2007).

A vegetação é formada por três estratos: o arbóreo, com árvores de 8 a 12 metros de altura; o arbustivo, com vegetação de 2 a 5 metros; e o herbáceo, abaixo de 2 metros. Entre as espécies mais comuns estão a amburana (*Amburana cearensis*), o umbuzeiro (*Spondias tuberosa*) e o mandacaru (*Cereus jamacaru*). Algumas dessas plantas podem produzir cera, fibra, óleo vegetal e, principalmente, frutas. Estima-se que pelo menos 932 espécies já foram registradas para a região, das quais 380 são endêmicas (IBAMA, 2014).

Alguns animais que fazem parte da caatinga são os lagartos (como o teiú (*Tupinambis merianae*)), serpentes (como a cascavel (*Crotalus durissus*) e a jararaca (*Bothrops jararaca*)) e aves (como a siriema (*Cariama cristata*), pomba de bando (*Zenaida auriculata*), quenquém (*Cyanocorax cyanopogon*) e juriti (*Leptotila verreauxi*)). Como afirmam Rodrigues et al. (2009) e Souza (2007), o escoamento superficial das águas da chuva é intenso, pois os solos são rasos e situados acima de lajedos cristalinos. Muitos dos rios são intermitentes, isto é, as águas correm neles durante o período de chuvas, tendo seus cursos interrompidos durante a estação seca.

Apesar de sua importância ecológica, há pouco interesse no estudo faunístico e florístico, se comparado aos que são direcionados às florestas tropicais (SANTOS; FARIAS, 2013). Pesquisadores constataram que a Caatinga é o terceiro ecossistema brasileiro mais degradado, atrás da Mata Atlântica e do Cerrado. No total, 50% de sua área foram alterados pela ação humana, sendo que 18% de forma considerada grave por especialistas.

A desertificação, encontrada principalmente em áreas onde antes se desenvolvia o plantio de algodão, apresenta-se bastante avançada (REGIONAL, 2011). A falta de

preservação prejudica a sobrevivência da fauna silvestre, a qualidade da água e o equilíbrio do clima e do solo. Boa parte da Caatinga já foi degradada devido principalmente a circunstâncias socioeconômicas, pois, como já é de conhecimento, a região semiárida é caracterizada por sua escassez hídrica, o que dificulta o meio de sobrevivência da população, principalmente a que habita longe dos grandes centros urbanos.

A caatinga ocupa 92% da área da Paraíba, mas está acabando principalmente por causa do consumo desenfreado e ilegal de lenha. Dados do IBAMA (no ano de 2009) demonstram que restam 39,2% desta vegetação no Estado. A retirada de madeira para a produção de lenhas, carvão e estacas é a principal atividade que degrada a flora caatingueira, e conseqüentemente também sua fauna silvestre. Porém, não é só a população local que participa na exploração (e possível degradação) da Caatinga, pois, após a descoberta do potencial econômico e energético caatingueiro muitas empresas passaram a explorar as suas riquezas naturais. Também é evidenciada a degradação de sua vegetação nativa para dar lugar a culturas irrigadas e as pastagens. Vale salientar que o tráfico e caça predatória de animais e a ampliação desordenada de monocultivos – a exemplo do algodão e a carnaúba nas áreas mais secas, e a produção de grãos (milho e feijão) e mandioca nas áreas mais úmidas – também são grandes fatores contribuintes para a erradicação desse riquíssimo bioma (ANDRADE et al. 2005; SUASSUNA, 2002).

### **3.3 Sensoriamento remoto e dados orbitais**

Por meio do sensoriamento remoto podem ser disponibilizadas informações sobre os mais diversos aspectos fisiográficos e atmosféricos. De acordo com Novo (1999), sensoriamento remoto pode ser definido como a aquisição de informação sobre um objeto a partir de medidas feitas por um sensor que não se encontra em contato físico direto com ele. Segundo Jensen (2011), sensoriamento remoto é o registro da informação das regiões do ultravioleta, visível, infravermelho e micro-ondas do espectro eletromagnético, sem contato, por meio de instrumentos tais como câmeras, escâneres, lasers, dispositivos lineares e/ou matriciais localizados em plataformas tais como aeronaves ou satélites, e a análise da informação adquirida por meio visual ou processamento digital de imagens.

Sensores remotos cuidadosamente calibrados fornecem novas informações sobre um objeto, as quais o ser humano jamais teria habilidade para avaliar (ROBBINS, 1999). Os dados de sensoriamento remoto são coletados usando sistemas sensores passivos ou ativos. Os sensores passivos registram a radiação eletromagnética que é refletida ou emitida pelo terreno (SHIPPERT, 2004). Um escâner multiespectral pode ser usado para registrar a quantidade de fluxo radiante termal que deixa o terreno. De acordo com Jensen (2011), sensores ativos, tais como os de micro-ondas (RADAR), LIDAR ou SONAR, recobrem o terreno com energia eletromagnética gerada pelo próprio equipamento, e depois registram a quantidade de fluxo radiante espalhado de volta em direção ao mesmo.

Qualquer atividade requer o uso de energia, assim como para a obtenção de dados por sensoriamento remoto. A energia com a qual operam os sensores remotos pode ser proveniente de uma fonte natural, como a luz do sol e o calor emitido pela superfície da Terra, e pode ser de uma fonte artificial como, por exemplo, a do flash

utilizado em uma máquina fotográfica e o sinal produzido por um radar. A energia utilizada em sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética, que se propaga em forma de ondas eletromagnéticas com a velocidade da luz (300.000 km/s). Ela é medida em frequência (em unidades de hertz – Hz), e comprimento de onda (em unidades de metro) (FLORENZANO, 2002).

Das várias contribuições do sensoriamento remoto, a detecção qualitativa e quantitativa da vegetação verde é uma das mais importantes, por meio dos índices de vegetação (IV), sendo possível maximizar as características intimamente ligadas ao dossel verde e minimizar as variações não ligadas a ele (OLIVEIRA et al., 2009).

A aquisição de dados por sensoriamento remoto pode ser feita via três tipos de plataformas: terrestre (radiômetros de campo), aérea (câmaras fotográficas ou sensores em aviões e helicópteros), ou orbital (sensores a bordo de satélites artificiais). As vantagens da aquisição de dados via plataforma orbital são: visão sinóptica (panorâmica), proporcionada pela aquisição espacial dos dados; obtenção de informações em regiões do espectro eletromagnético inacessíveis à visão humana; capacidade de registrar áreas de difíceis acessos; e capacidade de revisitar cenas e/ou áreas de forma sistemática (monitoramento sistemático).

Embora os dados de sensores orbitais de satélites de observação terrestre, como o MODIS, possuam precisão inferior aos dados de sensores de superfície (ou próximo a ela), constituem uma boa alternativa para locais em que não há registro de instrumentos medidores de dados em superfície.

### **3.4 Balanço de radiação**

A radiação solar é um dos principais fatores que assegura a vida na Terra. Quando esta atinge a Terra, é espalhada e absorvida. A radiação consiste de ondas

eletromagnéticas viajando com a velocidade da luz; e como é a única que pode ocorrer no espaço vazio, esta é a principal forma pela qual o sistema Terra-Atmosfera recebe energia do Sol e libera energia para o espaço (BASTOS, 2009). Como afirma Ometto (1981), aproximadamente 51% da energia solar que chega ao topo da atmosfera consegue atingir a superfície da Terra; depois, a maior parte desta energia é irradiada de volta para a atmosfera na faixa do infravermelho. Na meteorologia essa radiação é de fundamental importância, pois interfere nos elementos meteorológicos como a evaporação, evapotranspiração, temperatura do ar, umidade relativa e outros (SOUZA et al., 2002).

De acordo com Vianello e Alves (1991), a quantidade de radiação emitida pelo Sol é função do comprimento de onda e de fenômenos que ocorrem na própria fonte de energia (manchas solares, erupções solares, variações de temperatura, etc.). Assim, a quantidade de radiação solar que chega à superfície da Terra dependerá de todos esses fatores, além de outros associados à atmosfera terrestre.

Fluxos radiativos e não-radiativos de energia na interface superfície terrestre-atmosfera caracterizam as trocas energéticas que determinam os regimes térmicos do solo, água, vegetação e ar atmosférico. Determinando-se (estimando ou medindo) a magnitude destes fluxos num dado intervalo de tempo e área, obtém-se o balanço de energia (OLIVEIRA, 2014).

A principal troca de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre dá-se pela radiação eletromagnética, envolvendo os fluxos de radiação de onda curta (0,3 a 3,0  $\mu\text{m}$ ) e os da radiação de onda longa ( $> 3,0 \mu\text{m}$ ). Os processos de transferência de radiação na atmosfera são bastante complexos, pois as características dos principais agentes de atenuação (vapor d'água, gás carbônico e ozônio) geralmente mostram enormes variações espectrais. Na presença de nuvens, o quadro se complica ainda mais.

Em muitos estudos meteorológicos, o uso de modelos bem elaborados e refinados torna-se imprescindível.

Existe um balanço quase perfeito entre a quantidade de radiação solar incidente e a quantidade de radiação que retorna para o espaço. O balanço das trocas verticais de radiação eletromagnética constituirá o saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ), que será fracionado nos fluxos de calor latente de evaporação, de calor sensível no ar e no solo, bem como armazenado na massa da cultura e usado no processo de fotossíntese (EMBRAPA, 2000). Portanto, o saldo de radiação é, então, utilizado pela superfície nos processos de evaporação ( $\lambda E$ , calor latente), aquecimento do ar ( $H$ , calor sensível), do solo ( $G$ , calor sensível), e das plantas ( $P$ , calor sensível), e na fotossíntese ( $F$ , fotoquímica) (PEREIRA, 1997). O balanço de radiação em uma determinada superfície é a contabilização líquida entre toda a energia radiante recebida e perdida pela superfície (VIANELLO e ALVES, 1991).

O balanço energético da Terra é mostrado na Figura 2.

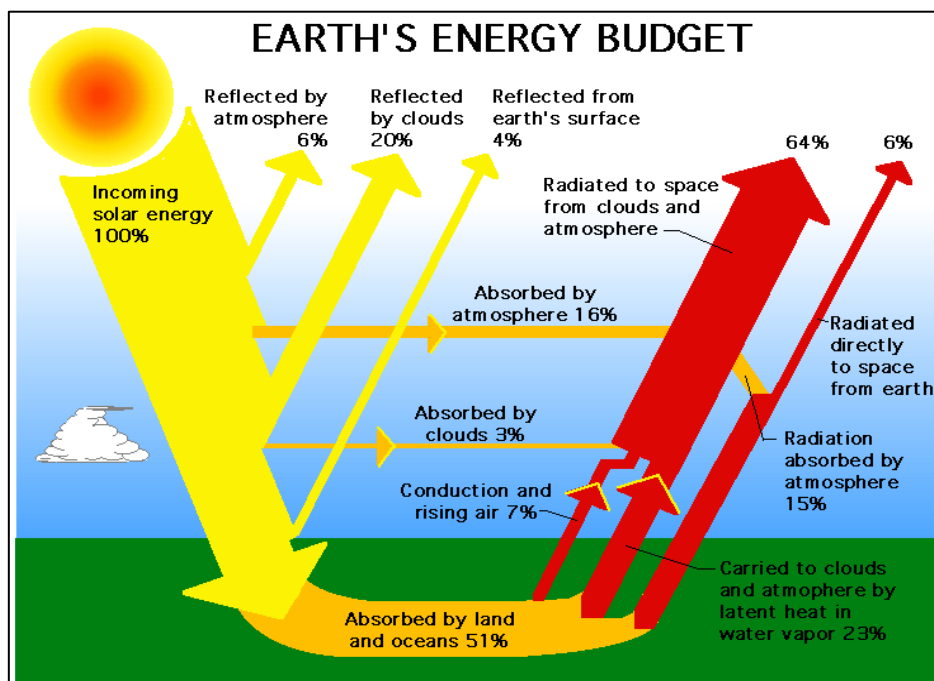


Figura 2. Esquema do balanço energético da Terra. Fonte: NASA, 2009.

De acordo com Allen et al. (2007), o saldo de radiação à superfície instantâneo ( $R_n$ ) resulta da contabilização dos fluxos de radiação incidentes (ondas curta e longa) emitidos e/ou refletidos por uma determinada superfície e representa a principal fonte de energia para os processos biológicos e climáticos.

A energia solar é emitida em forma de onda curta, os corpos terrestres absorvem essa radiação e a reemitem em direção à atmosfera em forma de onda longa ( $> 3,0 \mu\text{m}$ ), o que ocasiona o aquecimento do ambiente.

A radiação monocromática incidente sobre qualquer superfície opaca (como a superfície terrestre) é ou absorvida ou refletida. Em quaisquer comprimentos de onda, fortes refletores são fracos absorvedores. A irradiância monocromática incidente sobre uma camada não opaca (como a atmosfera) pode ser espalhada, refletida, absorvida ou transmitida. O coeficiente de reflexão (albedo) influencia diretamente na disponibilidade de energia ( $R_n$ ).

### **3.5 As componentes do Saldo de Radiação**

#### **3.5.1 Radiação de onda curta incidente**

A radiação de onda curta incidente ( $R_s \downarrow$ ) é a radiação emitida pelo Sol que incide sobre a superfície terrestre, representando entrada de energia, e é expressa em  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Parte da energia solar retida no sistema Terra-Atmosfera é absorvida pela superfície terrestre, podendo ser utilizada, por exemplo, no aquecimento do ar adjacente, no aquecimento das superfícies (como o solo e plantas), e no processo de evapotranspiração; outra parte da radiação incidente é refletida e/ou espalhada.



### **3.5.2 Coeficiente de reflexão (albedo)**

Para a determinação do saldo de radiação, especialmente em escala regional, faz-se necessário o conhecimento do albedo, também muito importante em estudos de mudanças climáticas, desertificação, queimadas e meio ambiente em geral (SILVA et al., 2005).

O albedo de superfície é definido como a razão entre as irradiâncias refletida e incidente sobre a superfície. Este varia de acordo com inúmeros fatores: coloração do solo, teor de umidade, tipo de cobertura, etc.

O albedo varia em função do comprimento de onda conforme a reflectância do local e é também dependente das condições de iluminação. Discrimina-se em função destas, dois tipos de albedo: o albedo chamado “Black Sky” para condições de iluminação direta e o albedo “White Sky” para condições de iluminação difusa. O albedo da superfície é representado pela soma dos dois albedos ponderados pela proporção de irradiância direta e difusa, denominada albedo “Blue Sky” (IQBAL, 1980).

### **3.5.3 Radiação de onda longa incidente**

A atmosfera também emite energia radiante para a superfície. Em função da baixa temperatura da atmosfera, os comprimentos de onda dessa radiação são relativamente longos em relação à radiação solar, sendo esta denominada de radiação de onda longa incidente ( $R_l \downarrow$ ) (PEREIRA, 1997).

### **3.5.4 Radiação de onda longa emitida**

A superfície também emite radiação de onda longa ( $R_l \uparrow$ ) em função de sua temperatura. No processo de balanço radiativo global, é necessário frisar a importância

da componente radiação de onda longa emitida, pois a emissão terrestre também participa ativamente nos processos biofísicos. Visto que, se não houvesse a troca harmoniosa entre radiação de ondas curta e longa, o sistema global viveria em constante desequilíbrio.

### **3.6 NDVI**

O Índice de vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) permite não só mapear, mas também quantificar e fornecer informações sobre as condições de uma determinada área. O NDVI se traduz por um indicador numérico, que varia, teoricamente, de 0 (referente à vegetação sem folha, submetida a falta de água no solo) a 1,0 (relativo à vegetação com folhas, sem restrições hídricas e na plenitude de suas funções metabólicas e fisiológicas), (INSA, 2014).

### **3.7 O satélite *Terra* e o sensor MODIS**

O satélite Terra foi lançado em 18 de dezembro de 1999, com a missão internacional de observação terrestre, coleta dados sobre sistemas bio-geoquímicos e energéticos da Terra. Carregando instrumentos do Canadá, Japão e Estados Unidos, este leva a bordo cinco sensores, a saber, MODIS, ASTER, CERES, MISR e MOPITT, os quais coletam informações sobre a atmosfera, superfície terrestre, oceanos, gelo e neve, e orçamento energético. Cada sensor possui características exclusivas que permitem que os cientistas obtenham êxito em vários objetivos científicos, principalmente nos processos de mudanças terrestres (NASA, 2014). O MODIS é o carro-chefe do programa ‘Sistema de Observação Terrestre’ (*EOS*) da NASA, e veio preencher a lacuna na disponibilidade efetiva de dados de sensoriamento remoto de alta resolução

temporal e espectral e moderada resolução espacial, voltados para aplicações sobre a dinâmica terrestre.

O *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um sensor multiespectral a bordo dos satélites da NASA *EOS Terra* (horário de cruzamento equatorial às 10:30 hrs.) e *Aqua* (horário de cruzamento equatorial às 13:30 hrs.); e está a 705 km de altitude. Juntamente, esses satélites recobrem todo o globo no período de 1 a 2 dias. O sensor MODIS é composto por um scanner óptico de varredura transversal e um conjunto de elementos detectores individuais, capaz de fornecer imagens da superfície terrestre em 36 bandas (canais) espectrais distribuídas entre o visível e o infravermelho termal (0.4 - 14.3  $\mu\text{m}$ ) (NASA, 2006). Possui ampla cobertura espacial e espectral, que compreende a faixa imageada de 2330 km. Sua resolução espacial é variada, a saber, de 250, 500 e 1000 m, dependendo da banda utilizada e produto a ser analisado.

As 36 bandas espectrais deste sensor estão localizadas em função de um comprimento de onda, cuidadosamente escolhido para a observação de feições das propriedades das nuvens, dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos no mundo (SALOMONSON; TOLL, 1990). Pode-se afirmar que o sensor MODIS fornece uma alta sensibilidade radiométrica, específicas para as necessidades da comunidade científica, fornecendo uma excelente resposta para cada banda (STRAHLER et al., 1996).

As primeiras sete bandas são voltadas a aplicações ambientais e uso e ocupação da terra, e cobrem intervalos espectrais semelhantes aos dos sensores TM/ETM+ (Landsat).

Segundo Barker et al. (1992), o MODIS é dotado de inúmeras características, entre elas:

- Ampla cobertura espacial e espectral;
- Continuidade nas tomadas de medidas nas regiões espectrais, que já estão sendo estimadas por outros satélites, vindo a complementar as informações, já adquiridas por estes. Como por exemplo, o conjunto de dados adquiridos pelo AVHRR, usado para a meteorologia e monitoramento da temperatura da superfície do mar, gelo e vegetação; e pelo *Coastal Zone Color Scanne* (CZSC), usado para monitorar a biomassa oceânica e os seus padrões de circulação; e
- É a primeira ferramenta dos satélites EOS na condução das pesquisas de mudanças globais.

O MODIS fornece observações de longo prazo para obter um melhor conhecimento da dinâmica global e dos processos que ocorrem na superfície da Terra e na baixa atmosfera (KING, 2003; NASA, 2006). A importante aplicação da informação precisa sobre a cobertura global da superfície está na inferência de parâmetros, que influenciem, tanto nos processos biofísicos, quanto nas trocas de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre (TOWNSHEND et al., 1991).

O objetivo dos produtos gerados pelo sistema MODIS está, basicamente, na quantificação e detecção das mudanças da cobertura terrestre, e nos processos naturais e antrópicos, auxiliando assim, nos diversos modelos regionais e globais existentes (STRAHLER et al., 1999). Outra característica importante dos produtos MODIS é as composições de 8, 16 ou 32 dias, em que os pixels de baixa qualidade são substituídos por outros pixels de maior qualidade. Portanto, a cada 8, 16 ou 32 dias são geradas imagens de boa qualidade.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Material**

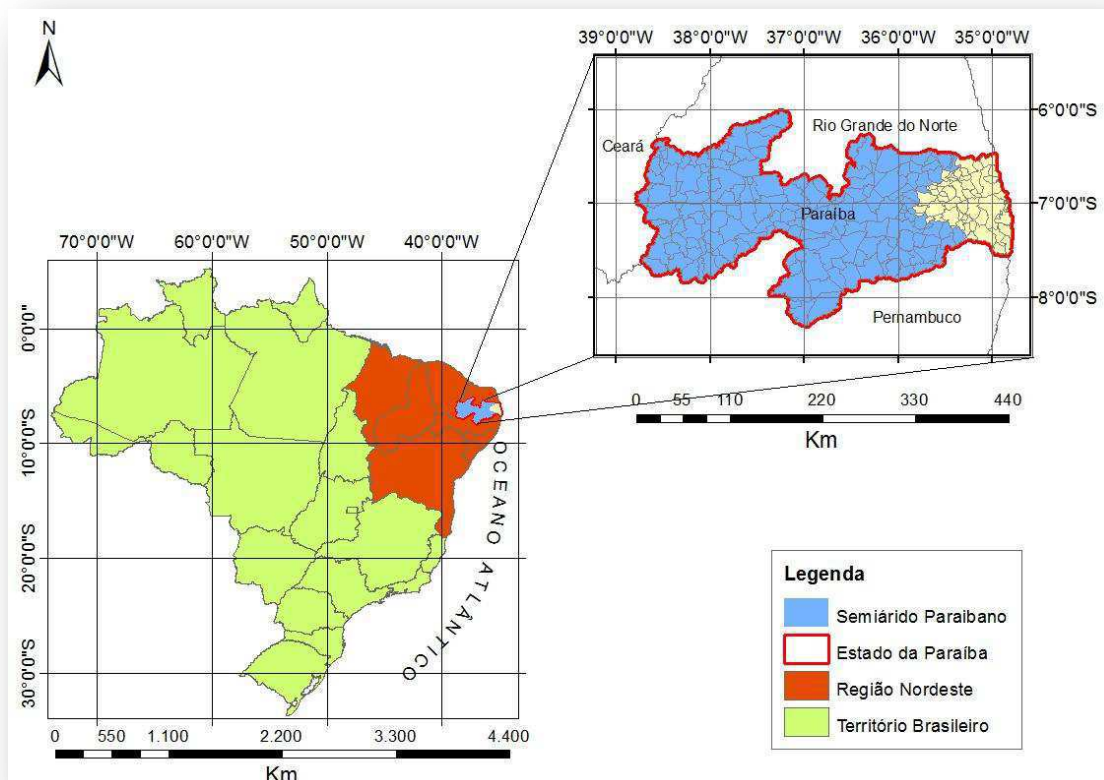
#### **4.1.1 Descrição da área de estudo**

A área de estudo compreende toda a região semiárida do Estado da Paraíba (06° 01' 55" S/ 34° 47'05" O e 08° 18' 37" S/ 38° 45'38" O) (como mostra a Figura 3), abrangendo um total de 170 municípios dos 223 municípios Paraibanos.

A Paraíba corresponde a 56.469,778 km<sup>2</sup> de área territorial (IBGE), e sua população é de aproximadamente 3.914.421 habitantes (estimativa do IBGE para 2013), e segmenta-se em quatro mesorregiões: Mesorregião do Sertão Paraibano, Mesorregião da Borborema, Mesorregião do Agreste Paraibano, e Mesorregião da Mata Paraibana, a qual corresponde ao litoral. Situado na parte da porção mais oriental do Nordeste Brasileiro (NEB), o Estado limita-se ao norte, com o Estado do Rio Grande do Norte; ao sul, com o Estado do Pernambuco; a leste, com o Oceano Atlântico e a oeste, com o Estado do Ceará. Sua economia baseia-se no setor de comércio e serviços, na indústria (alimentícia, têxtil, de couro, de calçados, metalúrgica, sucroalcooleira) na agricultura (principalmente de cana-de-açúcar, abacaxi, mandioca, milho e feijão), na pecuária (principalmente na ovinocaprinocultura) e no turismo.

Na Paraíba prevalece o clima semiárido, onde este é caracterizado pela baixa umidade e pouco volume pluviométrico, com precipitação média anual inferior a 800 mm; na parte litorânea do Estado, os totais anuais podem superar os 1.500 mm; essa variação espacial da pluviosidade no Estado é provocada por diferentes sistemas atmosféricos que atuam na costa Leste do Nordeste do Brasil (SILVA et al. 2003).

Desse modo, o clima no Estado se divide conforme a extensão territorial da Paraíba, pois sofre influência da umidade do Oceano Atlântico, a leste, e ao mesmo tempo, é configurado pelo polígono das secas, que o influencia com altas temperaturas e baixa pluviosidade. De acordo com a classificação climática de Köppen, do litoral até a região da mata o clima é configurado como do tipo tropical quente e úmido (As), com chuvas de outono a inverno e as temperaturas são classificadas em média de 26°C, e as médias pluviométricas desta região chegam em torno de 1.800 mm. Em grande parte das mesorregiões da Borborema e do Sertão predomina o clima semiárido quente (BSh), caracterizado pela irregularidade de chuvas, em torno de 500 mm anuais, e temperaturas em torno de 26 °C. Na mesorregião do Sertão Paraibano, a temperatura fica em torno de 27 °C. Denota-se na Paraíba o clima quente semiúmido (Aw) com chuvas de verão, em torno de 800 mm anuais, com influência da massa de ar quente e úmida advinda da região amazônica.



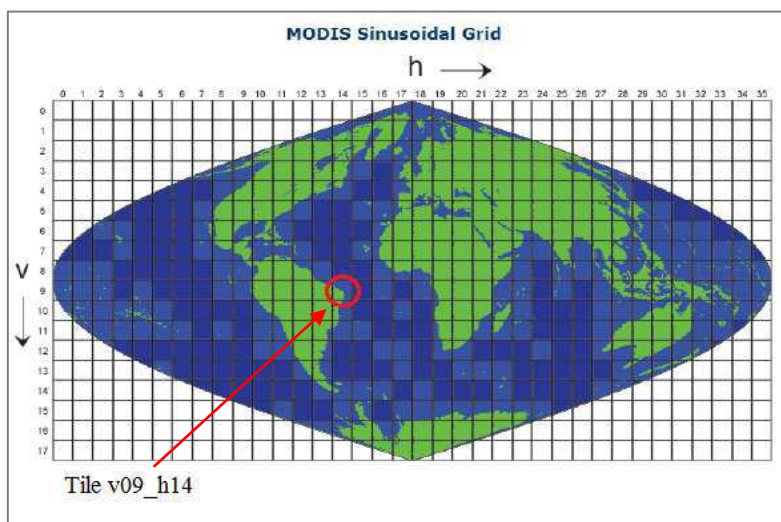
**Figura 3.** Mapa de localização da área de pesquisa; produzido pela autora.

#### 4.1.2 Dados

Para o presente trabalho, foram utilizados dados e produtos derivados obtidos a partir de sensoriamento remoto, os quais são pertencentes ao sensor MODIS (obtidos em dias de céu claro), a bordo do satélite Terra (EOS-AM); referentes ao período de janeiro/2013 a dezembro/2013. Portanto, foi realizada uma avaliação anual com relação aos fluxos radiativos do ano de 2013.

O número reduzido de DOA's (dias de ordem do ano) em estudo referentes à área degradada, comparados ao número de DOA's referentes à área preservada, deu-se devido à falta de dados medidos (para validação) de albedo e de saldo radiativo para alguns dias da pesquisa, a saber, 25, 33, 57, 65 e 329.

O critério utilizado para obtenção das imagens foi a garantia da mínima presença de nuvens possível. Os dados são armazenados em um formato *Hierarchy Data Format* (HDF), e adquiridos gratuitamente por meio de plataformas virtuais da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Os dados MODIS selecionados para a pesquisa correspondem ao *tile v09\_h14* (como mostra a Figura 4), e são referentes aos dias de ordem do ano - DOA: 25, 33, 57, 65, 81, 105, 137, 169, 193, 209, 217, 233, 249, 281, 289, 313, 329 e 361, do ano de 2013.



**Figura 4.** Localização do tile selecionado. Fonte: NASA, adaptado pela autora.

Para a conversão dos dados em formato *.GeoTIFF* e *.img*, foram utilizados os softwares MRT (*MODIS Reprojection Tool*) e HEGTool, respectivamente.

#### 4.1.2.1 Produtos MODIS

Os produtos utilizados são provenientes de dados coletados pelo sensor MODIS acoplado ao satélite *Terra*, que dispõe de produtos voltados para estudos das áreas continentais, oceânicas e atmosféricas, além de produtos de calibração. Os produtos utilizados nesta pesquisa estão mostrados no Quadro 1.

**Quadro 1.** Produtos MODIS utilizados na pesquisa.

Produto	Tipo de produto	Parâmetros utilizados	Fator multiplicativo	Fator adicional	Unidade	Resolução espacial (pixel) e temporal
MOD07-L2	Atmosfera	Temperatura do ar	0,01	+ 15.000	Kelvin	5.000 m
		Temperatura do ponto de orvalho	0,01	+ 15.000	Kelvin	Diário
MOD09-A1	Superfície Terrestre	Reflectância de superfície	0,0001	--	Adimensional	500 m 8 dias
MCD43-A3		Albedo	0,001	--	Adimensional	500 m 16 dias
MOD11-A2	Superfície Terrestre	Temperatura da superfície	0,02	--	Kelvin	1.000 m
		Emissividade	0,002	+ 0,49	Adimensional	8 dias
MOD13-Q1		NDVI	0,0001	--	Adimensional	250 m 16 dias

#### 4.1.3 Para o processamento dos dados

Primeiramente foi realizada a etapa do pré-processamento das imagens, onde todas elas foram reprojctadas para o Sistema Geográfico WGS-84, e reamostradas para



1000 m para uniformização da resolução espacial. Para tratar (reprojetar) os dados MODIS, fez-se necessário a utilização dos programas HEGTool e MRT (*MODIS Reprojection Tool*), disponível gratuitamente no site da NASA, que tem o objetivo de alterar a projeção e o formato do produto, além de realizar o mosaico de imagens. Os produtos MODIS que necessitam da aplicação de fatores de correção e adicionais, sofreram as correções devidas.

Para o processamento e análise dos dados, foi utilizado o software ERDAS Imagine na versão 8.5, o qual possui avançadas ferramentas para modelagem espacial e tratamento de novas informações, além de recursos de SIG (Sistema de Informações Geográficas).

## 4.2 Métodos

A metodologia seguiu baseada de acordo com as equações de Bisht e Bras (2011).

Para a implementação da metodologia proposta, primeiramente foi calculada a radiação de onda curta incidente, seguidamente foram calculadas as outras variáveis necessárias para a estimativa do saldo de radiação instantâneo, todas essas para condições de céu claro.

### 4.2.1 Obtenção das variáveis componentes do saldo de radiação

O saldo de radiação pode ser estimado de acordo com Allen et al. (2007), Equação 1.

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que  $R_{S\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente;  $\alpha$  é o albedo da superfície;  $R_{L\downarrow}$  é a radiação de onda longa incidente;  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida;  $(1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow}$

corresponde a radiação de onda longa refletida pela superfície e  $\varepsilon_0$  é a emissividade da superfície. O termo  $\alpha R_{S\downarrow}$  representa o fluxo de radiação de onda curta refletida pela superfície.

#### 4.2.1.1 Obtenção da radiação de onda curta incidente

A sequência de equações inicia-se a partir do cálculo da radiação de onda curta incidente ( $R_s \downarrow$ ), em  $W \cdot m^{-2}$ , Equação 2.

$$R_s \downarrow = \frac{S_0 \cos^2 \theta}{1.085 \cos \theta + 0.001 e_0 (2.7 + \cos \theta) + \beta} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que  $S_0$  é a constante solar ( $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $\theta$  é o ângulo zenital solar (em radianos);  $e_0$  é a pressão de vapor à superfície (hPa); e  $\beta=0.2$ , é um coeficiente que pode ser utilizado para ajustar os resultados.

O ângulo zenital solar ( $\theta$ ), em graus, foi obtido a partir do produto MOD09-A1. A pressão de vapor à superfície ( $e_0$ ), em hPa, foi calculada de acordo com a equação de Clausius-Clapeyron (Eq. 3).

$$e_0 = 6.11 \exp \left[ \frac{L_v}{R_v} \left( \frac{1}{273.15} - \frac{1}{T_d} \right) \right] \quad (\text{Eq. 3})$$

em que  $L_v = 2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  (calor latente de vaporização);  $R_v$  é a constante do gás para o vapor de água ( $461 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). A temperatura do ponto de orvalho ( $T_d$ ), em Kelvin, foi obtida através do produto MOD07-L2, tendo em vista que assim para com demais produtos utilizados, foi feita a correção para este utilizando o fator de correção de escala e fator adicional, disponíveis no site: <http://modis.gsfc.nasa.gov>.

#### 4.2.1.2 Obtenção da radiação de onda longa incidente

A radiação de onda longa incidente ( $R_l \downarrow$ ) é uma variável de grande importância no cálculo do balanço de radiação à superfície, pois esta representa a contribuição da atmosfera e engloba informações de nebulosidade e concentração de vapor d'água.

Para o cálculo de  $R_l \downarrow$  ( $W \cdot m^{-2}$ ), utilizou-se a Equação 4.

$$R_l \downarrow = \sigma \varepsilon_a T_a^4 \quad (\text{Eq. 4})$$

em que  $\sigma$  é a constante de Stefan – Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ) ;  $\varepsilon_a$  é a emissividade do ar (ver Eq. 5 e Eq. 6);  $T_a$  é a temperatura do ar próximo à superfície (em Kelvin), obtida através do produto MOD07-L2. A emissividade do ar foi calculada de acordo com a parametrização proposta por Prata (1996), como descrita nas Equações 5 e 6.

$$\varepsilon_a = 1 - (1 + \xi) \exp(-\sqrt{(1.2 + 3\xi)}) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\xi = \frac{46.5}{T_a} e_0 \quad (\text{Eq. 6})$$

#### 4.2.1.3 Obtenção da radiação de onda longa emitida

A radiação de onda longa emitida ( $R_l \uparrow$ ), em  $W \cdot m^{-2}$ , emitida pela superfície terrestre em direção à atmosfera, pode ser expressa de acordo com a Equação 7.

$$R_l \uparrow = \sigma \varepsilon_s T_s^4 \quad (\text{Eq. 7})$$

em que  $\varepsilon_s$  é a emissividade de superfície, obtida através da média aritmética da emissividade das bandas 31 e 32 do produto MOD11-A2, como proposto por Bisht et al. (2005);  $T_s$  é a temperatura da superfície (em Kelvin), obtida através do produto MOD11-A2.

#### 4.2.1.4 Obtenção do albedo de superfície

O albedo é uma medida adimensional e varia segundo as características da superfície, a razão entre a radiação solar direta e a difusa em função do ângulo zenital solar (GIONGO, 2008). Para a estimativa do albedo instantâneo, foram utilizados albedos provenientes do cômputo de dois tipos de produtos: um foi calculado a partir do produto MOD09-A1 (reflectância de superfície); e o outro foi o produto de albedo pronto do MODIS-Terra/Aqua, o MCD43-A3 (BRDF/Albedo). Isso foi feito para comparação e validação do produto de albedo pronto (MCD43-A3).

Para estimar o albedo ( $\alpha$ ) utilizando o produto MOD09-A1 para o cômputo, foi utilizada a formulação de conversão proposta por Liang (2000), Equação 8.

$$\alpha = 0,160. \alpha_1 + 0,291. \alpha_2 + 0,243. \alpha_3 + 0,116. \alpha_4 + 0,112. \alpha_5 + 0,081. \alpha_7 - 0,0015$$

(Eq. 8)

em que  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_7$  representam respectivamente as reflectâncias monocromáticas (razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente) referentes às bandas de 1 a 7 do sensor MODIS, as quais são direcionadas para aplicações terrestres. Além da aplicação da formulação de Liang (2000), foi aplicado o fator multiplicativo de correção para o produto MOD09-A1.

Para o cômputo do albedo com o produto MCD43-A3, foi feita apenas a aplicação do fator de correção correspondente ao produto.

#### 4.2.2 Estimativa do Saldo de Radiação

O saldo de radiação para condições de céu claro foi estimado de duas formas, que diferem quanto à forma de cômputo dos albedos, que deu-se tanto utilizando o albedo proveniente do cálculo das reflectâncias do produto MOD09-A1, como

utilizando o produto de albedo pronto, MCD43-A3. Para ambas, foi utilizada a equação proposta por Allen et al. (2007) como já foi mostrada anteriormente, a Equação 1.

### 4.2.3 Análises estatísticas

Para análise dos resultados e tornar possível a relação existente entre os parâmetros estudados, foram utilizados o Erro Médio Percentual (EMP), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Absoluto (EA) e o Erro Percentual (EP) (WILKS, 2006), dados de acordo com as expressões a seguir:

$$EMP = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x'_i - x_i}{x_i} \right| \quad (\text{Eq. 9})$$

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x'_i - x_i| \quad (\text{Eq. 10})$$

$$EA = |x_i - x'_i| \quad (\text{Eq. 11})$$

$$EP = \frac{EA}{x_i} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que  $x_i$  é o valor observado,  $x'_i$  é o valor estimado e  $N$  é o número de observações.

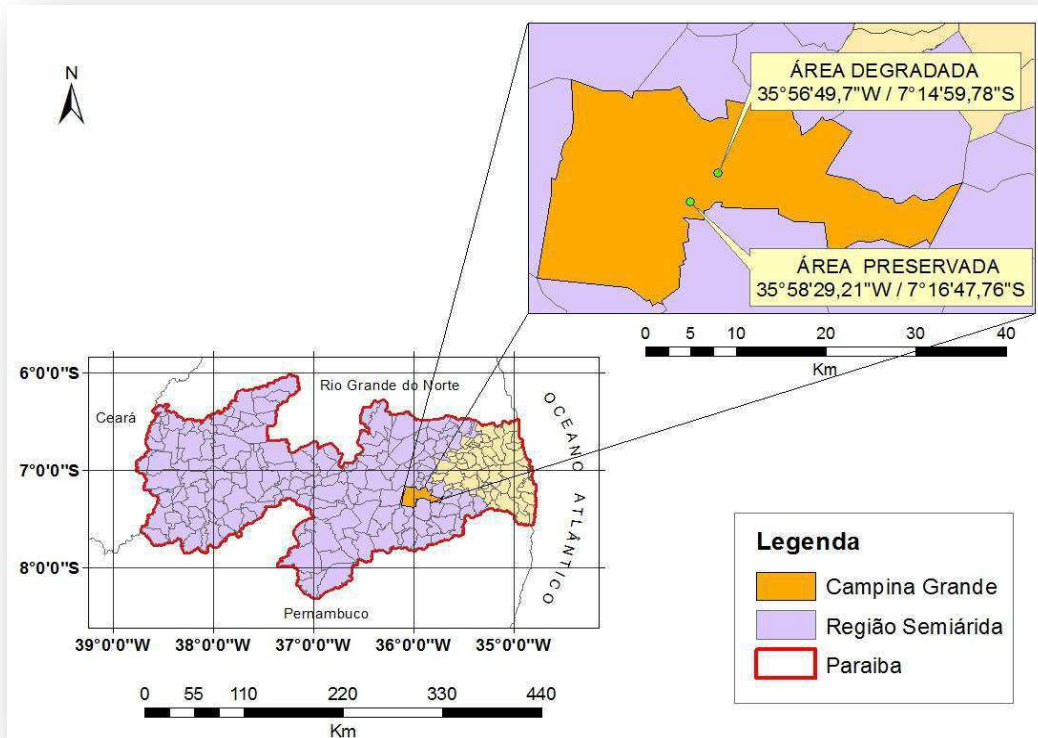
Na análise de regressão dos gráficos de dispersão dos dados, foi analisado o coeficiente de determinação -  $R^2$ , que é o grau de ajuste da reta estimada ao conjunto de dados, e que indica a proporção da variação total na variável dependente  $y$  que é explicada pela variação da variável independente  $x$ .

Também foi realizado o teste (estatístico) de hipóteses *t*-Student, do tipo bicaudal, para determinar a significância das correlações ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

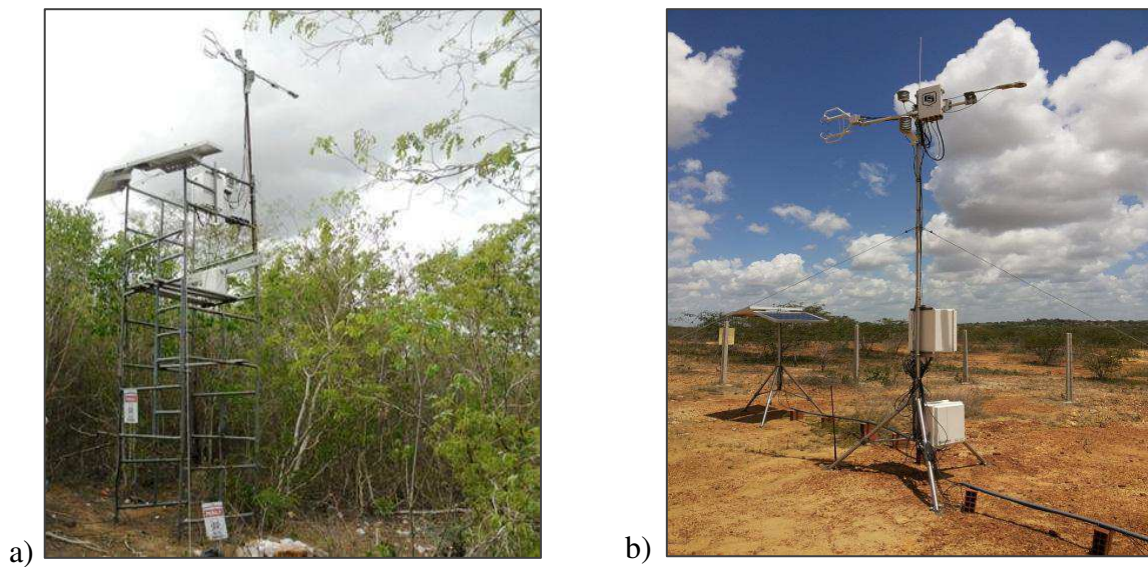
#### **4.2.4 Validação dos resultados**

Para a realização da validação do modelo de algoritmo proposto para a obtenção da estimativa do saldo radiativo utilizando dados orbitais, também foram adquiridos dados de superfície (radiação de onda curta incidente, radiação de onda longa emitida, radiação de onda longa incidente, albedo, temperatura e umidade do ar, pressão de vapor e pressão de saturação de vapor), os quais foram medidos utilizando saldo radiômetro (CNR 4, Kipp & Zonen), que é composto por dois piranômetros (CM3) e dois pirgeômetros (CG3); e o sensor de temperatura e umidade relativa do ar (HC2S3-L, Campbell Scientific); e os demais dados foram medidos através de uma estação meteorológica automática (AWS ET107, Campbell Scientific). Os sensores estão instalados a 8 m acima da superfície, e os do solo estão a 2 cm e 5 cm. Tais dados foram coletados a partir de torres de experimentos meteorológicos em campo, tanto em área de vegetação de caatinga preservada, como em área de vegetação de caatinga degradada.

As torres micrometeorológicas contendo os instrumentos de medição estão situadas nas coordenadas 7° 16' 47.76" S e 35° 58' 29.21" O (área preservada) e 7° 14' 59.78" S e 35° 56' 49.70" O (área degradada), no município de Campina Grande - PB, como representado nas Figuras 5 e 6.



**Figura 5.** Localização das torres micrometeorológicas nas áreas de caatinga preservada e degradada.



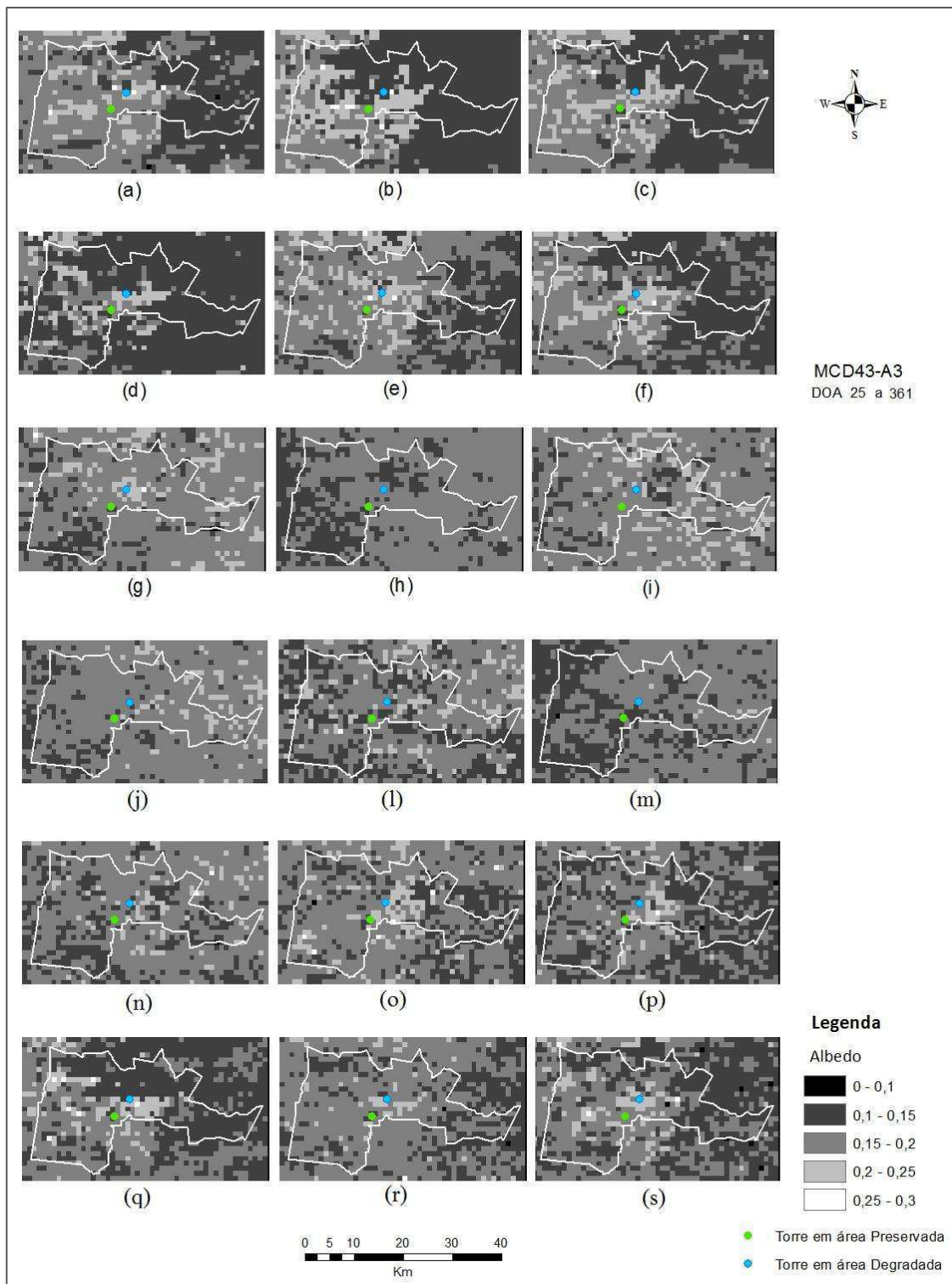
**Figura 6.** Torres micrometeorológicas nas áreas de caatinga preservada (a) e degradada (b) para obtenção dos dados de superfície.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Análise do albedo**

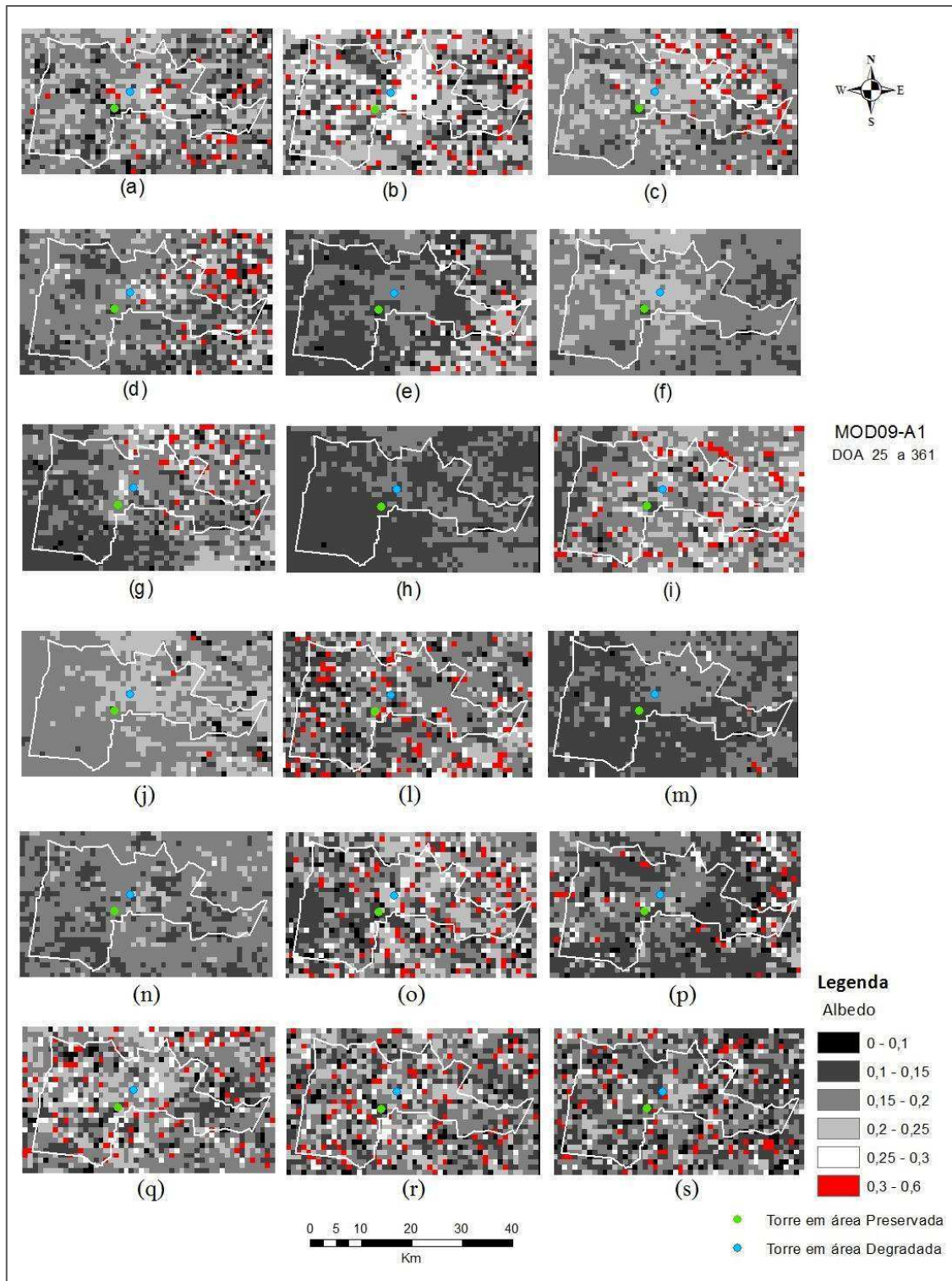
As Figuras 7 e 8 apresentam a distribuição espacial do albedo com seus respectivos tipos de cômputo, para o município de Campina Grande, onde foi realizada uma análise mais detalhada, em virtude de as duas torres micrometeorológicas experimentais para validação dos resultados desta pesquisa estarem inseridas neste local.





**Figura 7 .** Distribuição espacial do albedo no município de Campina Grande, com o produto MCD43-A3, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

É possível notar na Figura 8 que para o albedo calculado pelo produto MOD09-A1, surgiram valores superiores a 30% em praticamente todos os dias estudados, possivelmente devido a maiores incidências de nuvens na imagem, pois o produto MOD09-A1 é um produto de reflectância, isto é, não é um produto exclusivo de albedo, e sua resolução temporal é de 8 dias; em contrapartida, o produto MCD43-A3 é um produto de albedo propriamente dito, e sua resolução temporal é de 16 dias, onde os 16 dias são computados para que os dias com um maior percentual de nuvem sejam substituídos por dias com menos nuvem e assim poder gerar um produto com valores mais precisos.



**Figura 8.** Distribuição espacial do albedo no município de Campina Grande, calculado a partir do produto MOD09-A1, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

Os resultados do cômputo dos albedos para a área de caatinga preservada, mostrados na Tabela 1, deu-se da seguinte maneira: com relação ao produto de albedo pronto (MCD43-A3) (Figura 7), o valor mínimo de  $\alpha$  foi de 11% e o valor máximo foi de 18% para os dias 06/03/2013 e 12/07/2013, respectivamente; para  $\alpha$  calculado através do MOD09-A1 (Figura 8), os valores variaram entre 11% e 27% para os dias 22/03/2013 e 06/09/2013, respectivamente. Onde a variação de  $\alpha$  estimado foi de 10% a 13%, e sua média foi de 12%.

**Tabela 1.** Resultados do cômputo dos albedos para a área de caatinga preservada, utilizando os produtos MCD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Data	$\alpha$ medido	$\alpha$ MCD43-A3	EP (%)	$\alpha$ MOD09-A1	EP (%)
25	25/01/2013	0,13	0,18	34,62	0,15	12,31
33	02/02/2013	0,13	0,16	19,23	0,21	57,69
57	26/02/2013	0,12	0,16	36,67	0,20	63,33
65	06/03/2013	0,13	0,11	15,38	0,12	7,69
81	22/03/2013	0,12	0,16	30,83	0,11	9,17
105	15/04/2013	0,12	0,14	18,33	0,13	5,83
137	17/05/2013	0,11	0,17	50,00	0,18	66,36
169	18/06/2013	0,12	0,14	17,50	0,12	3,33
193	12/07/2013	0,13	0,18	34,62	0,14	9,23
209	28/07/2013	0,13	0,15	15,38	0,14	10,00
217	05/08/2013	0,12	0,15	27,50	0,16	35,00
233	21/08/2013	0,11	0,14	29,09	0,12	4,55
249	06/09/2013	0,11	0,17	50,00	0,27	144,55
281	08/10/2013	0,12	0,14	16,67	0,11	9,17
289	16/10/2013	0,11	0,13	20,91	0,12	5,45
313	09/11/2013	0,11	0,14	27,27	0,19	73,64
329	25/11/2013	0,11	0,13	21,82	0,12	4,55
361	27/12/2013	0,10	0,17	68,00	0,13	32,00
<b><math>\alpha</math> Médio =</b>		<b>0,12</b>	<b>0,15</b>		<b>0,15</b>	
<b>EMP (%) =</b>			<b>25,26</b>		<b>30,77</b>	
<b>EMA =</b>			<b>0,03</b>		<b>0,04</b>	

O erro médio percentual (EMP) para a área preservada (Tabela 1) foi de 25,26% para  $\alpha$  do produto MCD43-A3 e 30,77% para  $\alpha$  obtido através do cômputo do produto MOD09-A1; e o erro médio absoluto (EMA) foi de 3% para o albedo MCD43-A3 e de 4% para o albedo com o MOD09-A1. O que demonstra que o produto de albedo pronto (MCD43-A3) proporcionou um resultado mais satisfatório que o albedo calculado com a metodologia proposta por Liang (2000).

Embora os albedos estimados não possuam grande variabilidade temporal, sua variabilidade espacial é bastante significativa, com seus valores variando de 0,1 a 2,5 (em média). Onde Cunha et al. (2009), em um estudo para a área de caatinga, encontraram valores médios de albedo entre 0,1 a 0,26.

Já para a área de caatinga degradada, os resultados mostrados na Tabela 2, demonstram que  $\alpha$  do MCD43-A3 variou de 21% a 11% para os dias 22/03/2013 e 15/04/2013, respectivamente; e  $\alpha$  obtido através do cômputo do produto MOD09-A1 variou entre 22% e 11% para os dias 15/04/2013 e 27/12/2013, respectivamente. Entretanto,  $\alpha$  medido variou de 18% a 22%, obtendo uma média de 20%.

De acordo com Weber (2011), o albedo apresenta grande variabilidade de local para local, sendo altamente dependente do ângulo de incidência da radiação e do tipo de cobertura da superfície. Em uma mesma área, os valores de albedo variam continuamente no tempo e de maneira distinta para cada tipo de cobertura do solo, em função do desenvolvimento das culturas e da fenologia da vegetação natural.

**Tabela 2.** Resultados do cômputo dos albedos para o ponto da torre experimental em área de caatinga degradada, utilizando os produtos MCD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

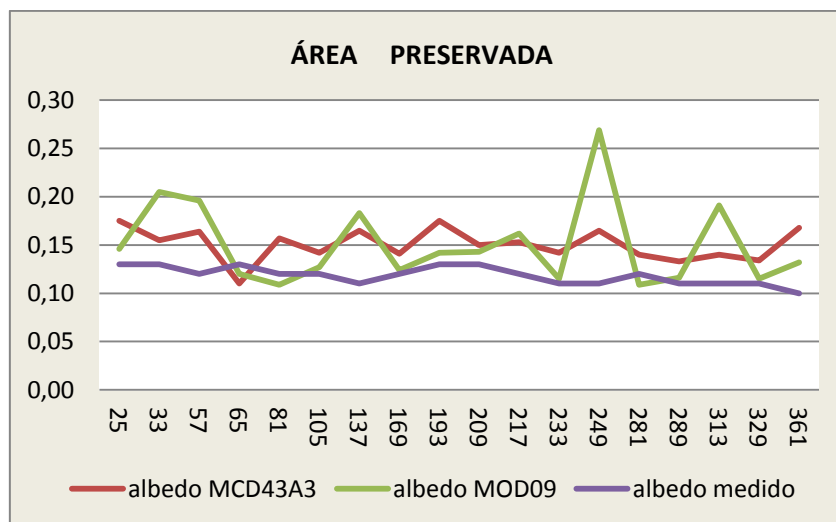
DOA	Data	$\alpha$ medido	$\alpha$ MCD43-A3	EP (%)	$\alpha$ MOD09-A1	EP (%)
81	22/03/2013	0,22	0,21	4,55	0,19	14,55
105	15/04/2013	0,21	0,11	47,62	0,22	5,71
137	17/05/2013	0,20	0,20	2,00	0,16	18,00
169	18/06/2013	0,21	0,17	19,05	0,14	35,71
193	12/07/2013	0,20	0,17	17,50	0,17	16,50
209	28/07/2013	0,21	0,17	17,62	0,20	6,67
217	05/08/2013	0,20	0,17	13,00	0,14	30,50
233	21/08/2013	0,21	0,18	16,67	0,16	24,76
249	06/09/2013	0,19	0,18	7,89	0,15	19,47
281	08/10/2013	0,20	0,19	3,00	0,22	9,00
289	16/10/2013	0,19	0,16	14,21	0,20	3,68
313	09/11/2013	0,19	0,11	42,11	0,19	1,58
361	27/12/2013	0,18	0,17	6,11	0,11	37,78
<b><math>\alpha</math> Médio =</b>		<b>0,20</b>	<b>0,17</b>		<b>0,17</b>	
<b>EMP (%) =</b>			<b>16,26</b>		<b>17,22</b>	
<b>EMA =</b>			<b>0,03</b>		<b>0,03</b>	

O erro médio percentual (EMP) para a área degradada foi de 16,26% para  $\alpha$  do produto MCD43-A3 e 17,22% para  $\alpha$  obtido através do cômputo do produto MOD09-A1; e o EMA foi 3% para ambos os tipos de cômputo dos albedos. O que indica mais uma vez que, nesse caso, do mesmo modo que na área preservada, o produto de albedo pronto teve uma maior precisão, se comparado ao albedo calculado (com o MOD09-A1).

De acordo com a Figura 9, a variabilidade do albedo com o MCD43-A3 seguiu um curso mais similar ao albedo medido que o albedo obtido com o MOD09-A1, onde este último teve um valor extremamente discrepante no DOA 249.

Os menores valores de  $\alpha$  estimados deram-se na área preservada, com média de 15% para o MCD43-A3, e 15% para o albedo obtido através do MOD09-A1, onde  $\alpha$

medido teve média de 12%, o que demonstra que ao contrário da área degradada, na área preservada houve superestimação dos valores (Figura 9).

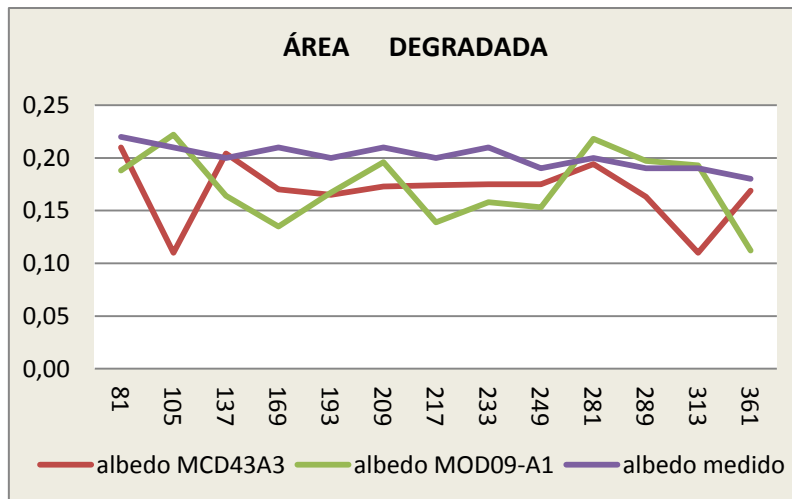


**Figura 9.** Distribuição temporal dos albedos estimados (albedo MCD43-A3 e albedo MOD09-A1) e medido, para os DOA's estudados para a área preservada.

Como afirma Santos (2011), uma possível explicação para o fato de o albedo medido vir a ser maior que o obtido com imagens de satélite pode ser resultante da questão temporal: o medido resulta de medições sobre intervalos de tempo de 30 minutos, ou mais, enquanto que os baseados em imagens são estimativas instantâneas.

Os valores de  $\alpha$  estimados com as duas propostas, foram maiores na área degradada, evidentemente, devido a maiores áreas compostas por solo exposto; com média de 17% para ambas as propostas de obtenção do albedo, onde  $\alpha$  medido teve média de 20%. Nesse caso, pode-se observar uma subestimação dos valores obtidos com as duas propostas, como também mostra a Figura 10.

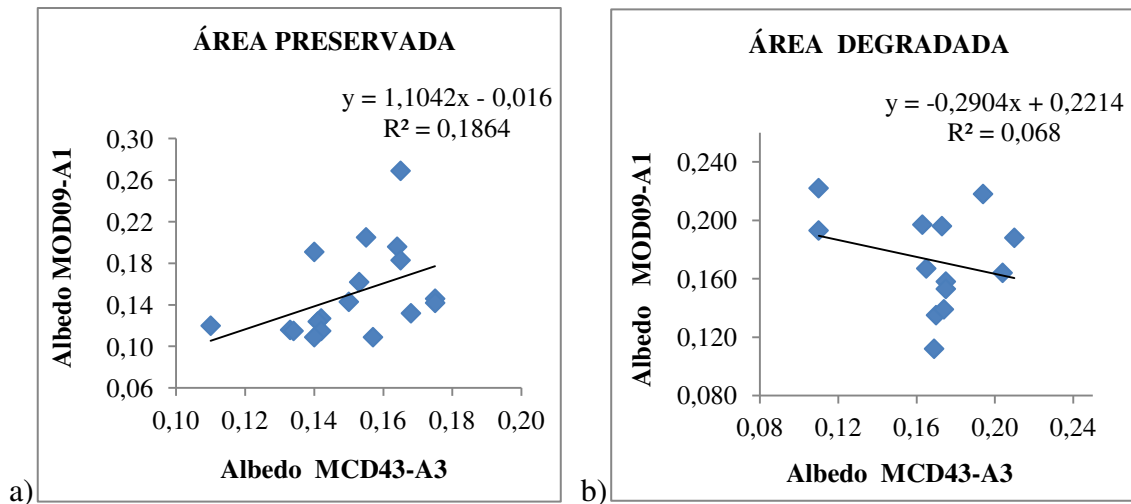




**Figura 10.** Distribuição temporal dos albedos estimados (albedo MCD43-A3 e albedo MOD09-A1) e medido, para os DOA's estudados para a área degradada.

Em análise realizada à parte, caso os dias de ordem do ano (DOA's) da área preservada fossem exatamente os mesmos da área degradada, o erro médio percentual (EMP) para os dois tipos de cômputo do albedo ainda assim seriam maiores para a área preservada. O que indica que a metodologia proposta tem maior precisão em áreas com o solo mais descoberto.

A Figura 11 apresenta a correlação entre o albedo estimado com o MCD43-A3 e o estimado com o MOD09-A1, para a área preservada e degradada.



**Figura 11.** Correlação entre o albedo obtido com MOD09-A1 e o MCD43-A3 para as áreas preservada (a) e degradada (b), para os respectivos dias estudados em cada área.

De acordo com a análise estatística, a metodologia utilizada não apresentou uma boa qualidade do ajuste para a área preservada nem para a área degradada. Em que para a área preservada, a variação explicada na relação entre o MCD43-A3 e o MOD09-A1 foi de 18%; e para a área degradada foi de apenas 7%. A partir de  $\alpha$  estimados, aplicou-se o teste estatístico *t*-Student (bicaudal) para determinar a significância dos coeficientes de correlação ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). A análise estatística foi organizada na Tabela 3.

**Tabela 3.** Resultados da aplicação do teste estatístico *t*-Student para os albedos estimados (MCD43-A3 e MOD09-A1), onde  $R^2$  é o coeficiente de determinação,  $r$  é o coeficiente de correlação,  $gl$  é o número de graus de liberdade,  $t$ -calculado e  $t$ -crítico.

ÁREA	$R^2$	$r$	$gl$	$t$ -calculado	$t$ -crítico
Preservada	0,186	0,432	22	0,025	2,074
Degradada	0,068	0,261	24	-0,311	2,064

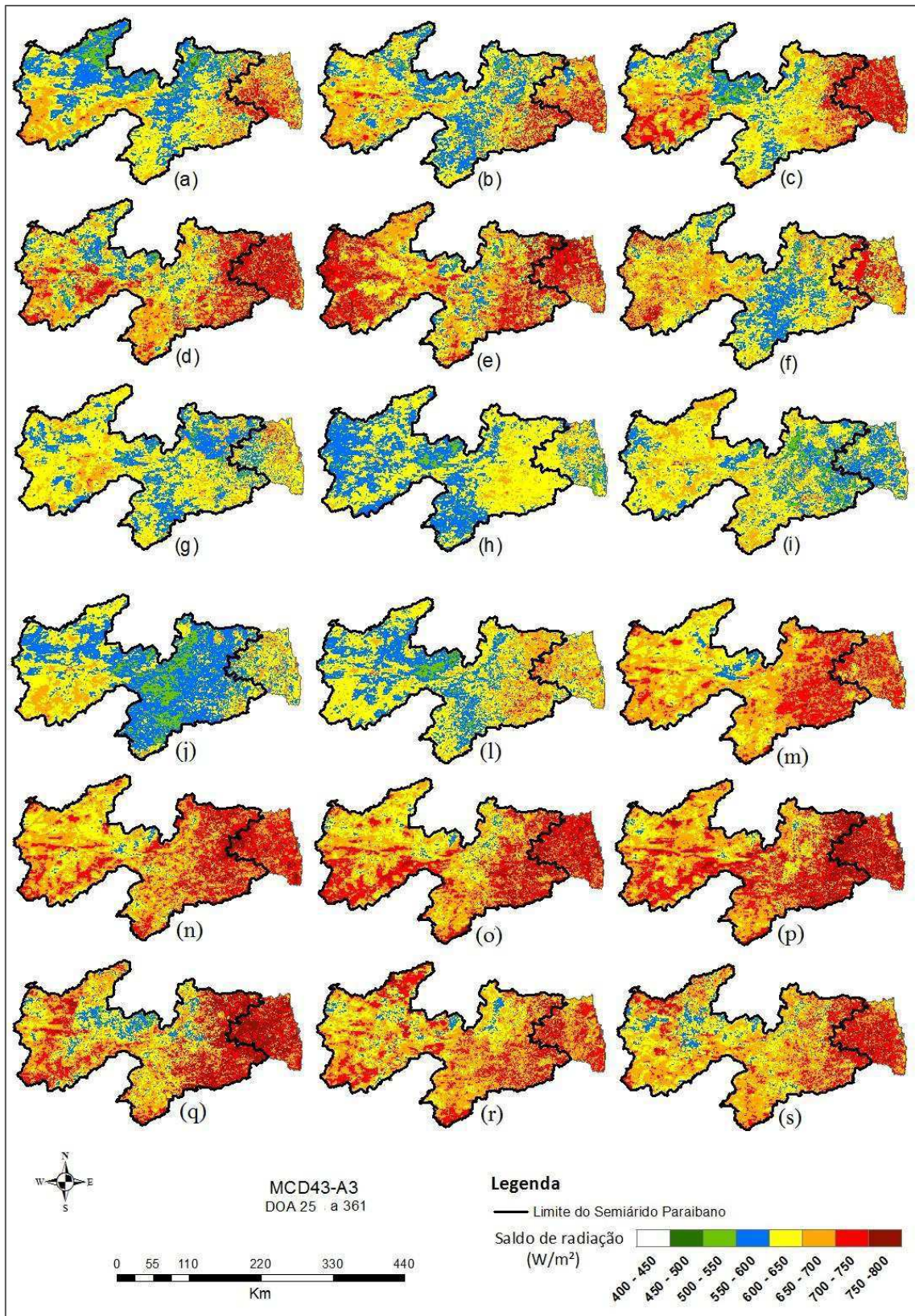
Na Tabela 3, observa-se que a hipótese nula ( $\rho = 0$ ), ao nível de significância de 5% foi aceita para ambas as áreas estudadas, pois os valores de  $t$ -calculado recaíram na

região de aceitação da curva de distribuição do teste. Portanto, não há uma relação de significância entre os valores de  $\alpha$  estimados com o MCD43-A3 em relação aos estimados com o MOD09-A1.

## **5.2 Análise do saldo de radiação**

As Figuras 12 e 13 apresentam a distribuição espacial do saldo radiativo para a Paraíba, para o ano de 2013, calculados a partir do produto de albedo MCD43-A3 (Figura 12) e do saldo obtido através do produto MOD09-A1 (Figuras 13).

De acordo com a Figura 12, o saldo de radiação foi consideravelmente menor nos dias 169 (h), 193 (i), 209 (j) na região semiárida, reforçando a proposta do período chuvoso na região.

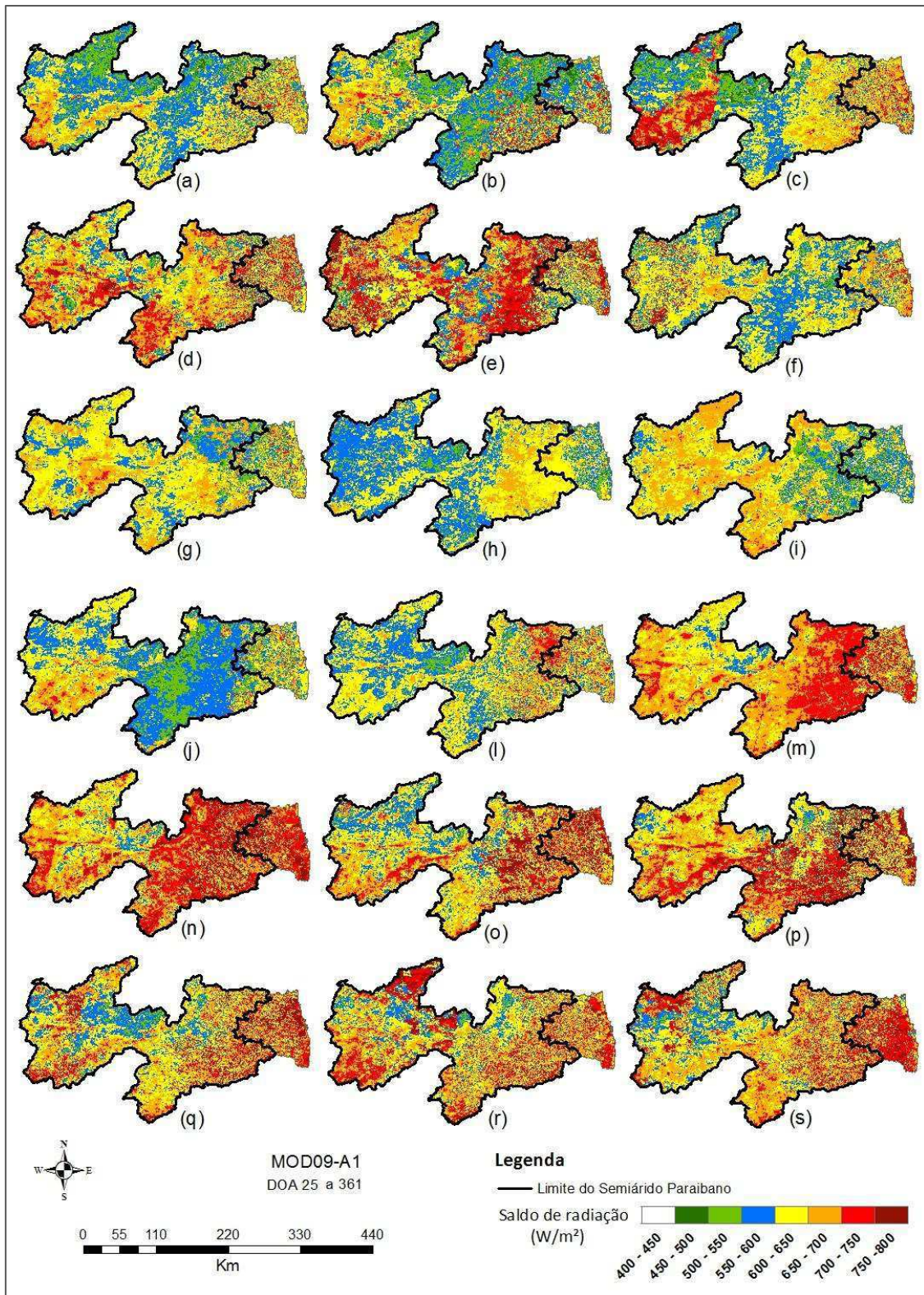


**Figura 12. Saldo com o MCD43-A3** referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

O ano de 2013 foi um ano de grande estiagem, e a irregularidade de chuvas foi presente durante todo este ano. De acordo com uma pesquisa realizada pelo Instituto Nacional do semiárido – INSA, os meses de abril a julho de 2013, foram os meses onde a vegetação apresentou melhores condições hídricas, portanto, foram considerados os meses mais chuvosos deste ano (INSA, 2014), o que indica uma diminuição do saldo de radiação e um aumento do NDVI (mostrado na seção 5.2.2). De acordo com a análise realizada, e visivelmente notável na Figura 13, o saldo de radiação foi consideravelmente menor nos dias 169 (h), 193 (i), 209 (j) na região semiárida.

Do mesmo modo que ocorreu na Figura 12, é possível notar na Figura 13 que o saldo de radiação foi consideravelmente menor nos dias 169 (h), 193 (i), 209 (j) na região semiárida, reforçando a proposta do período chuvoso na região.





**Figura 13. Saldo com o MOD09-A1** referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

As Figuras 14 e 15 apresentam a distribuição espacial do saldo radiativo utilizando o albedo computado através do MOD09-A1, para o município de Campina Grande, localizado na região semiárida, onde estão situadas as torres micrometeorológicas para validação. É possível notar na Figura 14 que para alguns DOA's, como 169 (h), 209 (j) e 233 (m), não houve variação espacial significativa de  $R_n$ .

Através de uma análise histogrâmica realizada na Figura 14 (m), foi possível observar, a concentração maior de número de pixels foi encontrada na classe de valores 700 - 750 ( $W/m^2$ ), correspondendo 1171 elementos (pixels) nesta classe de um total de 1450 elementos.

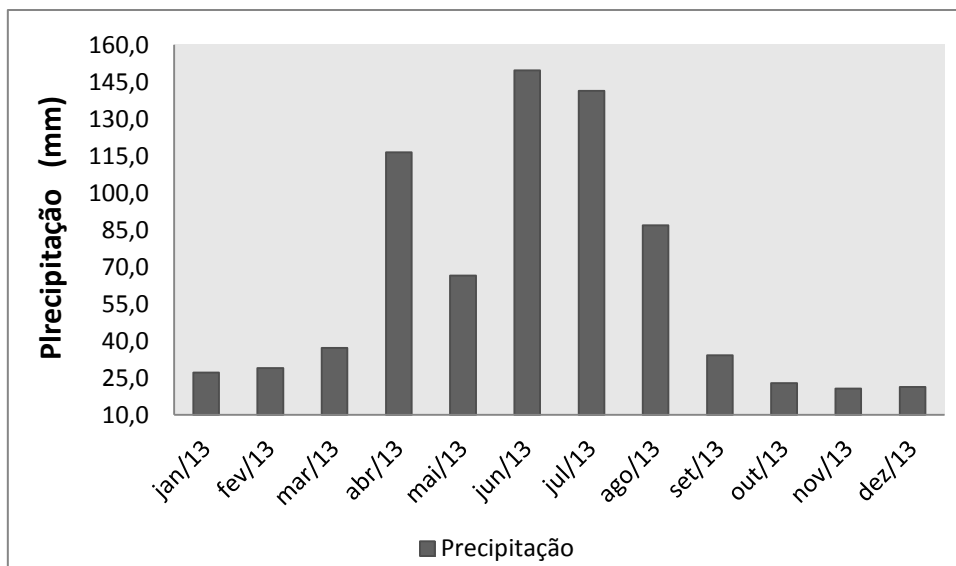
O saldo de radiação é um componente que possui forte dependência da precipitação. E de acordo com resultados encontrados por Oliveira et al. (2006), diferentes condições de precipitação e de umidade do solo ocasionam alteração das componentes do balanço de energia.





**Figura 14.** Mapa do saldo radiativo, obtido utilizando o albedo calculado a partir do produto MOD09-A1, para o município de Campina Grande, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).



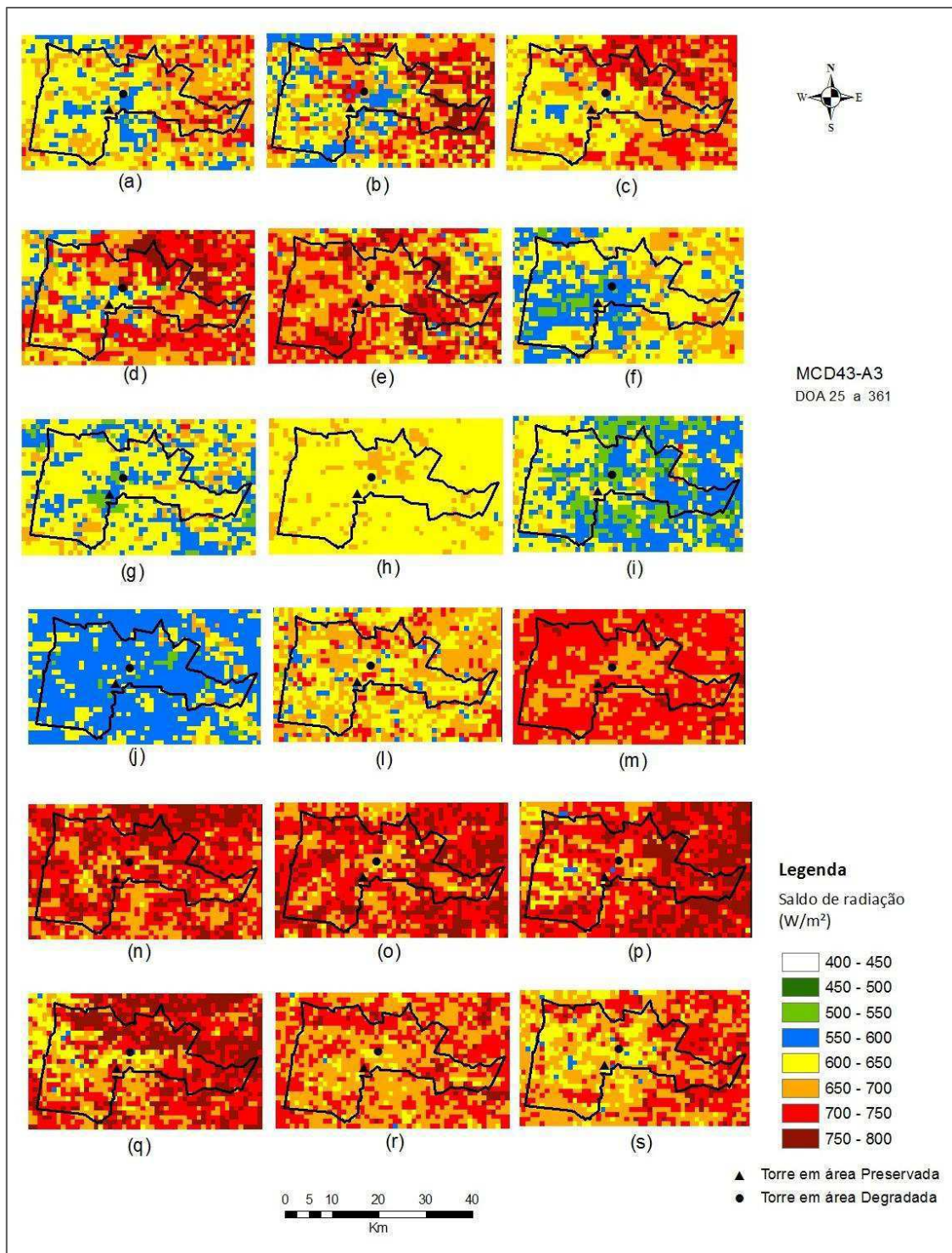


**Figura 15.** Representação gráfica da precipitação média mensal do ano de 2013 para o município de Campina Grande (pluviômetro localizado na sede da EMBRAPA 7° 13' 33" S e 35° 54' 23" O).

Em consonância com os dados de precipitação mensal (Figura 15), o saldo de radiação computado através do MCD43-A3 sofreu maior variação espacial nos meses mais secos; e maior variação temporal nos meses mais úmidos, onde estes foram constituídos por saldos menores.

O DOA 105, que é referente ao dia 15/04/2013, contemplou valores menores de  $R_n$ , devido a um bom índice pluviométrico mensal (116,4 mm). A partir do mês de setembro o saldo começa a apresentar valores mais elevados, devido a escassez hídrica provocada pelo baixo índice pluviométrico (34,2 mm) e consequentemente a perda de umidade do solo.

A Figura 16 apresenta a distribuição espacial do saldo radiativo utilizando o MCD43-A3 para os dias em estudo.



**Figura 16.** Mapa do saldo radiativo, calculado a partir do produto de albedo pronto MCD43-A3, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

Na Figura 16 (h), para o DOA 169, pode ser observada a presença de apenas três classes de valores, a classe 550 – 600 abrange apenas dois elementos (pixels), a classe 600 – 650 é constituída por 1268 pixels, e a classe 650 – 700 possui os 179 restantes de um total de 1450 elementos contidos na imagem. O valor mínimo de  $R_n$  para o horário da passagem do satélite (aproximadamente 10:30 am) para este dia/imagem foi de 592 W/m<sup>2</sup>, e o mais elevado 687 W/m<sup>2</sup>. Desconsidera-se a possibilidade de erro sistemático na imagem para este dia (169), pois, para os resultados de  $R_n$  encontrados pelo MOD09-A1 (Figura 14 (h)) para este mesmo DOA, foi obtida uma variação entre 610 W/m<sup>2</sup> e 716 W/m<sup>2</sup>.

Os valores do saldo de radiação computados para o MODIS/Terra no instante da passagem do satélite, para as duas torres micrometeorológicas experimentais, situadas em área de caatinga preservada e degradada, localizadas na região de Campina Grande, Estado da Paraíba, variaram da seguinte maneira para a área preservada (como mostrado na Tabela 4): os resultados de  $R_n$  obtidos a partir do albedo com o MCD43-A3, variaram entre 565,64 W/m<sup>2</sup> e 781,42 W/m<sup>2</sup> para os dias 17/05/2013 e 08/10/2013, respectivamente; já os resultados de  $R_n$  obtidos com o MOD09-A1, variaram entre 641,29 W/m<sup>2</sup> e 811,94 W/m<sup>2</sup> para os dias 25/01/2013 e 08/10/2013, respectivamente. Entretanto, os valores máximo e mínimo de  $R_n$  medidos no período estudado foram 482,98 W/m<sup>2</sup> e 727,01 W/m<sup>2</sup>, para os dias 12/07/2013 e 08/10/2013, respectivamente.

Para a área preservada, o EMP para  $R_n$  com o MCD43-A3 foi de 17,47% e o EMA foi de 96,62 W/m<sup>2</sup>; o EMP para  $R_n$  a partir do albedo com o MOD09-A1 foi de 16,91% e o EMA foi 94,35 W/m<sup>2</sup>.

**Tabela 4.** Resultados do saldo radiativo, utilizando albedos obtidos com o MOD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos na torre em área de caatinga preservada, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Data	$R_n$ medido (W/m <sup>2</sup> )	$R_n$ MCD43- A3 (W/m <sup>2</sup> )	EP (%)	$R_n$ MOD09- A1 (W/m <sup>2</sup> )	EP (%)
25	25/01/2013	666,20	615,84	7,56	641,29	3,74
33	02/02/2013	499,65	651,68	30,43	609,21	21,93
57	26/02/2013	641,05	680,93	6,22	652,48	1,78
65	06/03/2013	640,1	692,32	8,16	683,44	6,77
81	22/03/2013	655,47	746,16	13,84	790,42	20,59
105	15/04/2013	629,89	634,82	0,78	647,80	2,84
137	17/05/2013	507,09	565,64	11,55	552,12	8,88
169	18/06/2013	562,74	639,56	13,65	652,98	16,04
193	12/07/2013	482,98	620,76	28,53	646,95	33,95
209	28/07/2013	600,37	602,26	0,32	607,62	1,21
217	05/08/2013	535,02	651,87	21,84	644,55	20,47
233	21/08/2013	578,54	720,66	24,56	744,09	28,61
249	06/09/2013	492,73	714,36	44,98	623,62	26,56
281	08/10/2013	727,01	781,42	7,48	811,94	11,68
289	16/10/2013	636,87	774,82	21,66	791,82	24,33
313	09/11/2013	630,18	703,70	11,67	658,08	4,43
329	25/11/2013	581,27	746,63	28,45	764,12	31,46
361	27/12/2013	494,32	656,54	32,82	687,43	39,07
<b><math>R_n</math> Médio</b>						
		<b>586,75</b>	<b>677,78</b>		<b>678,33</b>	
		(W/m <sup>2</sup> ) =				
		<b>EMP (%) =</b>	<b>17,47</b>		<b>16,91</b>	
		<b>EMA (W/m<sup>2</sup>) =</b>	<b>96,62</b>		<b>94,35</b>	

Já para a área degradada, houve variação entre os valores de  $R_n$  da seguinte maneira (como mostrado na Tabela 5): os resultados obtidos com o MCD43-A3, variaram entre 557,78 W/m<sup>2</sup> e 747,64 W/m<sup>2</sup> para os dias 12/07/2013 e 06/09/2013, respectivamente; já os resultados de  $R_n$  obtidos com o MOD09-A1, variaram entre 545,02 W/m<sup>2</sup> e 767,79 W/m<sup>2</sup> para os dias 15/04/2013 e 06/09/2013, respectivamente. Os valores máximo e mínimo de  $R_n$  medidos para o período de estudo da área degradada

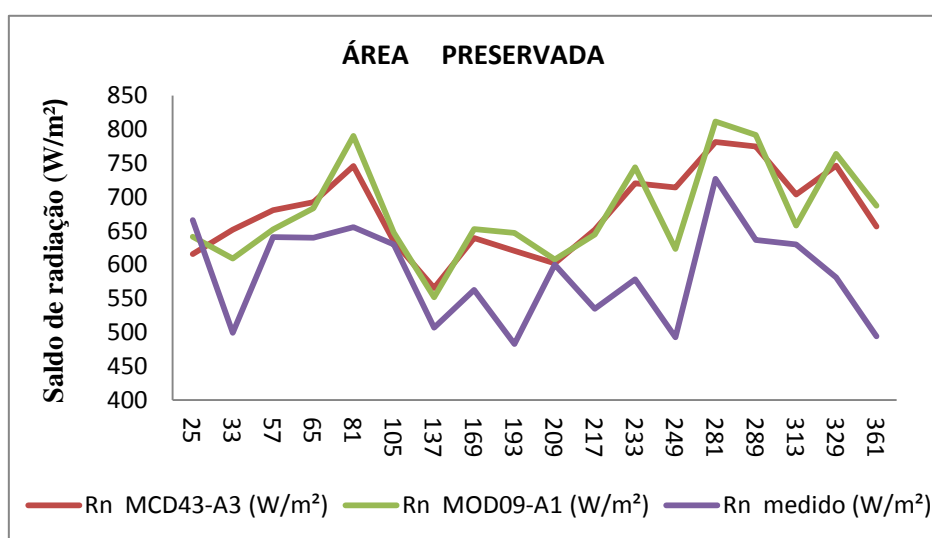
foram 401,30 W/m<sup>2</sup> e 724,47 W/m<sup>2</sup> para os dias 06/09/2013 e 08/10/2013, respectivamente.

**Tabela 5.** Resultados do saldo radiativo, utilizando albedos obtidos com o MOD43-A3 e MOD09-A1, comparados com os dados medidos na torre em área de caatinga degradada, e seus respectivos erros percentuais (EP), erro médio percentual (EMP) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Data	$R_n$ medido (W/m <sup>2</sup> )	$R_n$ MCD43-A3 (W/m <sup>2</sup> )	EP (%)	$R_n$ MOD09-A1 (W/m <sup>2</sup> )	EP (%)
81	22/03/2013	677,32	662,75	2,15	683,14	0,86
105	15/04/2013	659,42	642,26	2,60	545,02	17,35
137	17/05/2013	594,34	603,38	1,52	635,82	6,98
169	18/06/2013	622,67	629,56	1,11	649,48	4,31
193	12/07/2013	483,99	557,78	15,25	556,33	14,95
209	28/07/2013	628,24	576,43	8,25	559,08	11,01
217	05/08/2013	454,75	645,71	41,99	675,28	48,49
233	21/08/2013	612,77	691,06	12,78	705,69	15,16
249	06/09/2013	401,3	747,64	86,30	767,79	91,33
281	08/10/2013	724,47	640,49	11,59	618,57	14,62
289	16/10/2013	716,62	724,35	1,08	692,18	3,41
313	09/11/2013	710,87	711,65	0,11	635,05	10,67
361	27/12/2013	535,27	693,34	29,53	743,95	38,99
$R_n$ Médio (W/m <sup>2</sup> ) =		<b>601,69</b>	<b>655,88</b>		<b>651,34</b>	
EMP (%) =			<b>16,48</b>		<b>21,39</b>	
EMA (W/m <sup>2</sup> ) =			<b>79,95</b>		<b>109,60</b>	

O resultado do saldo radiativo obtido a partir do produto de albedo pronto foi mais satisfatório na aplicação para a área degradada, onde o EMP foi de 16,48% e seu EMA foi de 79,95 W/m<sup>2</sup>; em contrapartida, o  $R_n$  obtido a partir do MOD09-A1 foi mais satisfatório para a área preservada, com EMP de 16,91% e EMA de 94,35 W/m<sup>2</sup> (para a área degradada, o EMP de  $R_n$  obtido com este mesmo produto foi de 21,39% e EMA de 109,60 W/m<sup>2</sup> (Tabela 5)). Indicando um erro elevado para esta aplicação comparados com a metodologia utilizada por Santos (2011) para a área de cerrado e de cana-de-açúcar.

A Figura 17 mostra a variação do saldo de radiação medido e estimados obtido utilizando os dois diferentes cálculos do albedo a partir dos produtos MCD43-A3 e MOD09-A1, para a área preservada. Pode-se observar que para a área preservada houve superestimativa dos resultados durante todo o ano, tanto com o MCD43-A3 como pelo MOD09-A1, exceto no DOA 25. Isto está relacionado a resultados superestimados da radiação de onda curta incidente ( $R_s \downarrow$ ), mostrados na Tabela 6.

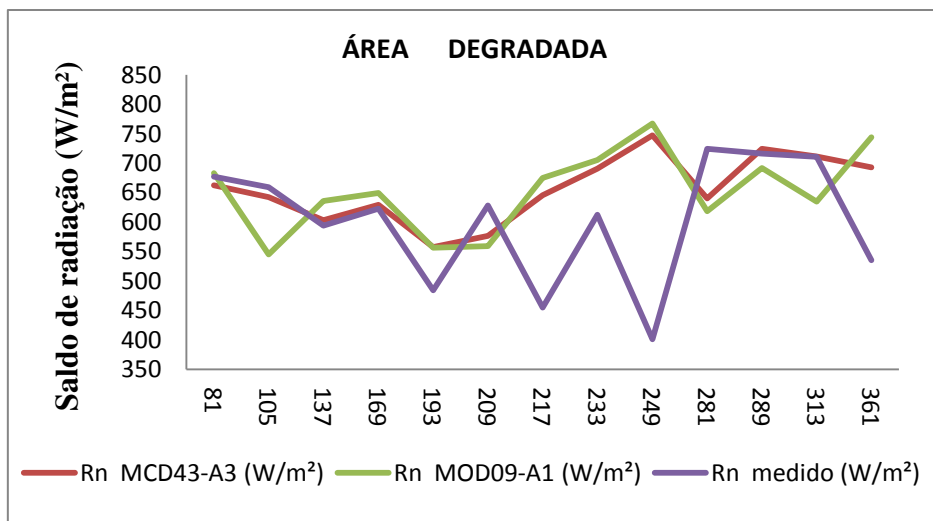


**Figura 17.** Representação gráfica do saldo de radiação para os dias em estudo na área preservada.

**Tabela 6.** Valores da radiação de onda curta -  $R_s \downarrow$  estimada e medida para os dias estudados na área de caatinga preservada.

DOA	Data	$R_s \downarrow$ estimada	$R_s \downarrow$ medida
25	25/01/2013	863,648	769,44
33	02/02/2013	848,920	577,44
57	26/02/2013	886,811	735,71
65	06/03/2013	920,900	738,29
81	22/03/2013	927,093	748,95
105	15/04/2013	866,562	721,14
137	17/05/2013	734,399	576,89
169	18/06/2013	782,044	641,2
193	12/07/2013	799,610	556,37
209	28/07/2013	742,369	690,52
217	05/08/2013	791,390	612,66
233	21/08/2013	874,414	656,12
249	06/09/2013	876,116	557,81
281	08/10/2013	980,276	825,52
289	16/10/2013	977,218	718,83
313	09/11/2013	895,134	712,06
329	25/11/2013	921,927	659,09
361	27/12/2013	853,618	556,33

Já na área de caatinga degradada (Figura 18), a variação entre os saldos medidos e estimados foi maior, como exemplo, têm-se os dias 105, 209 e 281 que se apresentaram subestimados com relação ao medido, e os demais dias seguiram com valores superestimados. A radiação de onda curta incidente só foi subestimada para o DOA 281, conforme a Tabela 7. O que implica dizer, que  $R_s \downarrow$  não foi o fator determinante para os resultados subestimados; outros fatores tiveram maior contribuição para a determinação da subestimativa de  $R_n$ . Portanto, esses dias com valores subestimados requerem uma melhor investigação para descoberta deste ocorrido.



**Figura 18.** Representação gráfica do saldo de radiação para os dias em estudo na área degradada.

**Tabela 7.** Valores da radiação de onda curta -  $R_s \downarrow$  estimada e medida para os dias estudados na área de caatinga degradada.

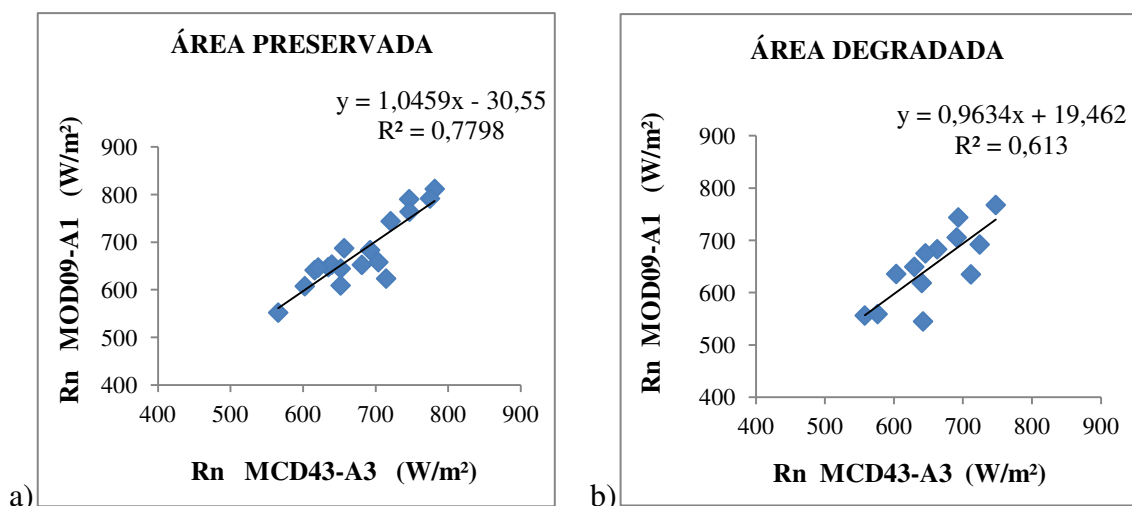
DOA	Data	$R_s \downarrow$ estimada	$R_s \downarrow$ medida
81	22/03/2013	927,324	868,22
105	15/04/2013	868,591	843,95
137	17/05/2013	811,266	767,02
169	18/06/2013	779,651	756,65
193	12/07/2013	706,981	605,81
209	28/07/2013	745,028	795,94
217	05/08/2013	845,267	575,36
233	21/08/2013	876,023	774,7
249	06/09/2013	928,958	496,9
281	08/10/2013	909,243	912,1
289	16/10/2013	956,247	892,08
313	09/11/2013	920,018	883,05
361	27/12/2013	893,743	661,99



Bisht e Bras (2010) obtiveram resultados mais satisfatórios na estimativa do saldo de radiação, porém, a metodologia completa utilizada em seu trabalho dispõe de vários outros produtos MODIS, e várias outras vertentes; e a área onde foi aplicada a pesquisa não corresponde ao tipo de área que foi estudada neste trabalho, visto que a Caatinga tem muitas peculiaridades.

Em sua pesquisa, Kim e Hogue (2013) observaram que as incertezas (fontes de erros) significativas nas estimativas, podem resultar das diferenças evidentes de escala entre os valores estimados com imagens MODIS e valores medidos *in situ*.

A Figura 19 representa as dispersões entre Rn calculado com os dois tipos de cômputo de albedo (MCD43-A3 e MOD09-A1), para ambas as áreas estudadas. Em que o coeficiente de determinação foi maior para a área preservada, com  $R^2 = 0,78$ ; e menor para a área degradada, com  $R^2 = 0,61$ .



**Figura 19.** Correlação entre o saldo de radiação obtido com MOD09-A1 e o MCD43-A3 para as áreas preservada (a) e degradada (b), para os respectivos dias estudados em cada área.

A partir de  $R_n$  estimados, aplicou-se o teste estatístico  $t$ -Student (bicaudal) para determinar a significância dos coeficientes de correlação ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). De acordo com a análise estatística, a metodologia utilizada apresenta uma melhor qualidade do ajuste para a área preservada. Em que para a área preservada, a variação explicada de ambos os modelos (utilizando o MCD43-A3 e o MOD09-A1) foi de 78%; e para a área degradada foi de 61%. Na Tabela 8, observa-se que a hipótese nula ( $\rho = 0$ ), ao nível de significância de 5% foi aceita para ambas as áreas estudadas, pois os valores de  $t$ -calculado recaíram na região de aceitação da curva de distribuição do teste. Portanto, não há uma relação de significância entre os valores de  $R_n$  estimados com o MCD43-A3 em relação aos estimados com o MOD09-A1.

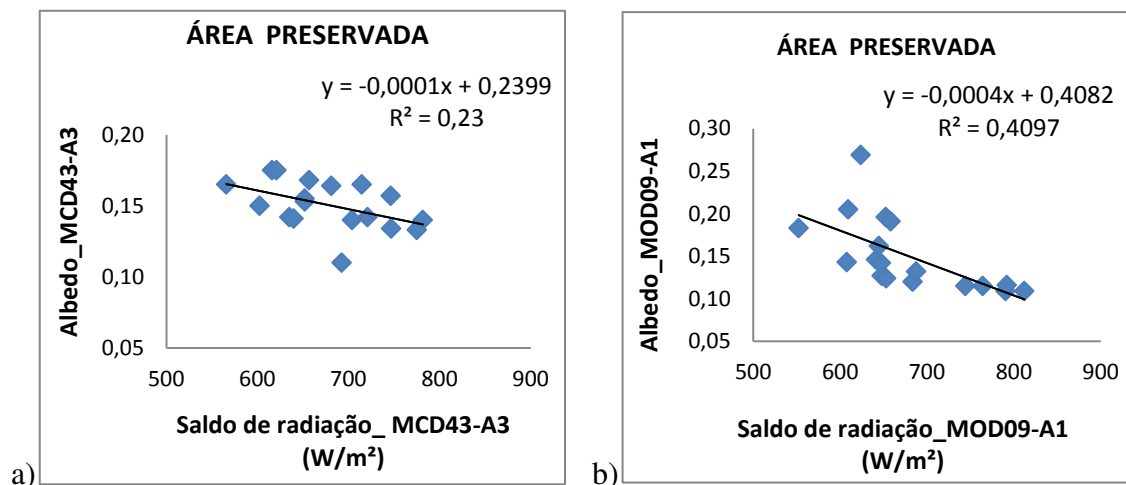
**Tabela 8.** Resultados da aplicação do teste estatístico  $t$ -Student, onde  $R^2$  é o coeficiente de determinação,  $r$  é o coeficiente de correlação,  $gl$  é o número de graus de liberdade,  $t$ -calculado e  $t$ -crítico.

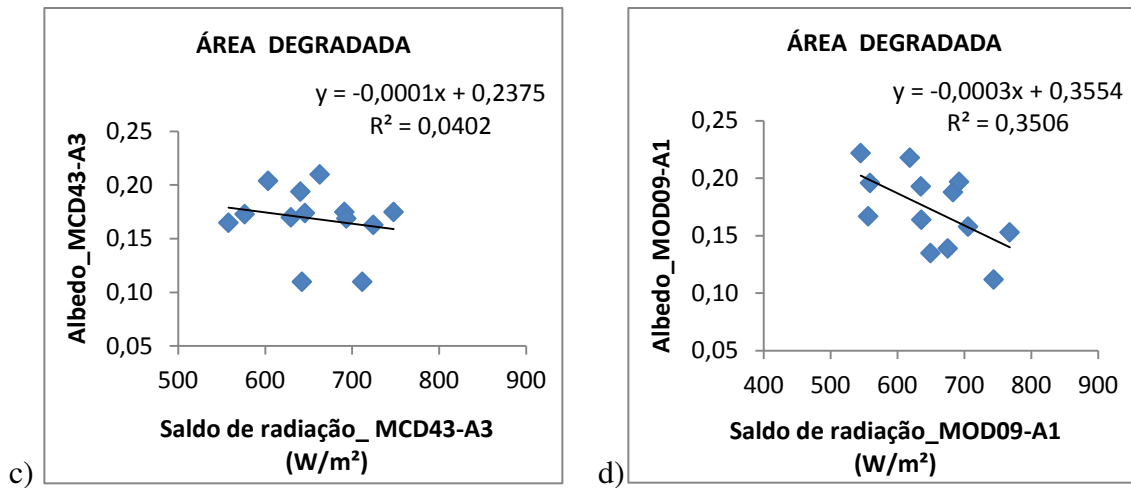
ÁREA	$R^2$	$r$	$gl$	$t$ -calculado	$t$ -crítico
Preservada	0,779	0,883	33	-0,025	2,035
Degradada	0,613	0,783	23	0,182	2,069

### 5.2.1 Análise do saldo de radiação versus albedo da superfície

De acordo com Pereira (2002), pelo fato de o albedo estar relacionado diretamente com o saldo de radiação ( $R_n$ ), quanto mais escura for o tipo de vegetação, menor será a refletividade da radiação solar incidente e maior será a absorção, ou seja, maior será o  $R_n$  da vegetação. A vegetação é o grande componente na variação da resposta espectral da superfície.

Os resultados relacionados ao albedo e saldo estimados estão de acordo com o estudo de Santos e Santos (2013), que analisaram essas variáveis para a mesma área e ano de validação deste trabalho. Tendo em vista que quanto menor foi o albedo maior foi o saldo de radiação; com exceção o DOA 249 para a área preservada utilizando o MOD09-A1 para o cômputo de  $\alpha$  e utilizando o MCD43-A3 para o cômputo de  $R_n$ , que foi um dia totalmente atípico com relação as estimativas do albedo e saldo, e também ao albedo e saldo e medido, onde  $\alpha$  estimado foi 0,17 e  $\alpha$  medido foi 0,11 e  $R_n$  estimado foi de 714,36 W/m<sup>2</sup> e  $R_n$  medido foi de 492,73 W/m<sup>2</sup>. E também para este mesmo DOA,  $R_n$  e  $\alpha$  estimados a partir do MOD09-A1 surgiram valores discrepantes com relação a  $R_n$  e  $\alpha$  medidos, sendo  $R_n$  de 623,62 W/m<sup>2</sup> e  $\alpha$  de 0,27 (resultado que não deixa de ser coerente com  $R_n$  inversamente proporcional a  $\alpha$ , porém deu bastante discrepante com relação aos valores medidos). Para o restante dos DOA's da área preservada, para os dois tipos de cômputo dos produtos, a variação de  $R_n$  seguiu inversamente proporcional à variação de  $\alpha$ , como mostra a Figura 20.

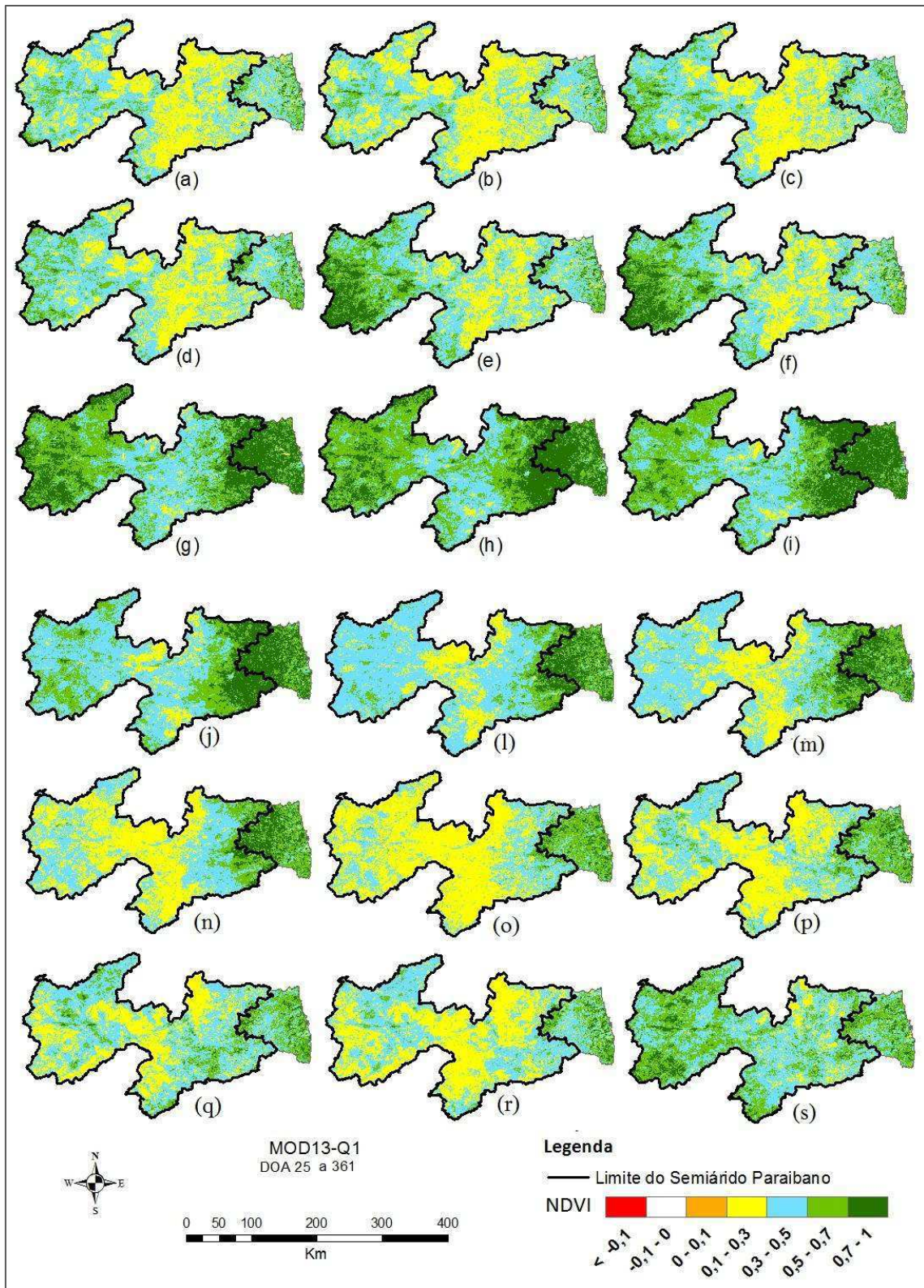




**Figura 20.** Dispersão entre o albedo e o saldo de radiação estimados para área preservada e degradada, ambos calculados com o MCD43-A3 e com o MOD09-A1.

### 5.2.2 Análise do saldo de radiação versus NDVI

Para uma melhor análise, foram gerados mapas de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) a fim de obter uma correlação entre os valores do saldo radiativo e o NDVI do Estado da Paraíba. Para tanto, foi utilizado o produto MOD13-Q1 do MODIS/Terra, este dispõe em uma de suas composições o NDVI. Uma vez que, a vegetação (tipo, condição hídrica, tamanho, distribuição espacial da folhagem) influi no albedo, e este que por sua vez é um forte fator de influência na determinação do saldo de radiação. A Figura 21 mostra a espacialização do NDVI para a Paraíba.



**Figura 21.** Mapa do NDVI, referente aos dias de ordem do ano: 25 (a), 33 (b), 57 (c), 65 (d), 81 (e), 105 (f), 137 (g), 169 (h), 193 (i), 209 (j), 217 (l), 233 (m), 249 (n), 281 (o), 289 (p), 313 (q), 329 (r) e 361 (s).

Como já foi citado anteriormente por INSA (2014), os meses de abril a julho de 2013, foram os meses onde a vegetação apresentou melhores condições hídricas, portanto, foram considerados os meses mais chuvosos deste ano, o que indica uma diminuição do saldo de radiação e um aumento do NDVI. É possível essa visualização na Figura 21 (f), (g) e (h), onde a partir do DOA 105 o NDVI apresenta um crescente aumento gradativo até o DOA 169, após isso, é possível observar o decréscimo do índice (Figura 21 (i) a (p)).

Na análise geral do NDVI para o ano de 2013, têm-se que a classe predominante na região semiárida da Paraíba, são a de valores entre 0,1 a 0,3, e logo em seguida, a classe entre 0,3 e 0,5. De acordo com os resultados encontrados por Rodrigues et al (2009), como esperado, esses resultados são indicadores da vegetação bastante rala ou sem vegetação, o que realmente caracteriza uma vegetação do semiárido brasileiro.

Para a área preservada, o NDVI apresentou mínimo de 0,28 no DOA 361 (correspondente ao mês de dezembro, época da estação seca) e máximo de 0,82 no DOA 193 (correspondente ao mês de julho, época do período chuvoso). Para a área degradada, o índice apresentou mínimo de 0,23 para o DOA 81 (período de estiagem) e máximo de 0,65 para o DOA 193 (período chuvoso).

A área destacada da Tabela 9 indica os dados no período chuvoso da região, onde é possível notar o aumento do NDVI, a menor incidência de radiação de onda curta e valores mais baixos de saldo de radiação, para ambas as áreas analisadas.

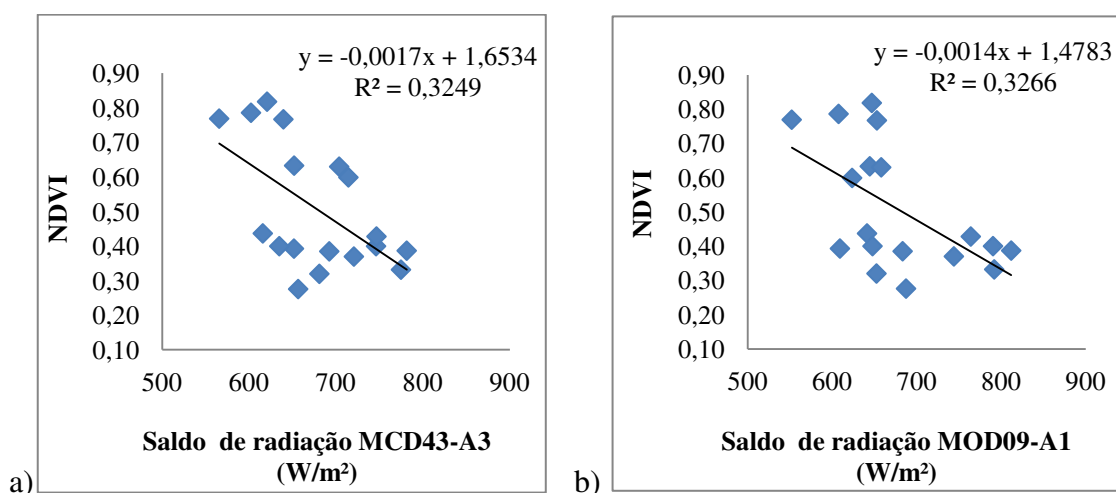
**Tabela 9.** Resultados estimados do saldo radiativo (para os dois tipos de cômputo) -  $R_n$ , radiação de onda curta incidente -  $R_s \downarrow$  e NDVI, para a área preservada e degradada.

ÁREA PRESERVADA					ÁREA DEGRADADA			
DOA	$R_n$ MCD43 -A3 (W/m <sup>2</sup> )	$R_n$ MOD09 -A1 (W/m <sup>2</sup> )	$R_s \downarrow$ estimada	NDVI estimado	$R_n$ MCD43- A3 (W/m <sup>2</sup> )	$R_n$ MOD09 -A1 (W/m <sup>2</sup> )	$R_s \downarrow$ estimada	NDVI estimado
25	615,84	641,29	863,65	0,44	NPD	NPD	NPD	NPD
33	651,68	609,21	848,92	0,39	NPD	NPD	NPD	NPD
57	680,93	652,48	886,81	0,32	NPD	NPD	NPD	NPD
65	692,32	683,44	920,90	0,39	NPD	NPD	NPD	NPD
81	746,16	790,42	927,09	0,40	662,75	683,14	927,32	0,23
105	634,82	647,80	866,56	0,40	642,26	545,02	868,59	0,23
137	565,64	552,12	734,40	0,77	603,38	635,82	811,27	0,44
169	639,56	652,98	782,04	0,77	629,56	649,48	779,65	0,63
193	620,76	646,95	799,61	0,82	557,78	556,33	706,98	0,65
209	602,26	607,62	742,37	0,79	576,43	559,08	745,03	0,64
217	651,87	644,55	791,40	0,63	645,71	675,28	845,27	0,44
233	720,66	744,09	874,41	0,37	691,06	705,69	876,02	0,49
249	714,36	623,62	876,12	0,60	747,64	767,79	928,96	0,43
281	781,42	811,94	980,28	0,39	640,49	618,57	909,24	0,31
289	774,82	791,82	977,22	0,33	724,35	692,18	956,25	0,38
313	703,70	658,08	895,13	0,63	711,65	635,05	920,02	0,29
329	746,63	764,12	921,93	0,43	NPD	NPD	NPD	NPD
361	656,54	687,43	853,62	0,28	693,34	743,95	893,74	0,26

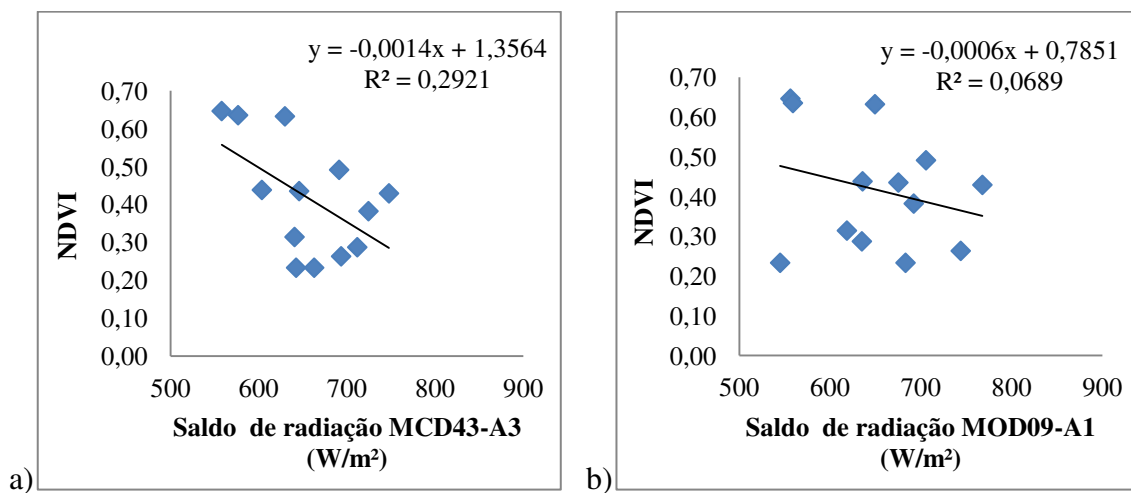
**NPD = não possui dados.**

Para os resultados encontrados da correlação entre o saldo radiativo e o NDVI para a área preservada e degradada (Figuras 22 e 23), a dispersão indica que  $R_n$  e o NDVI possuem uma correlação linear negativa, onde à medida que o NDVI decresce o saldo radiativo aumenta. Portanto, para a maioria dos dias estudados, os maiores saldos correspondem aos menores índices de NDVI, exceto no período chuvoso, onde ocorreram os maiores valores de NDVI. Isto ocorre, pois, nesse período houve menos radiação incidente chegando à superfície, portanto há a ocorrência de saldos menores.





**Figura 22.** Correlações lineares entre o saldo de radiação MCD43-A3 (a) e o saldo de radiação com o MOD09-A1(b) com o NDVI, para a área preservada (para os dias de ordem do ano: 25, 33, 57, 65 81, 105, 137, 169, 193, 209, 217, 233, 249, 281, 289, 313, 329 e 361).



**Figura 23.** Correlações lineares entre o saldo de radiação MCD43-A3 (a) e o saldo de radiação com o MOD09-A1(b) com o NDVI, para a área degradada (para os dias de ordem do ano: 81, 105, 137, 169, 193, 209, 217, 233, 249, 281, 289, 313 e 361).

Embora vários autores tenham encontrado, para áreas de floresta e de cerrado, uma correlação positiva entre o saldo de radiação e o NDVI, onde o NDVI aumenta



conforme  $R_n$  aumenta, foi visto um cenário diferente na presente pesquisa. Isso porque a vegetação da caatinga possui peculiaridades; no período de estiagem seus estômatos são fechados para evitar uma maior perda de água pela transpiração, e sua resposta espectral é muito rápida quando esta recebe chuva. A paisagem muda rapidamente; as árvores cobrem-se de folhas e o chão fica forrado de pequenas plantas. Quando termina o período chuvoso, a vegetação ainda possui um vigor, mas logo depois vai perdendo sua capacidade hídrica, como mostrado na Figura 21.

De acordo com os valores do coeficiente de determinação -  $R^2$  (das Figuras 22 (a) e (b) e 23 (a) e (b)), houve uma melhor correlação linear entre NDVI e  $R_n$  para a área preservada, entretanto, a correlação entre essas duas variáveis foi fraca devido ao baixo valor de  $R^2$ . Porém, Timm (2002) afirma que, quando duas variáveis são estatisticamente independentes, o coeficiente de correlação linear é igual a zero. Entretanto, a recíproca não é verdadeira, ou seja, se o coeficiente de correlação linear for igual a zero, não significa que as variáveis sejam independentes. Isso ocorre porque o coeficiente de correlação linear é uma medida da dependência linear entre as variáveis e, em algumas situações, podem apresentar dependência funcional não linear (TIMM, 2002).

## 6. CONCLUSÕES

Os valores de  $\alpha$ , para a estimativa com as duas propostas, foram mais elevados na área degradada, evidentemente devido a maior exposição do solo, o que ocasiona uma maior refletividade da superfície. O que deixa claro a influência da cobertura do solo no balanço de radiação à superfície.

Diante dos resultados encontrados, pode-se constatar a eficácia do produto de albedo pronto (MCD43-A3), tanto para a área de caatinga preservada, como para a área de caatinga degradada, através da validação feita entre os dados medidos e os dados estimados com o produto de albedo pronto e o produto do albedo calculado através do MOD09-A1. Onde o EMP do MCD43-A3 foi mais satisfatório que o EMP do albedo calculado pelo MOD09-A1 em ambas as áreas (preservada e degradada). Entretanto, o EMP relacionado ao albedo MCD43-A3 deu-se mais satisfatório na área degradada, o que mostra uma forte indicação que a metodologia proposta tem maior eficácia em áreas com o solo mais descoberto. Todavia não houve relação significativa entre  $\alpha$  MCD43-A3 e  $\alpha$  MOD09-A1, pois de acordo com a análise estatística, o modelo proposto não apresentou uma boa qualidade do ajuste para a área preservada nem para a área degradada. Em que para a área preservada, a variação explicada na relação entre o MCD43-A3 e o MOD09-A1 foi de 18%; e para a área degradada foi de apenas 7%.

Não houve uma relação de significância entre os valores de  $R_n$  estimados com o MCD43-A3 em relação aos estimados com o MOD09-A1. E de acordo com a análise estatística, a metodologia apresentou uma melhor qualidade do ajuste para a área preservada, onde para esta, a variação explicada de ambos os modelos (utilizando o MCD43-A3 e o MOD09-A1) foi de 78%; e para a área degradada foi de 61%.

O tamanho do pixel das imagens com relação à área de abrangência dos sensores de radiação pode ser um fator agravante para ocasionar superestimativas ou subestimativas do albedo e, conseqüentemente, (juntamente com a superestimativa/subestimativa da radiação de onda curta incidente) do saldo de radiação. Todavia, embora os dados passem por inúmeras correções para chegar ao produto final, erros sistemáticos são inerentes à aquisição de dados via plataforma orbital, onde uma das principais causas são os efeitos atenuantes da atmosfera.

Houve uma fraca correlação entre os saldos radiativos (estimados) e o NDVI (estimado) para a região semiárida onde estão localizadas as torres micrometeorológicas. Isso é devido, possivelmente, à grande irregularidade climática que ocorreu no ano de 2013, tendo em vista que qualquer incidência de chuva forte, ou de alguns dias sequenciais com chuva fraca, já despertam a vegetação da Caatinga, mudando o cenário do NDVI. E também, deve-se levar em consideração que no caso da Caatinga, diversos fatores devem ser analisados, pois este bioma possui comportamento diferente dos demais.

A metodologia empregada neste estudo demonstra que não é recomendada sua utilização para estudos com o intuito de obter resultados extremamente precisos na aplicação em áreas heterogêneas como a caatinga. Entretanto, levando em consideração que o método empregado não exige nenhum tipo de dados medidos em superfície, e seus erros médios percentuais estiveram em torno de 20% (limiar aceitável por outros autores em diversas pesquisas deste tipo), torna sua aplicabilidade eficiente para áreas heterogêneas como a caatinga a fim de obter resultados aproximados.

## 7. REFERÊNCIAS

AGEITEC. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Bioma Caatinga. Embrapa Semiárido, Petrolina-PE, 2012. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma\\_caatinga/arvore/CONT000g798rt3p02wx5ok0wtedt3nd3c63l.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000g798rt3p02wx5ok0wtedt3nd3c63l.html)>. Acesso em: 20 de janeiro de 2015.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.133, n.4, 395-406 p., 2007.

ALVES, J. J. A. Geocologia da caatinga no semi-árido do Nordeste brasileiro. CLIMEP: Climatologia e Estudos da Paisagem, Rio Claro, v.2, n.1, p. 58-71, 2007.

ALVES, J. A. A.; ARAÚJO, M. A.; NASCIMENTO, S. S. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Caminhos de geografia – revista on line**. ISSN 1678-6343. v. 9, n.27, 143-155 p., Uberlândia, 2008.

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; JÚNIOR, O. A. C. Sensor MODIS: Uma abordagem geral. **INPE-10131-RPQ/752**. INPE, São José dos Campos - SP, 2003.

ANDRADE, L.A.; PEREIRA, I. M; LEITE, U.T; BARBOSA, M.R.V. Análise da cobertura de duas fisionomias de caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, Estado da Paraíba. *Cerne*, Lavras, v.11, n. 3, p. 253 – 262, jul./set. 2005.

BARKER, J. L.; HARDEN, M. K.; ANUTA, E. A.; SMID, J. e HOUGHT, D. **MODIS spectral sensitivity study: requirements and characterization**. 84p. Washington: NASA, Oct, 1992.

BASTOS, D. C. O; Apostila de Meteorologia e Climatologia agrícola. Radiação Solar. Faculdade da Amazônia, Curso de Agronomia, 2009. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/21355777/Apostila-Prof-Danilo-RADIACAO-SOLAR#scribd>>. Acesso em: 26 de janeiro de 2015.

BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, Le. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**. v.97, p. 52–67, 2005.

BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. **Remote Sensing of Environment**. v.114, p. 1522–1534, 2010.

BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer over the continental United States. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v.49, n 6, p. 2448-2462, jun 2011.

CUNHA, A. P. M. A.; CANAVESI, V.; VIEIRA, R. M. S. P.; ALVALÁ, R. C. S. Validação do albedo da superfície terrestre obtido a partir de imagens do sensor MODIS em área de Caatinga. In SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, III , 2009, Canela. **Anais do Simpósio Internacional de Climatologia**. 2009.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Boletim de Pesquisa Online nº4. Disponível em: <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p\\_bo04\\_3.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_bo04_3.htm)>. Acesso em: 21 de maio de 2014.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para Estudos Ambientais**. 1ª ed. p. 11. São Paulo - SP: Oficina de Textos, 2002.

GIONGO, P. R. Estimativa do balanço de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. 94p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Estados**. . Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb>>. Acesso em: 18 de maio de 2014.

IQBAL, M. An Introduction to Solar Radiation. New York: Academic Press, 212p, 1980.

Instituto Nacional do Semiárido (INSA). **Pesquisadores divulgam melhorias no Índice de vegetação do Semiárido com recentes chuvas**. Disponível em:

<[http://www.insa.gov.br/noticias/pesquisadores-divulgam-melhorias-no-indice-de-vegetacao-do-semiarido-com-recentes-chuvas/#.VckfQ\\_IViko](http://www.insa.gov.br/noticias/pesquisadores-divulgam-melhorias-no-indice-de-vegetacao-do-semiarido-com-recentes-chuvas/#.VckfQ_IViko)>. Acesso em: 10 de agosto de 2015. Campina Grande – PB, 18 de fevereiro de 2014. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de Biomas e de Vegetação**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso em: 03 de junho de 2014.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite – PMDBBS**. CAATINGA. Disponível em <<http://siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/caatinga/caatinga.htm>>. Acesso em: 03 de junho de 2014.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: José Carlos Epiphânio. *et al.* São José dos Campos - SP: Parêntese, 2011.

KIM, J.; HOGUE, T. S. Evaluation of a MODIS triangle-based evapotranspiration algorithm for semi-arid regions. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, 2013.

KING, M. EOS Data Product Handbook, v. 1, 258 p. NASA Goddard Space Flight Center, 2003.

LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v.76, p.213-238, 2000.

LUETZELBURG, P. V. Estudo Botânico do Nordeste. Edição Comemorativa do XXV Congresso Nacional de Botânica. Mossoró-RN: DNOCS, 1982.

MONTEIRO, M. Desertificação ameaça o nordeste brasileiro. **Revista Ecologia e Desenvolvimento**, n. 51, p. 15-19. Rio de Janeiro-RJ, maio, 1995.

MOURA, M. S.; GALVÍNCIO, J. D.; BRITO, L. T. de L.; SILVA, A de S.; SÁ, I. I. de.; LEITE, W. de M. Influência da precipitação pluviométrica nas áreas de captação de água da chuva na Bahia. Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva, 6. **Anais...** Belo Horizonte: ABCMAC, 2007. CD Rom.

NASA, MODIS - *Terra*, 2014. Disponível em: <[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/terra/overview/index.html#.VMg3nP54pkA](http://www.nasa.gov/mission_pages/terra/overview/index.html#.VMg3nP54pkA)>.

Acesso em: 27 de janeiro de 2015.

NASA, *Moderate Resolution Imaging Spectrometer*, 2006. Disponível em: <<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>>. Acesso em: 06 de junho de 2014.

NETO, B. M. **Geografia: Textos, Contextos e Pretextos para o Planejamento Ambiental**. 1ª ed. Guarabira - PB: Gráfica São Paulo, 2003.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto. Curso de Especialização em Geoprocessamento. UFRJ, IGEO, Dep. Geografia, LAGEOP, Rio de Janeiro, 1999, Volume 2, Mídia CD.

OLIVEIRA, A. S. Fundamentos de Meteorologia e Climatologia – Cap. IV- Radiação Solar. NEAS/UFRB. Disponível em: <[www.ufrb.edu.br/neas](http://www.ufrb.edu.br/neas)>. Acesso em 22 de maio de 2014.

OLIVEIRA, W. M. de; CHAVES, I. B.; LIMA, E. R. V. Índices espectrais de vegetação de caatinga em um Neossolo Litólico do semiárido paraibano. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** INPE, p.2103-2110 . Natal – RN, Brasil, 25-30 abril 2009,.

OLIVEIRA, M. B. L.; SANTOS, A. J. B.; MANZI, A. O.; ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, M. F.; MOURA, M. S. B. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 21, n. 3b, p. 166-174, 2006.

OYAMA, M. D. Consequências climáticas da mudança da vegetação no nordeste brasileiro: Um estudo de modelagem. 2002. 220p. (INPE-9898-TDI/875). Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – São José dos Campos: INPE, 2003.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. 413 p São Paulo – SP: Ed. Agronômica Ceres, 1981.

PARAÍBA. Governo da Paraíba. Ago/2012. Disponível em: <<http://www.paraiba.pb.gov.br/54543/sudema-comemora-aprovacao-da-lei-do-bioma-caatinga-na-paraiba.html#>>. Acesso em: 24 de janeiro de 2015.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. 183p. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEREIRA, A. R., VRISMAN, A. L., GALVANI, E. estimativa da Radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. *Scientia Agrícola*. v. 59, p.211-216. abr./jun. 2002.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R; SENTELHAS, P. C. *Agrometeorologia Fundamentos e Aplicações Práticas*. 478 p. Guaíba - RS: Agropecuária, 2002.

PRATA, A. J. “A new long-wave formula for estimating downward clear sky radiation at the surface,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 122, no. 533, pp. 1127–1151, Jul. 1996.

REGIONAL. Diário do Nordeste. 2011. Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/regional/defensivo-natural-e-utilizado-para-proteger-caatinga-1.310442>>. Acesso em: 02 de junho de 2014.

RIMÓCZI – PAÁL, A. Mapping of radiation balance components for region of Hungary using satellite information. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.30, p. 151-158, 2005.

ROBBINS, J. “High-Tech Camera Sees What Eyes Cannot”. *The New York Times*, Science Section, September 14, 1999. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/1999/09/14/science/high-tech-camera-sees-what-eye-cannot.html?src=pm&pagewanted=2>>. Acesso em: 22 de maio de 2014.

RODRIGUES, J.O; ANDRADE, E. M.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA, B.B. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 3, p. 452-465, 2009

SALOMONSON, V.V.; TOLL, D.L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS-N) facility instrument. **Advances in Space Research**, v.2, n.3, p.231-236, 1990.



SANTOS, F. A. C. Alterações no balanço radiativo e impactos climáticos decorrentes do uso da terra no Estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande-PB, 2011.

SANTOS, F. A. C.; SANTOS, C. A. C. Estimativa do balanço radiativo em área de caatinga através de imagens orbitais MODIS. In: I Workshop Internacional Sobre Água no Semiárido Brasileiro. **Anais...** Campina grande-PB, novembro de 2013.

SANTOS, J. M. P. dos; FARIAS, C. R. O. XIII Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão. Semana da Caatinga: uma vivência para percepção e valorização do bioma – UFRPE. Recife, PE, 09 a 10 de dezembro, 2013. Disponível em: <<http://www.eventosufrpe.com.br/2013/cd/resumos/R0914-1.pdf>>. Acesso em: 02 de junho de 2014.

SHIPPERT, P. Spotlight on Hyperspectral, Boulder: Research Systems. 5 p. 2004. Disponível em:<[www.geoespacial\\_online.com/shippert](http://www.geoespacial_online.com/shippert)>. Acesso em: 28 de maio de 2014.

SILVA, V. de P. R. da; CAVALCANTI, E. P.; NASCIMENTO, M. G. do; CAMPOS, J. H. B. da C. Análises da precipitação pluvial no Estado da Paraíba com base na teoria da entropia. **Revista Brasileira de Eng. Agrícola Ambiental**, v. 7, n. 2. Campina Grande, Maio/Agosto 2003.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.13, n.2, p.201-211, 2005.

SOUZA, C. F. Aceitação da utilização de um jogo de tabuleiro como facilitador da aprendizagem entre alunos do ensino médio. Monografia (Licenciatura em Ciências Biológicas). Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, 2007.

SOUZA, M. J. H. de; RAMOS, M. M.; COSTA, L. C.; LHAMAS, A. J. M.; SIQUIRA, D. L. de. Déficit hídrico e radiação interceptada e refletida pela Limeira Ácida Thahiti. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. **Anais...** 1 CD ROM. Foz do Iguaçu – PR, 12, 2002.

STRAHLER, A.; MUCHONEY, D.; BORAK, J.; FRIEDL, M.; GOPAL, S.; LAMBIN, E.; MOODY, A. **MODIS land cover and land-cover change product Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 5.0**. 72 p. Center for Remote Sensing, Department of Geography, Boston: University, 1999.

STRAHLER, A.; TOWNSHEND, J.R.G.; MUCHONEY, D.;BORAK, J.; FRIEDL, M; GOPAL, S.; HYMAN, A.; MOODY, A.; LAMBIN, E. **MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD) Version 4.1**. 102 p. Washington: NASA, EOS-MTPE, Documentation, 1996.

SUASSUNA, J. Semiárido: proposta de convivência com a seca. Fund. Joaquim Nabuco. Recife - PE, 2002. Disponível em: <[http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=659&Itemid=376](http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=659&Itemid=376)>. Acesso em: 21 de maio de 2014.

TANG, R.; LI, Z. L.; CHEN, K. S. “Validating MODIS-derived land surface evapotranspiration with in situ measurements at two Ameriflux sites in a semiarid region,” **J. Geophys. Res.** 116, D04106 (2011).

TIMM, N. H. Applied Multivariate analysis. Springer. United States of America, 2002.

TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE C., LI, W.; GURNEY, C.; MCMANUS, J. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. **Remote Sensing of Environment**, v.35, n.2-3, p. 243-255, 1991.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 1ª ed. 449 p. Viçosa-MG, UFV: Imprensa Universitária, 1991.

WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. **International Geophysics Series**. 2d ed, Vol. 91, 627 p. Academic Press, 2006.

WEBER, E. J. Estimativa e mapeamento da radiação solar incidente em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, 2011.