

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Lindenberg Lucena da Silva

**Simulação Numérica dos Fluxos Turbulentos em
Ambientes do Ecossistema Caatinga no Semiárido
Brasileiro**

Campina Grande, fevereiro de 2020



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

TESE DE DOUTORADO

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS FLUXOS TURBULENTOS EM AMBIENTES
DO ECOSISTEMA CAATINGA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

LINDENBERG LUCENA DA SILVA

Campina Grande-PB

Fevereiro de 2020

LINDENBERG LUCENA DA SILVA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS FLUXOS TURBULENTOS EM AMBIENTES
DO ECOSISTEMA CAATINGA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Área de concentração: Agrometeorologia e Micrometeorologia

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento as exigências para obtenção ao grau de Doutor em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos

Campina Grande-PB

Fevereiro de 2020

S586s

Silva, Lindenberg Lucena da.

Simulação numérica dos fluxos turbulentos em ambientes do ecossistema caatinga no semiárido brasileiro / Lindenberg Lucena da Silva. – Campina Grande, 2023.

86 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos".

Referências.

1. Agrometeorologia. 2. Micrometeorologia. 3. Vegetação Caatinga. 4. Modelo Weather Research & Forecasting (WRF). 5. Fluxo de Calor Latente. 6. Fluxo de Calor Sensível. I. Santos, Carlos Antônio Costa dos. II. Título.

CDU 631:551.5(043)

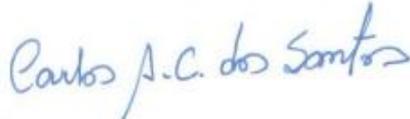
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15/225

LINDENBERG LUCENA DA SILVA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS FLUXOS TURBULENTOS EM AMBIENTES DO
ECOSSISTEMA CAATINGA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

TESE APROVADA EM 14/02/2020

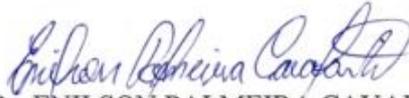
BANCA EXAMINADORA



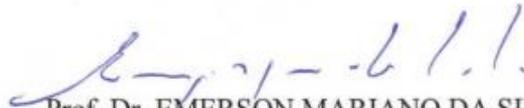
Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. EMERSON MARIANO DA SILVA
Centro de Ciências e Tecnologia
Universidade Estadual do Ceará



Prof. Dr. JOSÉ MARIA BRABO ALVES
Centro de Ciências e Tecnologia
Universidade Estadual do Ceará

DEDICATÓRIA

A Deus pela proteção, saúde e paz familiar, a meu pai Jandui Lucena da Silva (*In memoriam*), a minha mãe Amélia Resende da Silva, aos meus irmãos Joab e Jandui Júnior, as minhas filhas, Lorena e Brendha e a minha esposa Adeilda pela compreensão nos momentos difíceis.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo simular numericamente os fluxos turbulentos, em particular os fluxos de calor latente e calor sensível, em quatro períodos do ano de 2014 em dois ambientes de vegetação de Caatinga (preservada e degradada). Para este fim, foram utilizados dados coletados *in situ* de duas torres micrometeorológicas do projeto intitulado “Balanço de Energia e fluxo de CO₂ em Ambientes do Ecossistema Caatinga no Semiárido Brasileiro”. Para este estudo, foram escolhidos quatro períodos do ano de 2014 com as seguintes datas: 23 a 31 de março, 21 a 29 de junho, 22 a 30 de setembro e 23 a 31 de dezembro. Para os mesmos períodos foram realizadas simulações numéricas utilizando o modelo *Weather Research & Forecasting* (WRF) para três domínios com resoluções de 15 Km, 5 Km e 1 Km. Apesar das chuvas abaixo da média, na análise dos dados médios de fluxo de calor latente medidos, observa-se que no período do mês de junho de 2014 esses valores foram bem maiores que nos outros meses devido ser junho o mês mais úmido do ano. Com isso, grande parte da energia disponível é usada na evapotranspiração. Os resultados simulados mostram que os fluxos de calor latente apresentam melhores resultados, quando comparados com os dados observados no mês de junho, tanto em Caatinga preservada como em Caatinga degradada nas duas grades do modelo, d01 (15Km), d02 (5Km) e d03 (1Km). Quanto aos fluxos de calor sensível, em praticamente todas as simulações, o modelo simulou satisfatoriamente os dados observados.

Palavras-chave: Vegetação Caatinga, modelo WRF, Fluxo de calor latente e Fluxo de calor sensível.

ABSTRACT

This study aims to numerically simulate turbulent flows, in particular, the latent and sensible heat fluxes in two contrasting environments of Caatinga vegetation (preserved and degraded). For this purpose, data collected in situ from two micrometeorological towers of the research project entitled “Energy Balance and CO₂ fluxes in Environments of the Caatinga Ecosystem in the Brazilian Semiarid” were used. Thus, four periods of the year 2014 were chosen with the following dates: 23 to 31 March, 21 to 29 June, 22 to 30 September, and 23 to 31 December. For the same periods, numerical simulations were performed using the Weather Research & Forecasting (WRF) model for two domains with resolutions of 15 km, 5 km and 1 km. Despite the below-average rainfall, in the analysis of the average latent heat fluxes data measured, it was noted that in the period of June 2014, these values were much higher than in other months due to June being the wettest month of the year. As a result, much of the available energy was used to evapotranspiration. The simulated results showed that the latent heat flux present better results when compared to the data observed in June, both in preserved Caatinga and in degraded Caatinga in the two grids of the model, d01 (15Km), d02 (5Km) and d03 (1Km). As for the sensible heat fluxes, in practically all simulations, the model satisfactorily simulated the observed data.

Keywords: Caatinga vegetation, WRF model, Latent heat flux, Sensible heat flux.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem do Google Earth com as localizações das Torres Micrometeorológicas de Campina Grande-PB em Caatinga preservada e degradada.	8
Figura 2 – Precipitação observada para os meses em estudo na Estação Experimental do INSA no ano de 2014 em Campina Grande-PB.	14
Figura 3 – Domínios do modelo WRF d01, d02 e d03 com resoluções espaciais de 15 Km, 5 Km e 1 Km, respectivamente.	15
Figura 4 – Domínio da grade com resolução de 15 Km e topografia (m).	16
Figura 5 – Domínio da grade com resolução de 5 Km e topografia (m).	16
Figura 6 - Domínio da grade com resolução de 1 Km e topografia (m).	17
Figura 7 – Sistema de coordenadas verticais do modelo WRF.	18
Figura 8 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 23 a 31 de março de 2014 em W.m-2.	25
Figura 9 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 21 a 29 de junho de 2014 em W.m-2.	25
Figura 10 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 22 a 30 de setembro de 2014 em W.m-2.	26
Figura 11 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 23 a 31 de dezembro de 2014 em W.m-2.	26
Figura 12 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 23 a 31 de março de 2014 em W.m-2.	27
Figura 13 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 21 a 29 de junho de 2014 em W.m-2.	28
Figura 14 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 22 a 30 de setembro de 2014 em W.m-2.	28
Figura 15 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 23 a 31 de dezembro de 2014 em W.m-2.	29
Figura 16 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	30
Figura 17 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	30
Figura 18 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) para o domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	31
Figura 19 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	32
Figura 20 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	32
Figura 21 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	33
Figura 22 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	34

Figura 23 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	34
Figura 24 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	35
Figura 25 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	36
Figura 26 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	36
Figura 27 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	37
Figura 28 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	38
Figura 29 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	38
Figura 30 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) para no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	39
Figura 31– Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	40
Figura 32 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	41
Figura 33 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	41
Figura 34 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	42
Figura 35 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	43
Figura 36 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	44
Figura 37 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	44
Figura 38 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	45
Figura 39 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	45
Figura 40 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	46
Figura 41 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	47
Figura 42 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	47

Figura 43 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	48
Figura 44 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	49
Figura 45 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	49
Figura 46 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	50
Figura 47 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	50
Figura 48 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) para o domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	51
Figura 49 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	52
Figura 50 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	53
Figura 51 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	53
Figura 52 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	54
Figura 53 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	55
Figura 54 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	56
Figura 55 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	56
Figura 56 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	57
Figura 57 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.	58
Figura 58 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	59
Figura 59 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.	59
Figura 60 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	60
Figura 61 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.	60
Figura 62 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	61
Figura 63 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.	61
Figura 64 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	75

Figura 65 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	75
Figura 66 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	76
Figura 67 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	76
Figura 68 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	77
Figura 69 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	77
Figura 70 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	78
Figura 71 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).	78
Figura 72 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	79
Figura 73 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	79
Figura 74 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	80
Figura 75 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	80
Figura 76 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	81
Figura 77 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	81
Figura 78 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	82
Figura 79 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).	82
Figura 80 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d03 (1 Km).	83
Figura 81 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d03 (1 Km).	83
Figura 82 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d03 (1 Km).	84
Figura 83 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d03 (1 Km).	84
Figura 84 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km).	85
Figura 85 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km).	85
Figura 86 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km).	86

Figura 87 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km)..... 86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlações dos fluxos de calor latente nos três domínios estudados.	62
Tabela 2 – Correlações dos fluxos de calor sensível nos três domínios estudados.	62
Tabela 3 – Correlações dos fluxos de calor latente nos três domínios estudados.	63
Tabela 4 – Correlações dos fluxos de calor sensível nos três domínios estudados.	63
Tabela 5 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga preservada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.....	63
Tabela 6 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga preservada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.....	64
Tabela 7 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga degradada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.....	64
Tabela 8 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga degradada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.....	65
Tabela 9 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga preservada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.	65
Tabela 10 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga preservada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.	65
Tabela 11 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga degradada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.	66
Tabela 12 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga degradada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.	66

LISTA DE ABREVEATURAS E SÍGLAS

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
CTRN	Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
UACA	Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
PPGMET	Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

LISTA DE SÍMBOLOS

R_n	Saldo de Radiação ($W.m^{-2}$)
R_s	Radiação de onda curta incidente ($W.m^{-2}$)
R_r	Radiação de onda curta refletida ($W.m^{-2}$)
L_{\downarrow}	Radiação de onda longa emitida pelo Sol ($W.m^{-2}$)
L_{\uparrow}	Radiação de onda longa emitida pela superfície para o espaço ($W.m^{-2}$)
H	Fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$)
LE	Fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$)
G	Fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$)
η	Sistema de coordenadas verticais do modelo WRF
σ	Componente hidrostática de pressão

AGRADECIMENTOS

Sempre achei essa a pior parte da tese para escrever, talvez porque a vida não se coloca em análise de regressão e não é pelo valor p que descobrimos a significância das pessoas na nossa trajetória.

Primeiro de tudo, gostaria de agradecer a Deus por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade, quando eu não a tinha, para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades.

Agradeço aos meus pais, Amélia Resende da Silva e JANDUI LUCENA DA SILVA (*In memoriam*) que sempre me motivaram, que entenderam as minhas faltas e momentos de afastamento e reclusão e me mostraram o quanto era importante estudar, mesmo não tendo eles a mesma oportunidade no passado, como também aos meus irmãos Joab e Jandui Júnior.

A minha esposa Adeilda Marinho e minhas filhas Lorena e Brendha, simplesmente por Deus as colocarem em minha vida.

Agradeço muito ao Professor Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos. Resumi-lo a meu orientador é muito pouco e tenho certeza de que ele sente a importância que teve e tem para mim não só na condução do trabalho, mas também como amigo.

Ao Professor Dr. Enilson Palmeira Cavancalti, por ter me orientado na ausência do meu orientador Professor Dr. Carlos Antônio Costa dos Santos, para realização do seu Pós-doutorado.

Agradeço a um amigo verdadeiro, o Professor Dr. Emerson Mariano da Silva, da Universidade Estadual do Ceará, que quando por inúmeras vezes, eu quis desistir de tudo ele falava: calma, não vos afobeis.

Agradeço a todos os amigos de trabalho da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA/PB.

Aos servidores da UACA, Arilene de Almeida Lucena pela dedicação e acompanhamento de toda minha trajetória durante todas as fases de doutoramento.

Agradeço a todos os colegas de doutorado, alguns desde o mestrado, que vivenciaram momentos de estudo, de escrita de artigo e de tensão, como a prova de qualificação, no decorrer desta jornada.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVA	5
3. OBJETIVOS	6
3.1 Geral	6
3.2 Específicos	6
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 A região em estudo	7
4.2 O balanço de energia	8
4.3 Os fluxos atmosféricos	9
4.4 Modelagem numérica	11
4.4.1 Modelos Meteorológicos de Mesoescala	11
4.5 O modelo WRF	12
5. MATERIAL E MÉTODOS	13
5.1 ÁREA DE ESTUDO	13
5.2 Descrição do modelo	17
5.3 Parametrizações Físicas	20
5.3.1 Microfísica	20
5.3.2 Parametrização Cumulus	21
5.3.3 Camada Limite Superficial	21
5.3.4 Camada Limite Planetária	22
5.3.5 Radiação Atmosférica	22
5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	22
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
6.1 Média dos fluxos de calor latente e calor sensível observados em Caatinga preservada	24
6.2 Média dos fluxos de calor latente e calor sensível observados em Caatinga degradada	27
6.3 Fluxos de calor latente e sensível observados versus simulados em Caatinga preservada para o domínio d01 (15 Km)	29
6.4 Fluxos de calor latente e sensível observados versus simulados em Caatinga preservada para o domínio d02 (5Km)	35
6.5 Fluxos de calor latente e sensível observados versus simulados em Caatinga preservada para o domínio d03 (1 Km)	40
6.6 Fluxos observados versus simulados em Caatinga degradada para o domínio d01 (15 Km)	46

6.7 Fluxos observados versus simulados em Caatinga degradada para o domínio d02 (5 Km)	50
6.8 Fluxos observados versus simulados em Caatinga degradada para o domínio d03 (1 Km)	57
7. RESULTADOS ESTATÍSTICOS.....	62
8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	67
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
10. ANEXOS.....	75

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga é uma das florestas secas de maior biodiversidade do mundo (Holzman, 2008; Dombroski et al., 2011). Ocorre apenas no Brasil e é ecossistema característico do Semiárido Brasileiro, ocupando uma área superior a 800.000 km², o que equivale a aproximadamente 10% do território brasileiro. Abrange praticamente toda a área dos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte, o sudeste do Piauí, a maior parte dos estados da Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e do interior da Bahia, além de uma porção do extremo norte de Minas Gerais, no Vale do Jequitinhonha (Leal et al., 2005; 2010; Bakke et al., 2010).

Os processos de trocas de energia, vapor de água e dióxido de carbono (CO₂) entre a superfície da Terra e a atmosfera são os fatores que afetam diretamente a temperatura do ar próximo a superfície, a concentração de CO₂ da camada limite planetária (CLP), o desenvolvimento e a estrutura da CLP, além do desenvolvimento das nuvens e da precipitação (Fischer et al., 2007).

A preocupação com o aquecimento global devido à ações antrópicas nos ecossistemas naturais por meio de desmatamentos, queimadas, aumento do uso de combustíveis fósseis, mudança no uso da terra, preparo intensivo do solo e etc., proporcionam um aumento da concentração de gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e clorofluorcarbonos (CFC's) na atmosfera o que tem preocupado a comunidade científica.

Esses gases de efeito estufa na atmosfera existem naturalmente, contudo, este aumento de concentração causa um forçante radioativo positivo que tende a aquecer a baixa atmosfera e a superfície terrestre. Do ponto de vista científico e global, mudanças climáticas são causadas por forças naturais e antropogênicas (IPCC, 2007).

De todos os processos ecológicos relacionados ao sequestro de CO₂ pelos ecossistemas terrestres, o balanço de energia (BE) e o fluxo de vapor de água são os mais importantes e relevantes, uma vez que os mesmos são característicos de cada ecossistema, visto que são influenciados pelo tipo de plantas que compõem o ecossistema, clima e as propriedades físicas do solo (Baldocchiet al., 1997; 2004; Hao et al., 2007). A dinâmica do ciclo do CO₂ e o BE também têm sido estudados em alguns ecossistemas brasileiros, a exemplo do cerrado (Colleta et al., 2009), cerrado (Vourlitis et al., 2001) e áreas de cultivos agrícolas (Cabral et al., 2011). No entanto, os referidos estudos têm se concentrado preferencialmente na floresta amazônica (Sotta et al, 2007; Meir et al., 2008;

Malhi et al., 2009; Metcalfe et al., 2010 e Araújo et al., 2010), dada a sua importância para o clima em escala global. No ecossistema caatinga, típica do semiárido brasileiro, um estudo foi iniciado na região de Petrolina-PE e alguns resultados foram obtidos (Oliveira et al., 2006); porém, o mesmo se estendeu por um curto período de tempo devido a problemas de ordens operacionais.

A Caatinga é uma das dez SDTF (*Seasonally Dry Tropical Forest*) da América Latina, detalhadamente descritas em Pennington et al. (2000) e são considerados os mais ameaçados de todos os principais tipos de florestas tropicais (Vargas et al., 2008). Apesar de sua fragilidade é, proporcionalmente, o ecossistema brasileiro menos estudado e protegido Leal et al. (2005). A vegetação predominante é composta de árvores e arbustos xerófilos de clima tropical. Sua fisionomia está diretamente relacionada às condições climáticas e pedológicas regionais, e apresenta estratos herbáceos que se desenvolvem durante os cinco ou seis meses em que ocorre precipitação pluviométrica, predominantemente na faixa de 300 a 800 mm anuais (Bakke et al., 2010).

O aumento das pesquisas sobre o problema das alterações climáticas nas últimas décadas tem aumentado a demanda por medições confiáveis, de absorção e emissão de dióxido de carbono por florestas e culturas agrícolas, de evaporação e os fluxos dos gases de efeito estufa. As medições dessas quantidades são muito complexas e necessitam de conhecimentos micrometeorológicos abrangentes. A maioria dos métodos de medições é baseada em simplificações e condições especiais, e, portanto, sua implementação não é trivial.

Através da descrição da evolução temporal e espacial das componentes do balanço de energia e radiação na superfície, do transporte turbulento de momento, da distribuição espacial e temporal da energia cinética turbulenta e das propriedades dinâmicas e termodinâmicas da camada limite planetária (CLP), pode-se determinar a interação entre a superfície e a atmosfera.

O método micrometeorológico das correlações dos vórtices turbulentos tem sido amplamente aplicado na quantização dos fluxos de calor e massa entre a biosfera e atmosfera nos mais variados ecossistemas naturais e agrícolas do planeta (Barr et al., 2006; Mildenberg et al., 2009; Sánchez et al., 2010; Cabral et al., 2011; Silva et al., 2011). Durante a última década, essa técnica se firmou como o método padrão na estimativa das trocas líquidas de CO₂ entre os ecossistemas e a atmosfera por longos períodos (Hiller et al., 2008). Antes, as medidas eram geralmente restritas a campanhas de curto prazo,

devido à falta de instrumentação adequada e recursos de registro e armazenamento dos dados. Para avaliar as trocas líquidas de CO₂, o método das correlações turbulentas tem a vantagem de operar em escala adequada que permite um levantamento de todo o ecossistema, o que não era possível com os sistemas que o antecederam (Baldocchi, 2003).

Vale salientar, porém, que instrumentos para todas essas medições tem um custo financeiro altíssimo. Diante do exposto, simular o comportamento espacial e temporal dessas variáveis através de modelos meteorológicos e obter resultados satisfatórios é de grande importância tendo em vista que depois de validados não necessitam de manutenção nem que alguém tenha que ir periodicamente coletar os dados.

Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs) têm sido ferramentas primárias utilizadas para descrever o comportamento da evolução atmosférica, associados a um grande número de processos que ocorrem em diferentes escalas espaço-temporais. Embora o desempenho destes MCGAs seja reduzido na representação de alguns processos dependentes das interações entre a atmosfera e as características da superfície (topografia, vento à superfície, microfísica de nuvens, etc.), eles representam bem os padrões de grande escala da circulação atmosférica global (Giorgi, 1990; Cavalcanti et al., 2002; Mass et al., 2002; Kinter III et al., 2009). Nas últimas décadas, os mesmos têm tido significativos avanços em termos da representação dos processos e fenômenos essenciais para o estudo das mudanças climáticas globais (Souza e Silva, 2003; Silva et al., 2009; Leivas et al., 2011; Silveira et al., 2013) e, dentre os diversos avanços científicos está a habilidade em simular complexos sistemas físicos, constituindo uma representação matemática aproximada da realidade (Sampaio e Dias, 2014).

Os Modelos Climáticos Regionais (MCRs), também, evoluíram muito nos últimos anos e, atualmente, estão com resolução horizontal da ordem de centenas de quilômetros a metros, o que permite a representação de fenômenos de mesoescala e suas interações com a escala local em uma dada região do planeta. Estes modelos incorporam características regionais como a topografia, vegetação, solo, diferenças entre continentes e oceanos, etc., com um nível de detalhamento não usado nos MCGAs (Snyder e Sloan, 2005; Leung et al., 2006; Alves et al., 2008; Sales et al., 2015) e, por esses motivos, têm sido utilizados nos estudos das projeções climáticas regionalizadas.

A técnica que consiste em usar os resultados de MCGAs como condições de fronteira laterais nos modelos de área limitada, denominada de “downscaling” dinâmico, reúne as habilidades destes em representar a circulação de larga escala e dos MCRs em representar os processos físicos em escala mais refinada. A solução desses processos contribui, por exemplo, para reduzir a deficiência dos MCGAs em representar a precipitação. Dessa forma, tem-se mostrado que o uso da técnica de downscaling pode trazer melhorias na representação da precipitação em relação aos MCGAs (Liu et al., 1994; Misra et al., 2003; Pesquero et al., 2010; Laprise et al., 2012; Sales et al., 2015). Para esse estudo, será utilizado o modelo meteorológico de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting).

2. JUSTIFICATIVA

A Caatinga desempenha um papel importante na manutenção do processo macroecológico regional, bem como, indiretamente no suporte as regiões com maior diversidade e endemismo. As técnicas micrometeorológicas das correlações turbulentas têm sido amplamente aplicadas na quantização dos fluxos de calor e massa entre a superfície e a atmosfera nos mais variados ecossistemas naturais e agrícolas do planeta. O método das correlações turbulentas, em particular, durante a última década, se firmou como o método padrão na estimativa dos componentes do balanço de energia e das trocas líquidas de CO₂ por longos períodos. Antes, as medidas eram geralmente restritas a campanhas de curto prazo, devido à falta de instrumentação adequada e recursos de registro e armazenamento dos dados.

Diante desse contexto, a presente proposta tem por objetivo simular as variáveis do balanço de energia em áreas preservadas na vegetação Caatinga, utilizando o modelo meteorológico de mesoescala WRF e compará-las com as variáveis medidas nas torres micrometeorológicas instaladas no Semiárido brasileiro. Sendo assim, algumas questões podem ser levantadas:

- O modelo WRF (Weather Research and Forecasting) será capaz de simular com boa acurácia a variabilidade temporal e espacial das variáveis a serem comparadas com as medidas nas torres micrometeorológicas?

Diante do exposto, levantaram-se algumas hipóteses:

- Tanto o número de medições micrometeorológicas como os estudos com modelagem numérica para as variáveis em questão são poucos no Semiárido brasileiro (SAB) se comparado, por exemplo, com a região da Amazônia e com o próprio Cerrado;
- O modelo WRF tem sido utilizado para previsão de tempo e clima e qualidade do ar em diversas partes do mundo, entretanto, estudos com esse modelo sobre o comportamento de variáveis como fluxo de calor sensível e latente, saldo de radiação e etc., ainda são pouquíssimos no SAB.

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Considerando a importância da região em estudo, esse trabalho tem como principal objetivo a simulação numérica das componentes do balanço de energia durante o inverno e o verão em áreas de vegetação Caatinga em processo de recuperação no Semiárido brasileiro.

3.2 Específicos

Para os objetivos supracitados foram necessários para os experimentos:

- Instalação do modelo meteorológico não hidrostático Weather Research and Forecasting (WRF) para região de estudo.
- Avaliar o desempenho do modelo de mesoescala WRF no prognóstico de variáveis do balanço de energia;
- Identificar as incertezas nas simulações com o WRF a partir de dados observados nas torres micrometeorológicas no SAB;
- Estudar as variações espaciais e temporais das variáveis do balanço de energia em ambientes do ecossistema caatinga;
- Comparar os fluxos de calor latente e calor sensível simulados com o modelo WRF com os dados medidos nas torres micrometeorológicas;
- Validar as variáveis do balanço de energia simuladas pelo modelo WRF com observações realizadas em superfície, a partir de métodos estatísticos;

Em posse dessas informações, poderemos ter uma melhor compreensão sobre essas variáveis do balanço de energia em superfície na região de vegetação Caatinga.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A região em estudo

Aproximadamente 17% do planeta Terra são consideradas regiões semiáridas, que devido as alterações do ciclo hidrológico esse número poderá aumentar, Rotenberg et al., (2010). Estas regiões são caracterizadas por ter uma vegetação nativa típica e possuem irregularidades climáticas e grande variabilidade temporal e espacial de suas variáveis meteorológicas. Aliado a esta variabilidade, a substituição da vegetação nativa por pastagens afeta os fluxos de energia, água e CO₂, promovendo enormes desafios atuais, como por exemplo, a mudança do uso da terra pode afetar tais fluxos e ainda, a dinâmica da vegetação e da biodiversidade, uma vez que esses processos ainda não são completamente conhecidos (HEUBES et al.,2013).

No Brasil, a região semiárida ocupa cerca de 15% de sua área total, abrangendo os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Bahia, além de alguns municípios do norte do estado de Minas Gerais. Mais parece um mosaico formado por centenas de sítios ecológicos que demandam recomendações de manejo diferenciadas. Os fatores mais marcantes destes menores ecossistemas funcionais são o clima, o solo, a vegetação, a fisiografia e o homem (ARAÚJO FILHO et al., 1995).

Em relação ao clima, o semiárido brasileiro caracteriza-se por clima quente e seco, com duas estações, a seca e a úmida, com precipitações médias entre 300 e 800mm. A maior parte das chuvas se concentra em três a quatro meses, acarretando um balanço hídrico negativo na maioria dos meses do ano e elevado índice de aridez. Observam-se ainda temperaturas médias em torno de 28°C, sem significativas variações estacionais (ARAÚJO FILHO et al., 1995).

A Figura 1 ilustra as localizações das duas torres micrometeorológicas, uma em local com vegetação de Caatinga preservada instalada as dependências do Estação Experimental do Instituto Nacional do Semiárido, e a outra instalada na sede do Instituto Nacional do Semiárido em vegetação de Caatinga degradada.

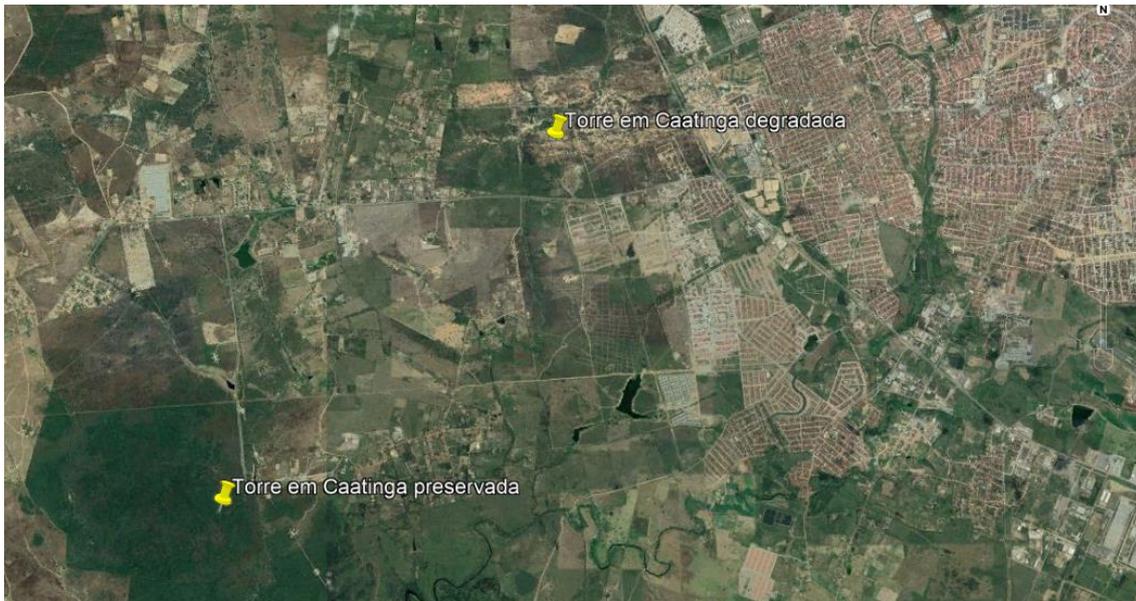


Figura 1 - Imagem do Google Earth com as localizações das Torres Micrometeorológicas de Campina Grande-PB em Caatinga preservada e degradada.

4.2 O balanço de energia

De acordo com a lei da conservação de energia, as perdas e ganhos de energia numa superfície estão em equilíbrio. Em termos simples, o balanço de energia é a diferença entre a energia recebida por uma superfície e a energia por ela armazenada e a perda, (Stull, 1998). A quantidade de energia disponível na superfície pode ser calculada pelas equações do balanço de radiação (Equação 1) e do balanço de energia (Equação 2):

$$R_n = (R_s - R_r) + (L_{\downarrow} - L_{\uparrow}) \quad (1)$$

onde R_n é o saldo de radiação, R_s é a radiação de onda curta incidente, R_r é a radiação de onda curta refletida, L_{\downarrow} é a radiação de onda longa recebida pelo sol e L_{\uparrow} é a radiação de onda longa emitida pela superfície para o espaço, em $W.m^{-2}$.

Fluxos turbulentos de calor sensível e calor latente são importantes e eficientes em trocas de energia entre a superfície e a camada limite planetária. A principal fonte de energia para esses fluxos turbulentos é a radiação de onda curta proveniente do Sol. Através desta troca eficiente de calor e umidade, a turbulência na camada limite planetária modera o microclima perto da superfície, tornando-a habitável. (Arya, 2001).

$$R_n = H + LE + G \quad (2)$$

em que H representa o fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$), LE é o fluxo de calor latente de evaporação ($W.m^{-2}$) e G é o fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$).

Os valores de H, LE e G são, em geral, positivos (consumidores de energia) durante o período diurno. Em situações especiais, como campos irrigados, H e/ou G assumem valores negativos (fontes de energia), enquanto LE, devido ao resfriamento evaporativo da superfície, pode exceder o saldo de radiação à superfície, Kjaersgaard et al. (2007). Para os autores, as magnitudes das componentes do balanço de energia dependem de muitos fatores tais como tipo de superfície e suas características (umidade do solo, textura, vegetação e etc), localização geográfica, estação do ano, hora do dia e clima. Em superfícies vegetadas, a evapotranspiração, modulada pelo fluxo de calor latente, é normalmente o processo que mais demanda energia. Em alguns casos consome 100% de R_n . Durante a noite, os termos do balanço de energia são usualmente negativos (fontes de energia). As magnitudes dos fluxos de calor latente e sensível são muito menores no período noturno, enquanto os valores de G não diferem muito entre o dia e a noite, apesar de haver uma inversão na direção do fluxo.

4.3 Os fluxos atmosféricos

O fluxo de uma propriedade em uma determinada direção é definido como a sua quantidade por unidade de tempo que passa através de uma unidade de área normal à direção. O método de covariância de vórtices turbulentos (MCVT), é uma técnica micrometeorológica eficaz para monitorar das trocas gasosas e de escalares entre a biosfera e a atmosfera, (MONCRIEFF et al., 1997). Assim, o MCVT (EC – Eddy Covariance – sigla em inglês) é o método mais utilizado para estimar as trocas turbulentas na CLP.

Xinmei & Lyons (1995) criaram um modelo de camada limite solo-cobertura modificado para simular fluxos de calor na superfície em uma base diária. Desenvolvido pelo Oregon State University o modelo foi modificado para simular os componentes do balanço de energia à superfície e comparado com dados observados em solos descobertos de Agassiz, Canadá, e observações tomadas sobre vegetação esparsa e densa como parte do experimento HAPEX-MOBILHY (*Hydrological Atmospheric Pilot Experiment-Modélisation da Bilan Hydrique*). No modelo original em solo descoberto, o fluxo de calor do solo é subestimado, enquanto que no modificado a previsão foi de resultados mais realísticos quando comparado aos observados.

Veenendaal et al. (2004) estudaram a variação sazonal em dióxido de carbono, vapor de

água e fluxos de energia em uma savana semi-árida na África do Sul usando a técnica de covariância turbulenta. As medidas apresentadas cobriam um período de 19 meses do final da estação chuvosa em março de 1999 ao final da estação seca em setembro de 2000. Durante a estação úmida, fluxos de calor sensível e latente mostraram uma dependência linear com a radiação solar incidente, com uma razão de Bowen tipicamente abaixo da unidade. Embora a razão de Bowen seja tipicamente cerca de 1 na baixa radiação solar incidente (150 W/m^2) durante a estação seca, ela aumentou dramaticamente com a radiação solar incidente, tipicamente sendo tão alta quanto 4 ou 5 ao redor do meio dia solar. Assim, sob essas condições de água limitada, quase toda energia disponível era dissipada como calor sensível, em oposição ao calor latente.

Melo (2003), utilizou índice de área foliar e a fração de cobertura vegetada foram estimados a partir de dados quinzenais do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), obtido de imagens de satélite do AVHRR/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmosphere Administration*), reduzidos para pontos de grade $5,5 \times 5,5 \text{ km}^2$, para avaliar a influência da cobertura vegetal na configuração dos parâmetros de superfície nos meses de abril de 1983 e 1986 no Nordeste do Brasil com o modelo RAMS. Os parâmetros estimados foram introduzidos no modelo RAMS e simulações de cinco dias. Os dados estimados foram menores do que os tabelados no RAMS, observou-se assim, aumento do fluxo de calor sensível e diminuição do fluxo de calor latente. A atmosfera na camada limite turbulenta tornou-se mais quente e seca. A quantidade de radiação solar que chegou a superfície não foi afetada.

Paiva et al. (2005) analisaram os fluxos de calor latente e sensível utilizando dados observados em Caatinga em processo de recuperação no município de Petrolina-PE para um período de cinco dias do mês de julho de 2004. Para comparar com esses dados foram realizadas simulações com o modelo regional BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*) para dois domínios de 50×50 pontos de grade com resoluções de 30 km e de 5 km em solo relativamente seco. Além disso, analisaram as mudanças ocorridas entre o ponto de observação e a área ao seu entorno. A utilização da umidade do solo de forma homogênea, devido ao desconhecimento de dados observacionais na região, foi a maior limitação nas simulações com o modelo. Mesmo com essa limitação, o modelo BRAMS simulou bem os fluxos observados, que foi semelhante tanto no comportamento quanto ao fato dos máximos estarem no mesmo horário, reproduziu relativamente bem os padrões referentes as condições fisiográficas da região.

Santos *et. al.* (2011) compararam os resultados das simulações entre os modelos WRF e BRAMS na estimativa dos fluxos de calor latente e sensível, sobre o Nordeste do Brasil (NEB) onde verificaram que o modelo WRF apresentou resultados mais precisos porque tem uma maior resolução espacial, como também um conjunto de parametrizações mais detalhadas que o BRAMS.

Lara-Fanego *et. al.* (2012) através da simulação da previsão da irradiância solar, avaliaram o desempenho do modelo WRF no sul da Espanha, onde encontraram erros de viés médio (BEM) da irradiação solar direta de 2% em condições de céu claro e 18% para condições de céu nublado, já para a irradiação solar horizontal o BEM variou entre 10% e 100% para condições de céu claro e céu nublado, respectivamente, concluído assim, que a capacidade do modelo é limitada para com relação as simulações em condições de céu claro.

4.4 Modelagem numérica

Nos últimos anos os modelos climáticos globais vêm recebendo relevantes melhorias, e com o auxílio de supercomputadores, conseguem realizar melhores simulações com maiores resoluções. Esses modelos são bons o suficiente para reproduzir os aspectos climáticos em larga escala, porém ainda não conseguem representar detalhes regionais, como circulações locais e a influência da topografia no clima local.

Essas características regionais são capturadas com o uso de modelos de mesoescala, utilizando-se da técnica de “*downscaling*”, em que informações são passadas em cascata, de escalas maiores para escalas menores. O *downscaling* é baseado no fato que climas regionais são condicionados, mas não completamente determinados, por eventos de larga escala (Bromwich *et al.* 2005).

4.4.1 Modelos Meteorológicos de Mesoescala

Diversos modelos meteorológicos que resolvem escalas diferentes no tempo e no espaço estão disponíveis. Os modelos de larga escala ou escala sinótica (GFS, Eta) (WEDAM *et al.*, 2009; JONES *et al.*, 2007) e os de mesoescalas (WRF, MM5, RAMS, NAM, BRAMS entre outros).

Um dos modelos mais citados na literatura científica para estudos de mesoescala meteorológica é o MM5 (GRELL *et al.* 1994), principalmente quando ligados à qualidade do

ar (ZHAO *et al.*, 2009). O sistema MM5 é um modelo de simulação numérica desenvolvido no final da década de 70 pela *Penn State University* (PSU) em conjunto com o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Encontra-se na 5ª geração e possui como principais características a capacidade de múltiplos aninhamentos de grade, dinâmica não hidrostática e assimilação de dados em quatro dimensões além de várias parametrizações físicas e portabilidade em diversas plataformas computacionais incluindo o sistema LINUX.

Apesar do código do MM5 não ter sofrido atualizações desde 2005, este modelo ainda é utilizado em simulações apresentadas na literatura (ZHAO *et al.*, 2009; CHENG *et al.* 2008). Atualmente, entre os modelos de mesoescala mais utilizados em pesquisas está o WRF, que vem sendo desenvolvido ano a ano com novas parametrizações e corresponde ao estado da arte de modelos meteorológicos de mesoescala para simulações climáticas, previsões numéricas do tempo e em monitoramento da qualidade do ar.

Vale salientar, porém, que apesar destes modelos incluírem representações detalhadas dos processos físicos que acontecem na atmosfera, eles ainda não conseguem representar com precisão alguns fenômenos atmosféricos; devido à alta complexidade dos processos que ocorrem na atmosfera e a falta de capacidade computacional para resolver todas as equações governantes destes processos. Desta forma, são necessárias parametrizações para incorporar alguns fenômenos como turbulência atmosférica, transferência de calor e massa próximos à superfície e perturbações causadas pelo relevo. O que resulta muitas vezes em desvios entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através da modelagem matemática (BORGE *et al.*, 2008; CHALLA *et al.*, 2009).

4.5 O modelo WRF

O modelo WRF, disponível gratuitamente no site <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/usrs>, é um sistema de modelagem numérica orientado tanto para previsão de tempo em mesoescala quanto para pesquisas de fenômenos atmosféricos de mesoescala e de microescala. O seu desenvolvimento surgiu da colaboração de diversas instituições: National Center for Atmospheric Research (NCAR), National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA), National Center for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL) e Air Force Weather Agency (AFWA). No Brasil existem trabalhos sendo desenvolvidos com o WRF por Instituições acadêmicas, entre elas o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e o Universidade de São Paulo (USP).

O modelo WRF é hábil tanto para situações idealizadas quanto para situações reais, em escalas horizontais que vão de alguns metros até milhares de quilômetros. A estrutura do

software (definida para o WRF) é composta por um sistema dinâmico, que contém o ARW (Advanced Research WRF) e o NMM (Modelo de mesoescala não-hidrostático). Este sistema está disponível gratuitamente para domínio público na internet no site <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/>. A formulação física do modelo WRF é baseada na conservação da massa e expressa às variações de energia, momentum e umidade do ar, ou seja, baseia-se nos processos termodinâmicos da atmosfera terrestre. O WRF foi desenvolvido para a pesquisa, previsão do tempo, modelagem da qualidade do ar, modelagens climáticas em escala regional, pesquisa de parametrizações, acoplamento com modelos de previsão oceânicas e de dispersão de poluentes, simulações idealizadas e extrapolação espacial e temporal dos dados. Quando se deseja analisar mais detalhadamente uma região de interesse que está inserida na grade original utilizada, é possível fazer aninhamento de grades. A vantagem em utilizar grades aninhadas é ter dados de uma área com uma alta resolução espacial, sem que toda a grade tenha que ser rodada.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 ÁREA DE ESTUDO

Dois pontos da região foram estudados, um em vegetação Caatinga preservada (7°16'47,61" S; 35°58'30,13" W; 489m) e outro em vegetação Caatinga degradada (7°14'59,61" S; 35°56'51,03" W; 498m) ambas nas imediações do Instituto Nacional do Semiárido (INSA).

As duas torres são idênticas e estão equipadas com sensores de saldo de radiação (Rn), cujos termos são medidos utilizando um saldo-radiômetro modelo CNR4 (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands) é obtido pela Equação 1.

As medições do fluxo de calor no solo (G) são realizadas através de fluxímetros HFP01SC-L Self-Calibrating Soil Heat Flux Plate (Hukseflux Thermal Sensors, Delft, The Netherlands) a 0,02 m de profundidade. As concentrações de CO₂ e vapor de água são medidas por um analisador de gás infravermelho modelo EC150 (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) acoplado a um anemômetro sônico tridimensional modelo CSAT-3A. (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA). A amostragem dos dados são realizadas a cada 10 Hz, ou seja, 10 dados por segundo, entretanto, os dados armazenados obedecem a uma média de 30 minutos. Esses dados utilizados são de duas

torres micrometeorológicas do projeto “Balanço de energia e Fluxo de CO₂ em Ambientes do Ecossistema Caatinga” do Instituto Nacional do Semiárido.

Com o objetivo de realizar uma comparação entre os fluxos observados a superfície com os dados simulados pelo modelo WRF, foram escolhidos períodos em que a vegetação estivesse úmida e outro período em que a vegetação estivesse seca. Os períodos escolhidos para essa pesquisa foram os meses de março, junho, setembro e dezembro de 2014. Vale salientar, porém, que em 2014 tivemos chuvas abaixo da média climatológica em Campina Grande, que é em torno de 780 mm anuais, Figura 2.

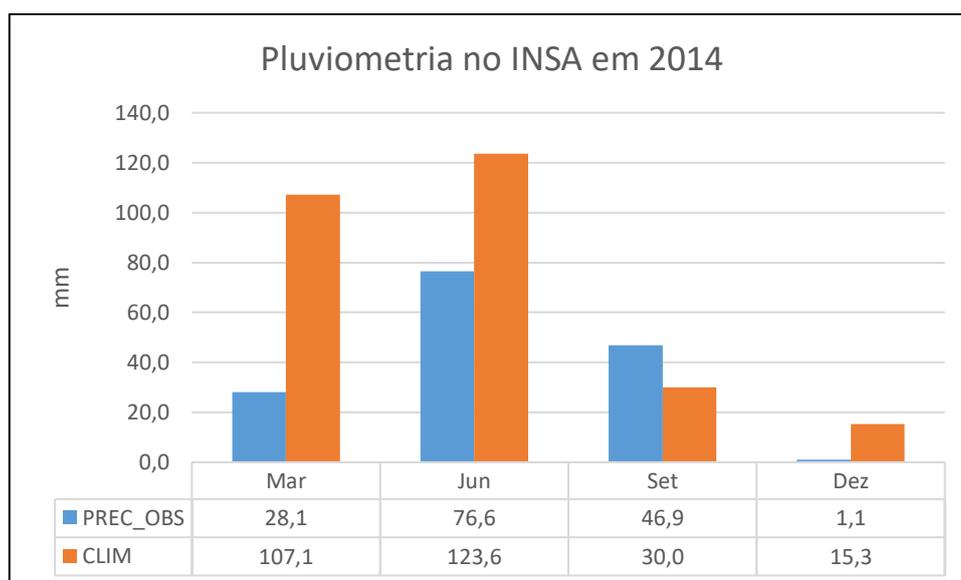


Figura 2 – Precipitação observada para os meses em estudo na Estação Experimental do INSA no ano de 2014 em Campina Grande-PB.

Input, inicialização e condições de contorno

Para o modelo WRF foi utilizado como condição inicial e de contorno os dados de reanálises do Era-Interim do modelo global do NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Os dados temporais estão disponíveis a cada 6 horas (00h, 06h, 12h e 18h) UTC e o espaçamento de grade é de 0,75° X 0,75°, e 38 níveis verticais isobáricos, além dos dados de superfície e de quatro camadas de dados de subsolo, onde estão disponíveis para download desde 1999 até dias atuais. Os dados de topografia, albedo, tipo de solo cobertura vegetal, etc, foram retirados da base de dados do NCAR.

O modelo foi configurado para dois domínios, onde se determinou para o domínio 1, a área que abrange toda a região Nordeste do Brasil (NEB) e grande parte do Oceano Atlântico, com uma resolução espacial de 15 km. Para o domínio 2, a área inclui grande parte do Semiárido nordestino e a leste o Oceano Atlântico que banha maior parte da costa do NEB, com resolução de 5 km. O domínio 3, com resolução de 1 Km, abrange todo o estado da Paraíba e ainda, ao Norte, parte do Rio Grande do Norte, ao Sul Parte do estado de Pernambuco e a oeste algumas áreas do estado do Ceará. Figura 3.

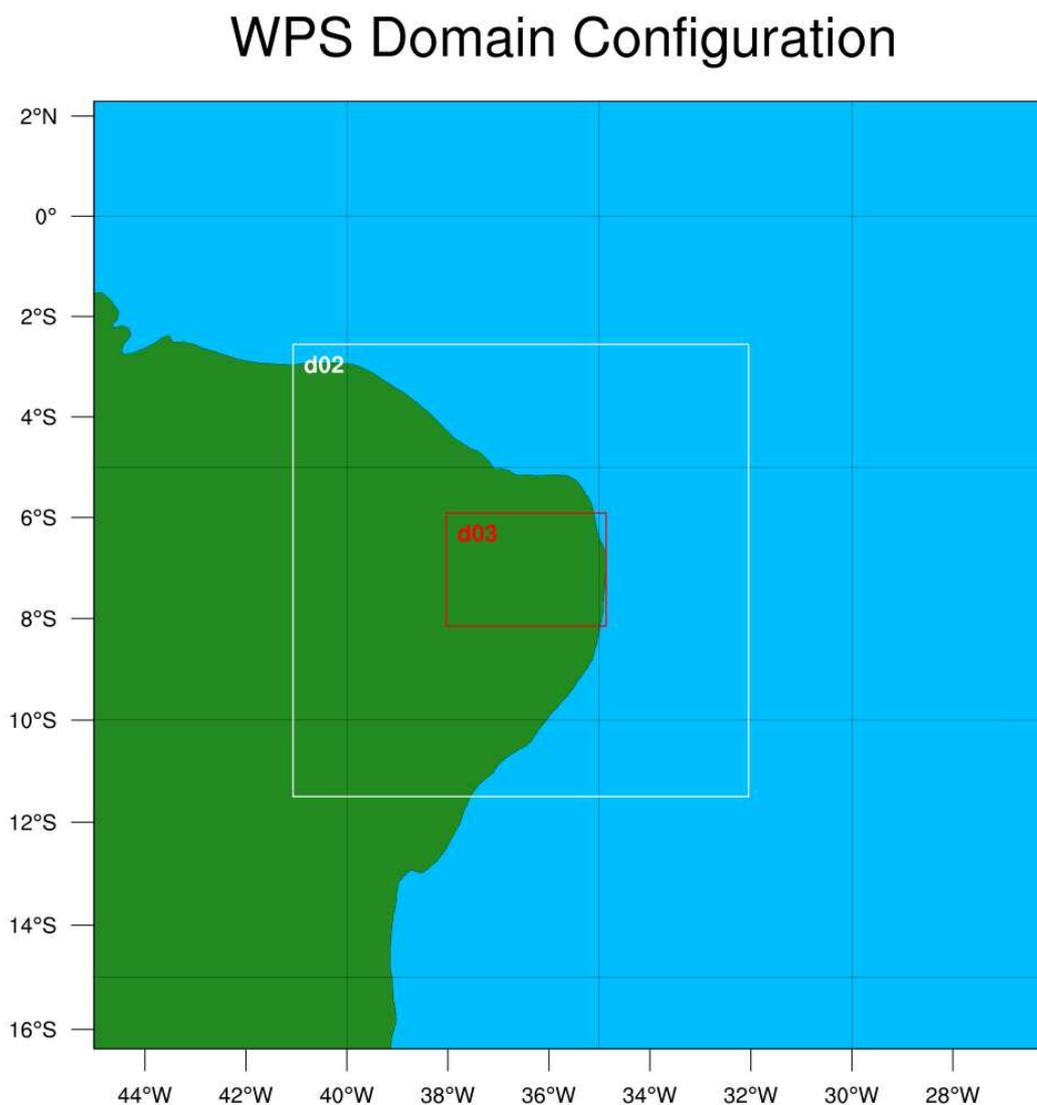


Figura 3 – Domínios do modelo WRF d01, d02 e d03 com resoluções espaciais de 15 Km, 5 Km e 1 Km, respectivamente.

Fonte: autor.

As Figuras 4, 5 e 6 mostram a topografia e os domínios de 15Km e 5 Km, respectivamente.

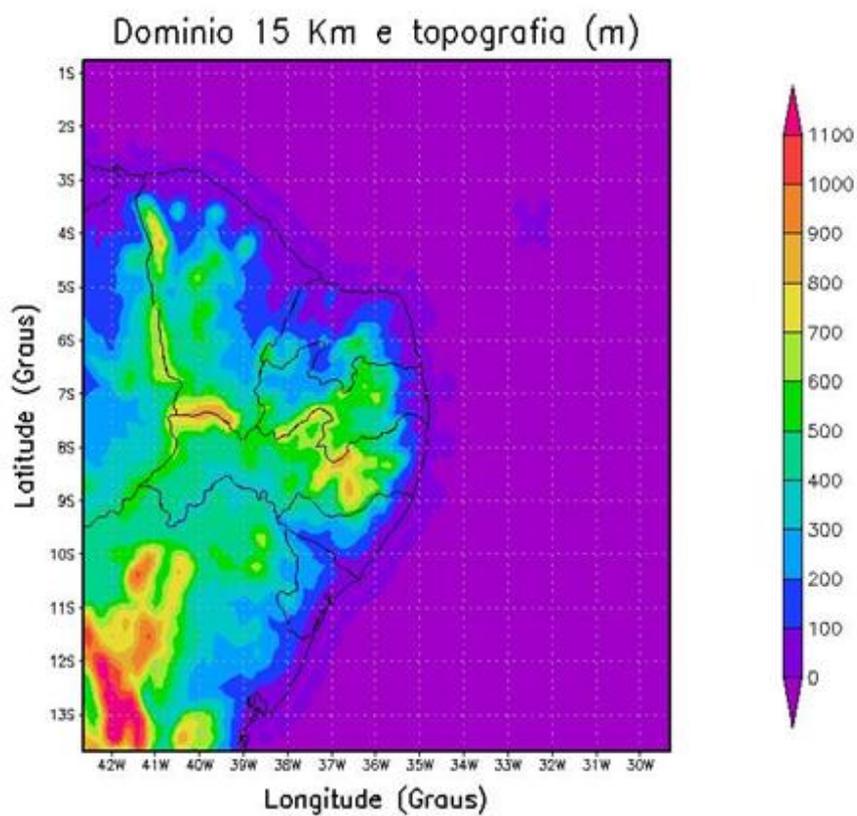


Figura 4 – Domínio da grade com resolução de 15 Km e topografia (m).

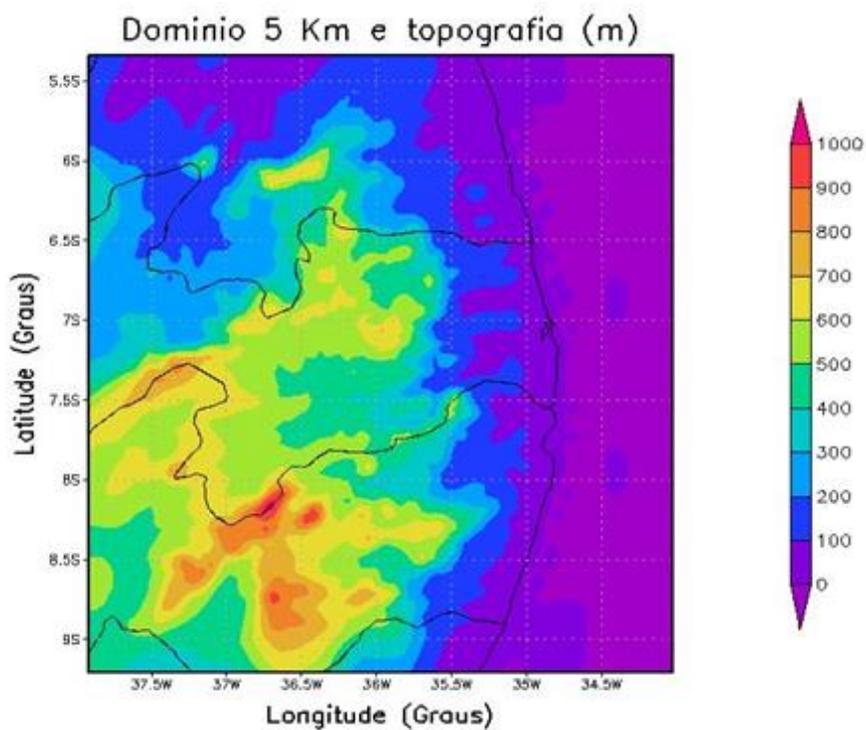


Figura 5 – Domínio da grade com resolução de 5 Km e topografia (m).

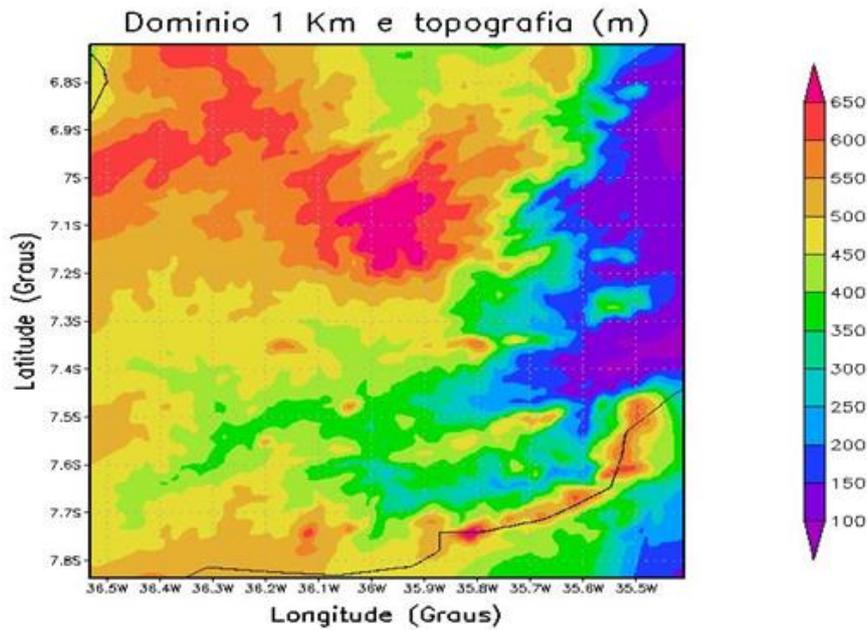


Figura 6 - Domínio da grade com resolução de 1 Km e topografia (m).

5.2 Descrição do modelo

Domínio e malha de simulação

O domínio é o espaço físico representado por uma malha tridimensional no espaço. No modelo WRF, cada nível vertical é definido por um valor discreto de coordenada sigma, Equação 5.1, definida com relação a componente hidrostática de pressão, proporcional a massa da coluna de ar que se estende desde o nível dado até a fronteira superior do modelo, dividida pela massa em toda coluna.

$$\sigma = \frac{p - p_{top}}{p_{sup} - p_{top}} \quad (3)$$

Próximo a superfícies, as coordenadas seguem o declive do terreno. O sistema de coordenadas verticais do WRF é denominado η , representado pela Figura 7, entretanto, não se utiliza como base o nível médio do mar. As variáveis calculadas não representam um valor sobre as superfícies verticais, mas a média para a parcela entre duas superfícies.

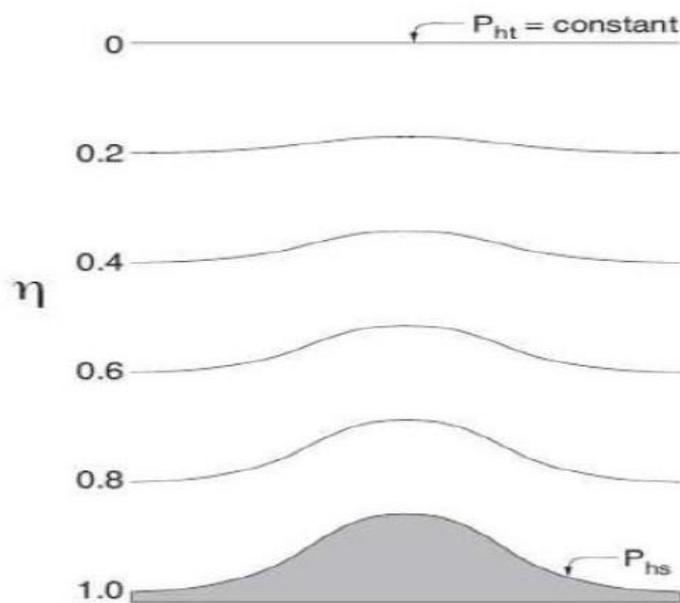


Figura 7 – Sistema de coordenadas verticais do modelo WRF.

Fonte: Adaptado de Skamarock *et al.* (2005).

Estrutura do modelo

Pré-processamento

WRF Preprocessing System (WPS), é um conjunto de subsistemas que preparam os dados de entrada para a simulação: geogrid (define o domínio do modelo e interpola os dados terrestres para as grades), ungrrib (extrai os campos meteorológicos do formato GRIB necessários para iniciar o modelo) e metgrid (interpola horizontalmente os campos meteorológicos extraídos pelo ungrrib para as grades do modelo definida pelo geogrid). O modelo precisa das áreas de fronteira lateral para representar as condições mais próximas da realidade da atmosfera. Tais condições são fornecidas por um modelo numérico em escala global que fornecem as previsões. Por sua vez, o modelo de mesoescala inicia-se onde o modelo global é incapaz de resolver as minúcias de uma área menor, de forma que o estado inicial do mesmo começa pela análise dos vértices da malha do modelo global. Os parâmetros estáticos, como as médias climatológicas, são atrelados no domínio horizontal no pré-processamento.

O estado inicial é obtido por interpolação espacial dos dados de análise do modelo global, onde é feita uma interpolação horizontal, em relação às variáveis meteorológicas (altura geopotencial, vento, temperatura, razão de mistura) em cada nível isobárico, e em relação às variáveis da superfície (pressão atmosférica, “skin temperature”) e dos níveis do

subsolo (temperatura e umidade). O Sistema de pré-processamento (WPS) é formado por um conjunto de três programas, cuja função é preparar a entrada para o programa real, ou seja, as simulações a partir de dados reais. Cada um dos programas realiza uma etapa onde são lidos os parâmetros de um arquivo comum (namelist), que tem registros separados para cada um dos programas. Além disso, há um namelist compartilhado, que define os parâmetros que são utilizados por mais de um programa WPS. O trabalho de interpolação vertical dos campos meteorológicos, para níveis WRF-ETA é realizado dentro do programa real. O primeiro dos três programas (geogrid.exe) é responsável por definir os domínios do modelo e interpolar estaticamente os dados geográficos para a grade do modelo. O segundo programa (ungrib.exe) descompacta os dados meteorológicos e cria pacotes intermediários. Finalmente, o terceiro programa (metgrid.exe) é responsável por interpolar os dados meteorológicos horizontalmente para o seu modelo de domínio. A saída deste programa é utilizada como entrada para o WRF.

Processamento (WRF)

O modelo WRF tem duas classes de simulações, de acordo com o tipo de dados gerados, se dados ideais ou dados reais. Os casos reais de dados requerem pré-processamento do pacote WPS, pois oferecem para cada campo atmosférico a estatística com fidelidade apropriada para a resolução da grade escolhida para o modelo. Neste trabalho foram feitas simulações com dados reais. O módulo WRF é composto por dois programas. O primeiro (real.exe) interpola verticalmente os dados sobre as coordenadas do modelo. Este programa processa todos os arquivos de dados gerados pelo metgrid em um único arquivo para cada domínio de grade. Por exemplo, se houver 3 grades, serão criados 3 arquivos de dados para a entrada do próximo programa do WRF. Este segundo programa (wrf.exe) faz a integração numérica propriamente dita, gerando a simulação do modelo.

Pós-processamento

Este módulo efetua interpolação vertical apropriada à grade do modelo, com a coordenada vertical sigma ao invés de pressão. O ARW é um programa Fortran que lê a entrada do arquivo WRF e gera arquivos de saída GrADS (Grid Analysis and Display System). O módulo ARW é formado, somente pelo programa ARWpost.exe.

5.3 Parametrizações Físicas

Nesta seção estão descritas algumas das parametrizações disponíveis para o WRF-ARW. Com enfoque será para as parametrizações utilizadas no presente estudo. A física deste modelo está dividida em 5 categorias distintas, (1) microfísica, (2) parametrização de nuvens, (3) parametrização da CLP, (4) modelos de ocupação do solo e (5) radiação. Estas opções de esquemas físicos foram sendo incorporados ao WRF com a intenção de produzir um único sistema de modelagem, assim, o maior problema enfrentado consiste em escolher um grupo de parametrizações que seja adequado às condições da região a ser estudada e também à capacidade computacional disponível.

Utilizando todas as combinações de parametrizações disponíveis no WRF, é possível encontrar, aproximadamente, pelo menos 300.000 de combinações. Também de acordo com CHALLA *et al.*, (2009), BORGE *et al.*, (2008) existem várias possibilidades de combinação entre estas parametrizações, porém nenhuma delas ainda consegue representar de forma exata os fenômenos atmosféricos. Neste estudo, o foco é a simulação e comparação dos resultados obtidos com algumas estações de observação micrometeorológicas, sendo assim, este estudo limita-se a utilizar as configurações padrão para as parametrizações físicas disponíveis para o WRF.

Uma descrição mais detalhada sobre cada um dos esquemas de parametrização estão descritos em (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf).

5.3.1 Microfísica

O esquema de microfísica utilizada neste estudo foi WRF Single-Moment (WSM) 3 Classes de gelo. O WSM 3 classes, é um esquema simples e eficiente para processos com presença gelo e neve, adequado para o tamanho de grade em mesoescala. Prediz 3 categorias de hidrometeoros: vapor d'água, chuva e pequenos cristais de gelo (Hong *et al.*, 2004).

5.3.2 Parametrização Cumulus

Nessa simulação foi utilizada a parametrização cumulus Kain-Fritsch (KF). O KF é uma parametrização de fluxo de massa baseada em Kain e Fritsch (1990) e Kain e Fritsch (1993). Utilizada o método da parcela Lagrangeano, incluindo dinâmica de momentum vertical, para verificar se há instabilidade. No caso de haver, verifica se esta instabilidade se tornará disponível para o crescimento de nuvem e determina suas propriedades convectivas. Em função disso, é conveniente separar o esquema KF em três partes: 1) a função gatilho, é acionado quando há fluxo de massa com CAPE (*Convective available potential energy*) positivo e movimento ascendente na LCL (*lifting condensation level*), 2) formulação do fluxo de massa, e 3) os pressupostos de fechamento (Kain, 2004).

5.3.3 Camada Limite Superficial

Teoria da Similaridade MM5 – Este esquema utiliza as funções de estabilidade de Paulson (1970), Dyer e Hicks (1970) e Webb (1970) para realizar uma análise dos coeficientes de troca de calor, mistura e momentum na superfície. A velocidade de fricção seguindo Beljaars (1994) é usada para aumentar os fluxos de calor e mistura na superfície. Não está inserida a parametrização de comprimento de rugosidade térmica. A relação de Charnock considera o comprimento de rugosidade para a velocidade de fricção sobre corpos d'água. Existem 4 regimes de estabilidades de acordo com Zhang e Anthes (1982). Este esquema de camada superficial deve ser configurado para rodar junto com esquemas de camada limite planetária de MRF ou YSU (Skamarock et al., 2005).

Teoria da Similaridade (ETA) – O esquema de camada superficial ETA (Janjic, 1996; 2002) é baseado na teoria da similaridade (Monin e Obukhov, 1954). O esquema inclui parametrizações de uma subcamada viscosa. Sobre superfície líquida, a subcamada viscosa é parametrizada explicitamente segundo Janjic (1994). Sobre o solo, os efeitos da subcamada viscosa são considerados através da altura de rugosidade para temperatura e umidade proposta por Zilitinkevich (1995). A correção de Beljaars (1994) é aplicada, afim de evitar singularidades no caso de uma camada superficial instável e ausência de velocidade do vento. Os fluxos de superfície são analisados por um método iterativo. Este esquema de camada superficial deve ser executado juntamente com o esquema de CLP MYJ (Skamarock et al., 2005).

5.3.4 Camada Limite Planetária

Yonsei University (YSU) Os esquemas de CLP YSU é uma evolução do *Medium Range Forecast Model* (Hong e Pan, 1996). Utilizam termos contragradientes para representar os fluxos devido aos gradientes não locais. Os termos contragradientes empregam os fluxos de calor e mistura para condições instáveis. O entranhamento é feito proporcionalmente ao fluxo de fluabilidade em linha com resultados provenientes de estudos com modelos de grandes turbilhões.

Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) – Esta parametrização de turbulência na CLP e na atmosfera livre (Janjic, 1990, 1996, 2002) representa uma implementação não singular do Modelo de fechamento de turbulência Mellor-Yamada Level 2.5 (Mellor and Yamada, 1982) através de uma série de regimes atmosféricos turbulentos.

5.3.5 Radiação Atmosférica

Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) – O RRTM usa a técnica de correlação k e aplica coeficientes de absorção derivados do LBLRTM (*Line-By-Line Radiative Transfer Model*) para produzir as distribuições k necessárias (Mlawer et al., 1997). As características relevantes incluem o uso dos maiores absorvedores e importantes espécies de gases traços e modelo contínuo de vapor d'água (Clough et al., 1989). Cada uma das 16 bandas espectrais é calculada para 16 subintervalos, dando um total de 256 operações de transferência radioativa para calcular o espectro de onda-longa total. A transferência radiativa em condição nublado é realizada combinando a profundidade óptica de nuvens e gases em cada camada de nuvem. É assumido sobreposição aleatória de nuvens (Iacono et al., 1998).

5.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados do modelo WRF foram comparados com os dados das torres micrometeorológicas instaladas nos municípios de Campina Grande-PB em ambientes de Caatinga preservada e degradada. As variáveis analisadas foram fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. As análises dos resultados simulados pelo modelo WRF foram realizadas através de análises objetivas utilizando três índices estatísticos: o coeficiente de correlação de Pearson (r); o Erro Sistemático (VIÉS); o Root Mean Squared Error

(RMSE) e o Absolute Mean Error (MAE). Detalhes de cada medida estatística são descritos a seguir:

- Coeficiente de correlação de Pearson (Corr):

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(\sum(y_i - \bar{y}))}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Em que, x_i são os valores dos dados previstos, \bar{x} os valores médios dos dados previstos, y_i , os dados observados e \bar{y} a média dos dados observados. Este coeficiente estima o grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas (variando entre -1 e 1, sendo desejado o valor próximo a 1).

- Erro Sistemático (VIÉS):

$$VIÉS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - O_i) \quad (4)$$

em que f é o resultado da simulação do modelo WRF; O é o dado observado nas torres micrometeorológicas e o i é o índice de tempo. O VIÉS indica a tendência geral dos erros dos dados previstos pelo modelo, em que, para valores positivos, diz-se que o modelo superestimou os dados observados e, caso o valor seja negativo, indica que o modelo subestimou os dados observados.

- Root Mean Squared Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - O_i)^2} \quad (5)$$

As variáveis são as mesmas definidas no VIÉS. O RMSE é usado como medida das diferenças entre os dados simulado e observados. É adequado para avaliar a precisão da previsão de campos meteorológicos.

- Absolute Mean Error (MAE): média absoluta entre os dados simulados e observados, dado por:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |f_i - O_i| \quad (6)$$

Sendo que $| |$ representa o valor absoluto e as variáveis são definidas como no VIÉS. Ambos os erros, sistemáticos e aleatórios, contribuem para o valor MAE. Tanto para RMSE como MAE, os valores próximos de 0 representam melhores resultados dos dados simulados.

Esses testes calculados separadamente, pode não ser um indicador do desempenho do modelo, pois é possível ter um valor alto do RMSE, e ao mesmo tempo, um valor baixo de MAE ou vice-versa (Targino et al., 2002)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão analisados e discutidos os parâmetros observados de fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente para oito dias dos meses de março, junho, setembro e dezembro de 2014. Em seguida, serão analisadas e discutidas, também, as simulações feitas com o modelo WRF comparando-as com os dados medidos.

6.1 Média dos fluxos de calor latente e calor sensível observados em Caatinga preservada

A Figura 8, representa a média dos fluxos de calor latente e calor sensível, obtidos a partir das observações de campo entre 23 e 31 de março de 2014. Observa-se um aumento do fluxo de calor latente desde o início da manhã até as proximidades das 15:00h, reduzindo-se a valores mínimos no final da tarde próximo das 19:00h. Analisando a média do fluxo de calor latente observa-se que a taxa máxima de evapotranspiração ao longo do dia se verifica entre as 12:00h e as 16:00h. O fluxo de calor sensível aumenta sua intensidade no início da manhã, atingindo um primeiro valor máximo às 14:00h, em seguida tem-se um declínio até atingir os valores mínimos no início da noite, após às 18:00h.

A média dos fluxos de calor latente e calor sensível observados entre 21 e 29 de junho de 2014 estão representados na Figura 9. Observa-se, porém, que os valores de fluxo de calor latente apresentam-se com valores superiores aos do mês de março, iniciando desde as 7:00h atingindo um valor máximo de $196,71 \text{ W.m}^{-2}$ às 10:00h, horário em que é observado a taxa máxima de evapotranspiração para esse período. O aumento do fluxo de calor sensível, que também se inicia após as 7:00h, atinge seu máximo as 13:00h com valor superior a 170 W.m^{-2} , decrescendo substancialmente até alcançar valores próximos de zero durante o período noturno.

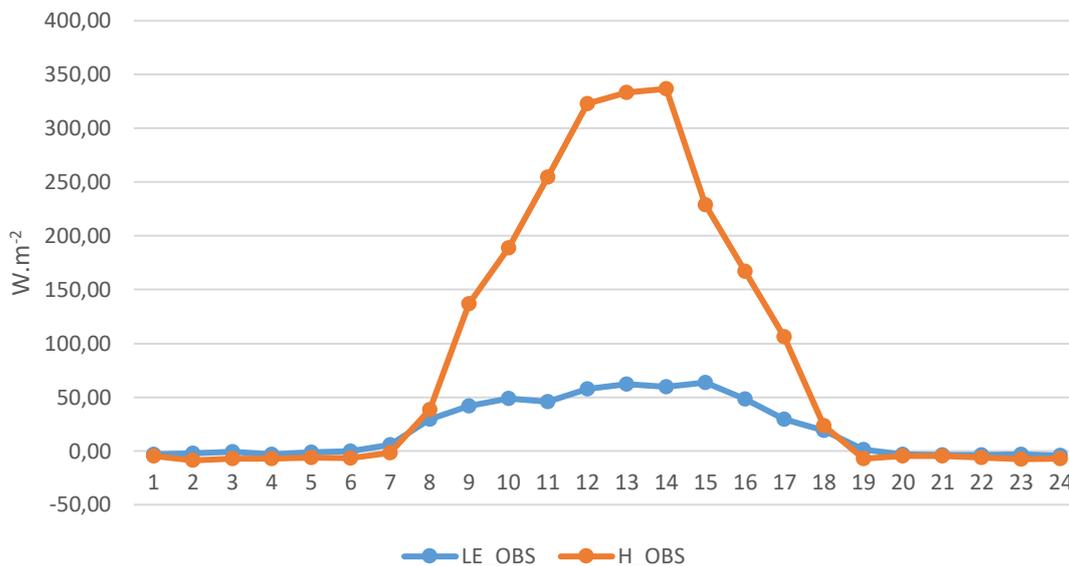


Figura 8 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 23 a 31 de março de 2014 em W.m-2.

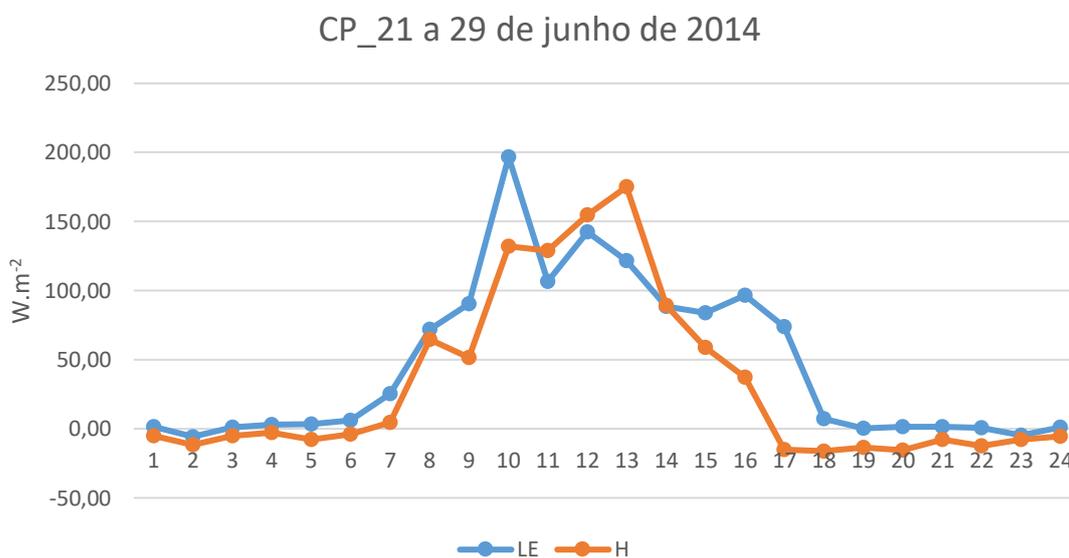


Figura 9 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 21 a 29 de junho de 2014 em W.m-2.

Na Figura 10 observa-se que o ciclo diário do fluxo de calor latente inicia-se as 6:00h com valor de 25,5 W.m⁻² atingindo seu pico máximo com valor de 57,2 W.m⁻² as 11:00h, reduzindo os valores levemente até que atinge seu mínimo com valores abaixo de zero a partir das 18:00h.

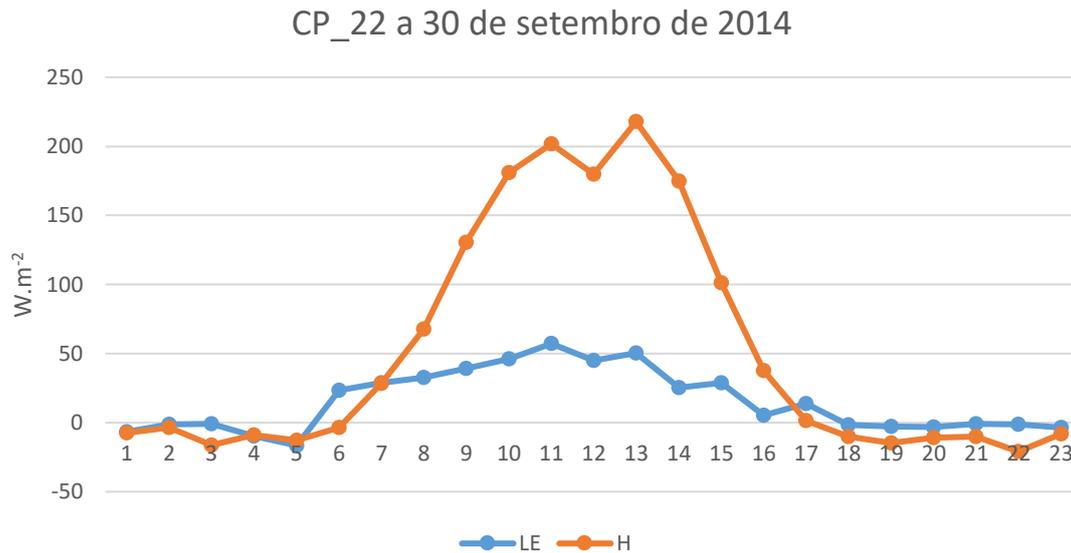


Figura 10 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 22 a 30 de setembro de 2014 em W.m-2.

Na Figura 11 está representada a média horária dos fluxos de calor sensível e latente em Caatinga preservada no período de 23 a 31 de dezembro de 2014. Para este mês, que é considerado um dos mais secos da região, observa-se valores bem abaixo de 50 W.m⁻². Nesse período a vegetação encontrava-se muito seca, então as vegetações típicas do Seminário perdem suas folhas e assim a taxa de evapotranspiração apresenta valores baixos se comparado aos valores de fluxo de calor sensível.

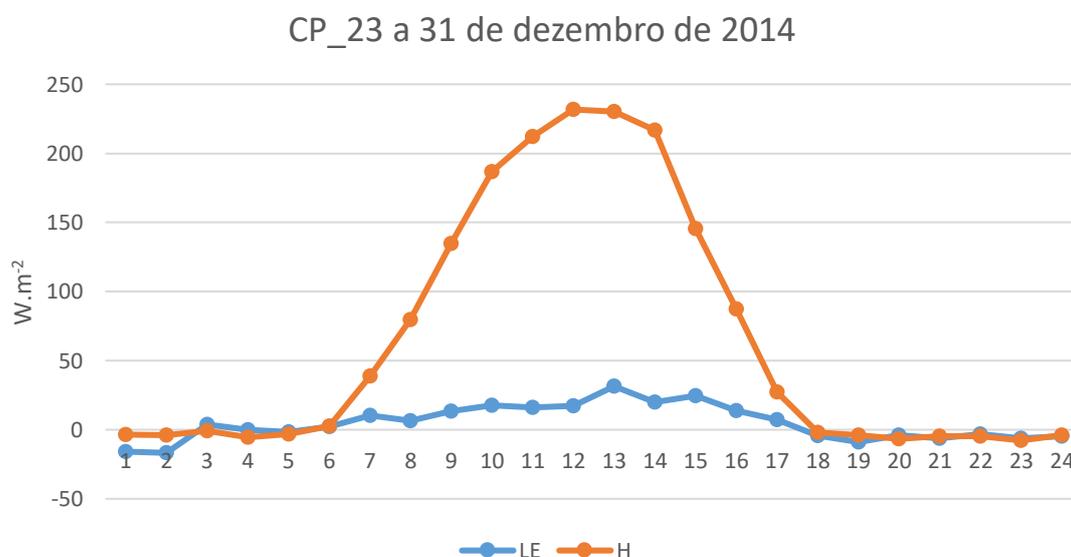


Figura 11 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga preservada no período de 23 a 31 de dezembro de 2014 em W.m-2.

6.2 Média dos fluxos de calor latente e calor sensível observados em Caatinga degradada

A média dos fluxos de calor latente e calor sensível observados entre 23 e 31 de março de 2014 em vegetação Caatinga degradada estão representados na Figura 12. Os valores médios observados de fluxo de calor sensível em vegetação de Caatinga degradada, no período de 23 a 31 de março tiveram valores menores com relação ao mesmo período em ambiente com Caatinga preservada que atingiram seu máximo em 336 W.m⁻² contra 297 W.m⁻². Quanto ao fluxo de calor latente, em média, foram observados valores maiores em Caatinga preservada, principalmente no período entre as 11:00h e as 16:00h

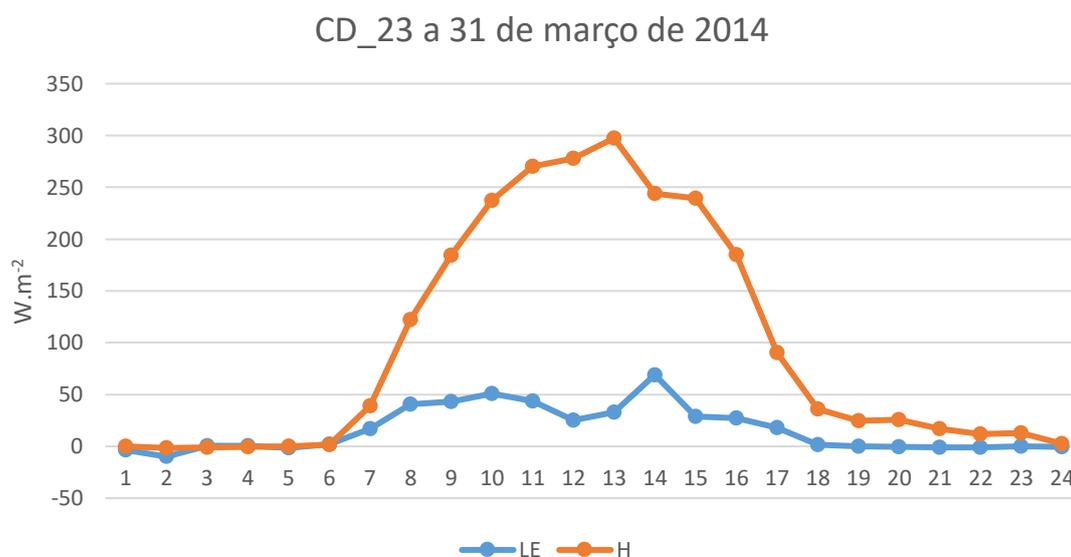


Figura 12 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 23 a 31 de março de 2014 em W.m⁻².

A Figura 13 mostra as médias dos fluxos de calor latente e calor sensível observados entre 21 e 29 de junho de 2014 em Caatinga degradada. Como observado no mês de junho em Caatinga preservada, em Caatinga degradada apresentaram valores de fluxos de calor latente e sensível bem próximos, destacando-se os horários de 9:00h e 10:00h onde os valores dos fluxos foram quase idênticos. Os horários com maior discrepância foram 11:00h, 13:00h e 18:00h com diferenças de 42 W.m⁻², 22 W.m⁻² e 66 W.m⁻². Durante todo o ciclo, os comportamentos entre os fluxos também foram idênticos.

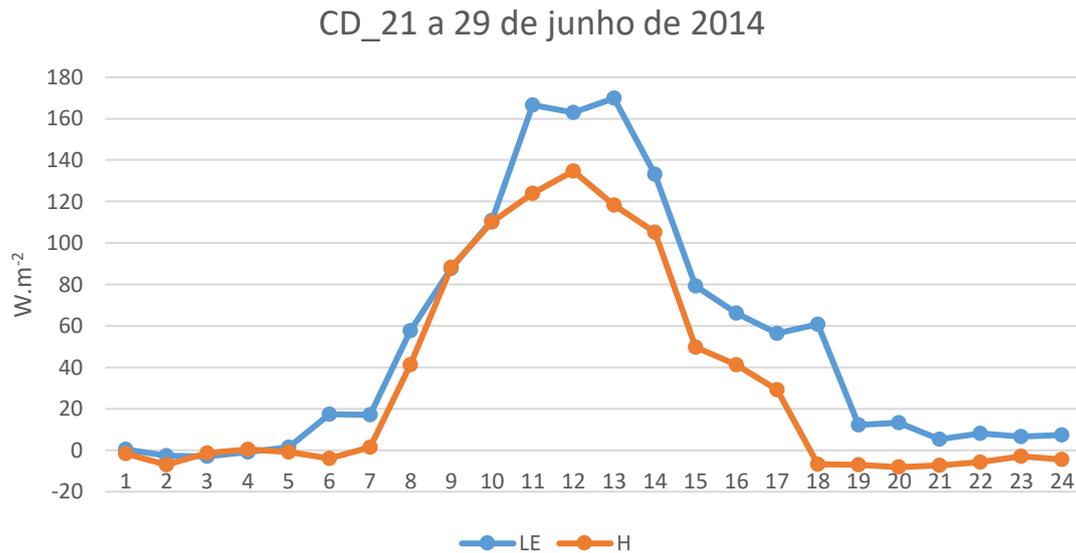


Figura 13 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 21 a 29 de junho de 2014 em W.m-2.

As Figuras 14 e 15 representam as médias horárias dos fluxos de calor latente e sensível observados em vegetação Caatinga degrada nos períodos de 22 a 30 de setembro de 2014 e 23 a 31 de dezembro de 2014, respectivamente. Em ambas, o fluxo de calor sensível atinge seu máximo as 13:00h com valores de aproximadamente 320 W.m⁻², enquanto o fluxo de calor latente atinge seu máximo as 10:00h (68 W.m⁻²) em setembro e em dezembro o máximo é observado foi observado as 08:00h com valor de 51 W.m⁻².

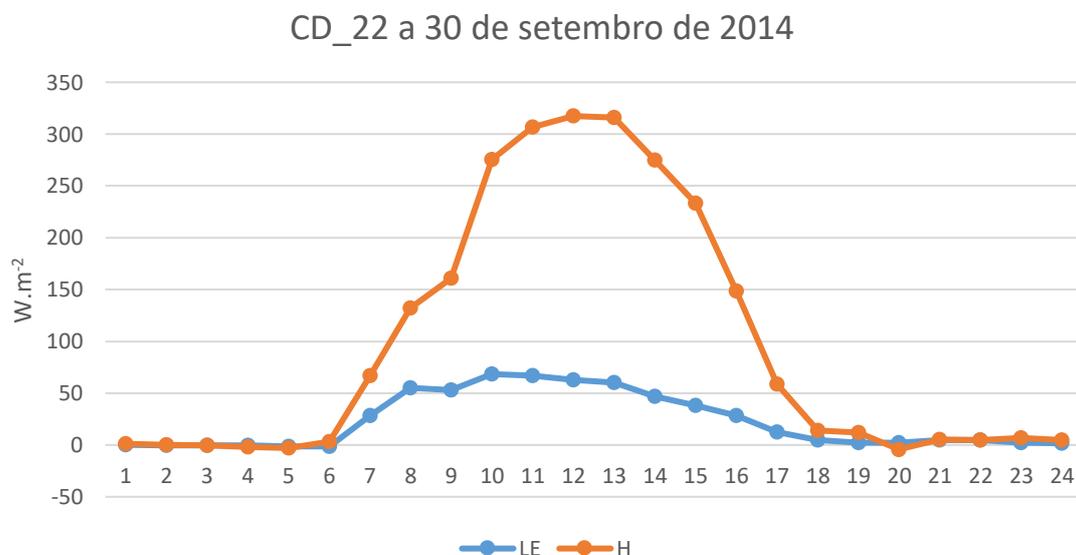


Figura 14 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 22 a 30 de setembro de 2014 em W.m-2.

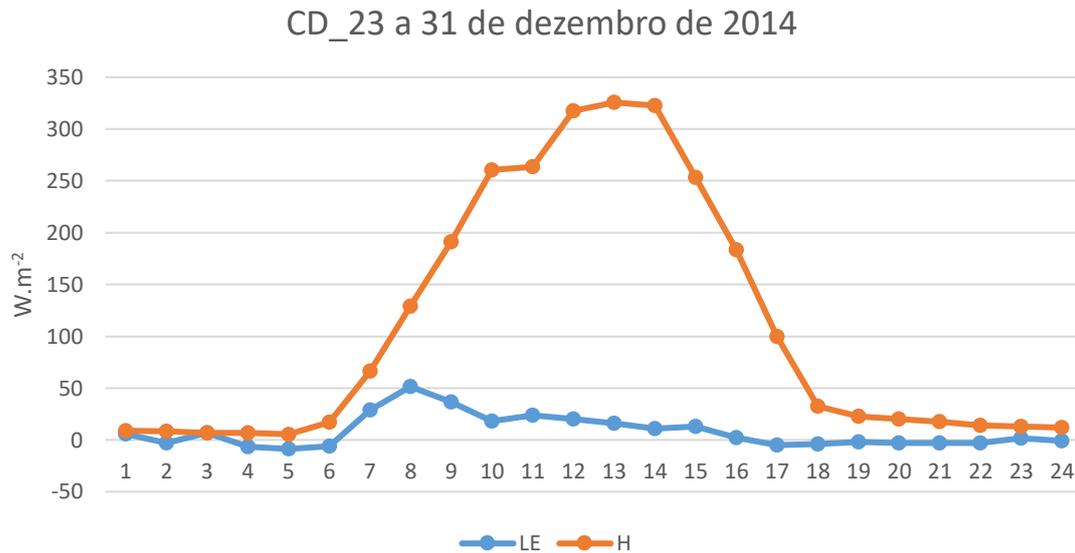


Figura 15 – Média horária dos Fluxos de Calor Latente (LE) e Calor Sensível (H) em Caatinga degradada no período de 23 a 31 de dezembro de 2014 em W.m-2.

6.3 Fluxos de calor latente e sensível observados versus simulados em Caatinga preservada para o domínio d01 (15 Km)

A Figura 16 representa o ciclo diário do fluxo de calor latente observado e simulado pelo modelo WRF, para o domínio de 15 Km, no período de 23 a 31 de março de 2014 em ambiente de Caatinga preservada. Observa-se, no entanto, que o modelo superestimou em todos os dias com diferença de até aproximadamente 170 W.m⁻² no dia 23, onde no dia 29 essa diferença reduziu para 75 W.m⁻² que foi o valor mais próximo do observado simulado pelo WRF no período.

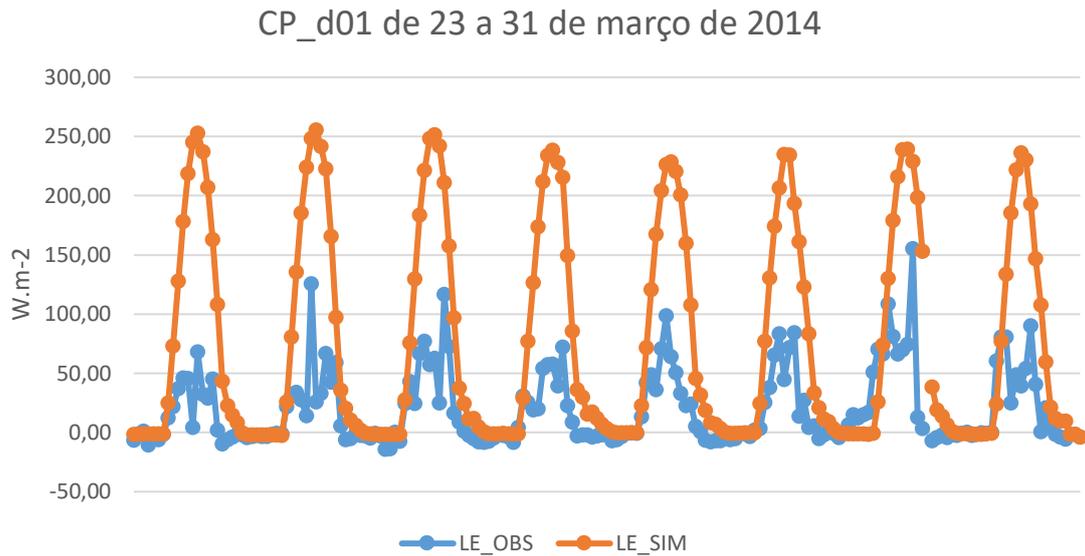


Figura 16 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

O ciclo diário do fluxo de calor sensível observado e simulado pelo modelo WRF no período de 23 a 31 de março de 2014 está representado na Figura 17. Verifica-se que, em praticamente todos os dias o modelo simulou bem os dados observados em Caatinga preservada com exceção dos dias 23 e 30 de março, no qual a diferença entre o valor observado e simulado foram 105 W.m^{-2} e 128 W.m^{-2} , respectivamente.

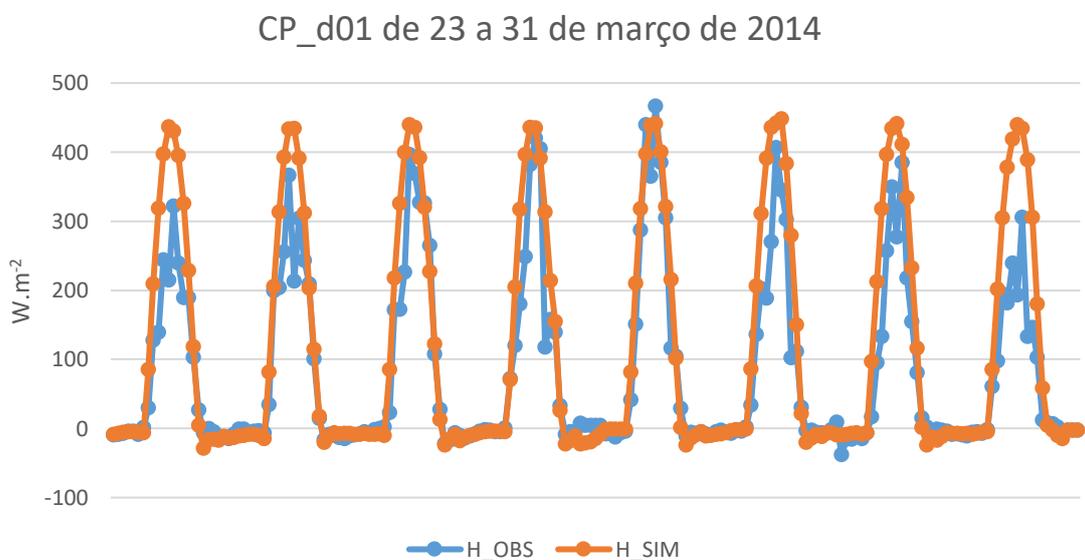


Figura 17 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

No período relacionado ao mês de junho de 2014 (21 a 29), verifica-se algumas falhas tanto nos dados observados como nos dados simulados. No entanto, observa-se que na maioria dos dias, o WRF simulou bem os dados observados durante o período diurno, com destaque para os dias 23, 25, 26, 27 e 28 de junho de 2014, em que os valores de pico observados foram muito próximos dos simulados, se comparados com os fluxos de calor latente dos outros meses, Figura 18.

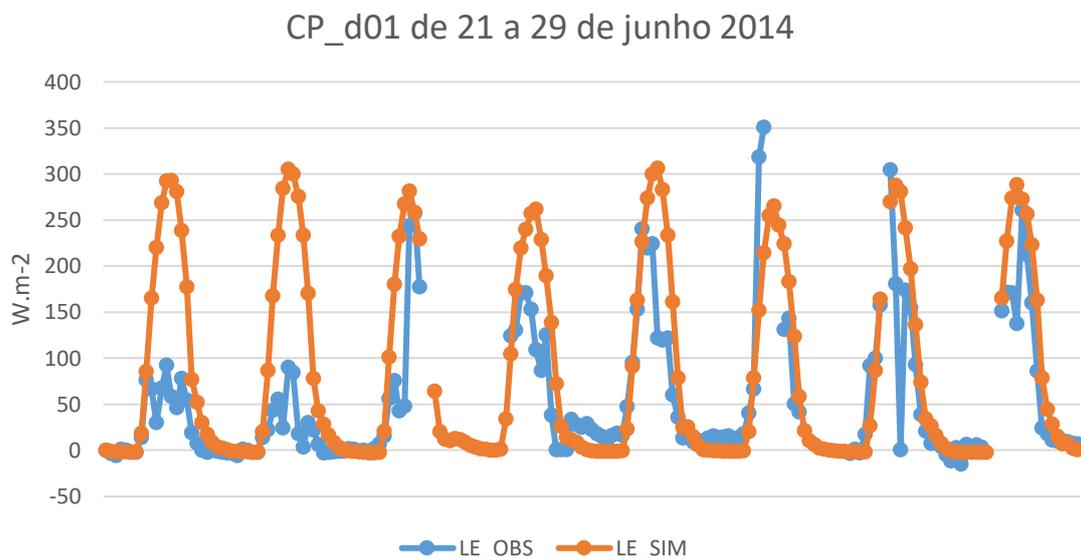


Figura 18 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) para o domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Na Figura 19 estão representados os fluxos de calor sensível simulados e observados para o período de 21 a 29 de junho de 2014. Verifica-se que nos dias 21 e 22 o modelo WRF subestimou os valores observados em 116 W.m^{-2} e 103 W.m^{-2} , respectivamente. Entre os dias 23 e 29 o modelo superestimou com valores que alcançaram até 194 W.m^{-2} no dia 28.

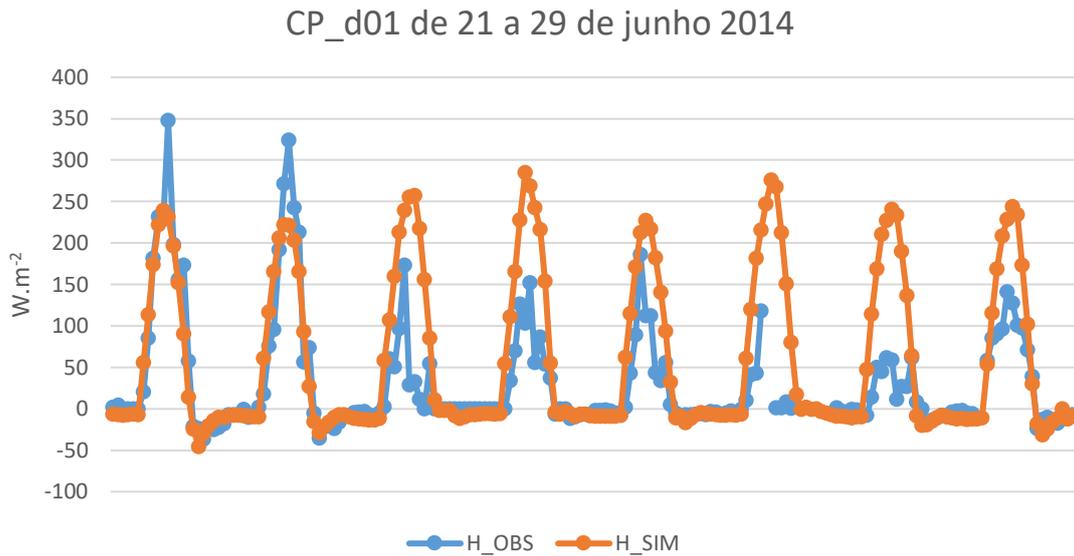


Figura 19 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Os valores de fluxo de calor latente observado e simulado entre os dias 22 e 30 de setembro de 2014, estão representados na Figura 20. Como ocorrido no mês de março, o modelo superestimou em todos os dias com diferenças bem significativas. Enquanto os dados observados quase não ultrapassaram os 100 W.m^{-2} , os dados simulados obtiveram valores superiores a 350 W.m^{-2} em todo o período.

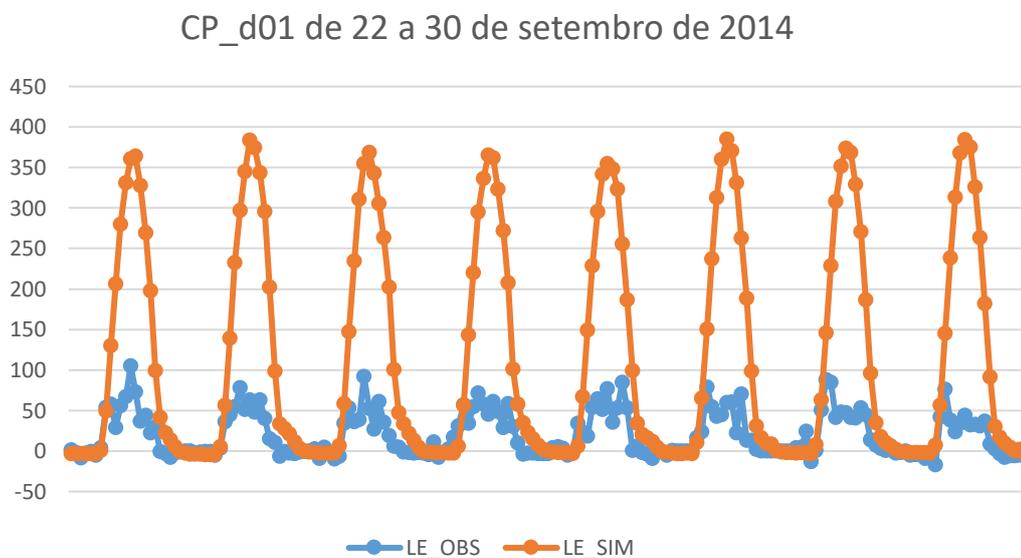


Figura 20 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

Com valores simulados bem próximo aos valores observados dos fluxos de calor sensível para o período de 22 a 30 de setembro em Caatinga preservada destaca-se com relação aos meses de março e junho discutidos anteriormente, Figura 21. Com exceção do 28 o modelo representou muito bem os valores observados em todo o ciclo, tanto diurno quanto noturno, em que o maior valor simulado foi de $309,1 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 26 de setembro.

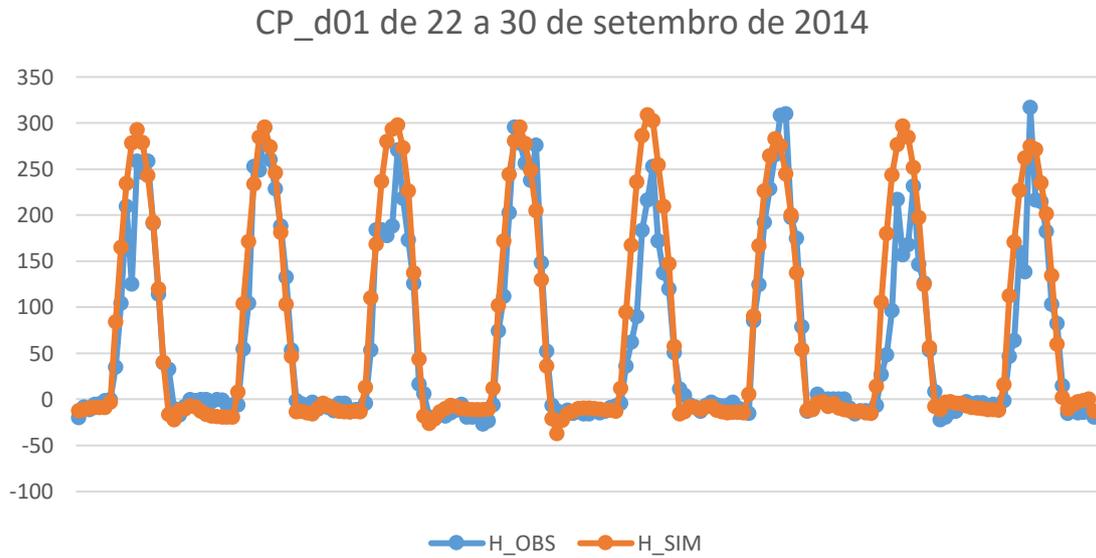


Figura 21 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

Os valores de fluxos de calor latente observados e simulados em Caatinga preservada, no domínio d01 (15km) para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014 está representado na Figura 22. Com os valores dados observados bem próximos dos dados observados no mês de setembro, o modelo superestimou com valores altíssimos, apesar dos valores simulados terem ficados em média nos 250 W.m^{-2} .

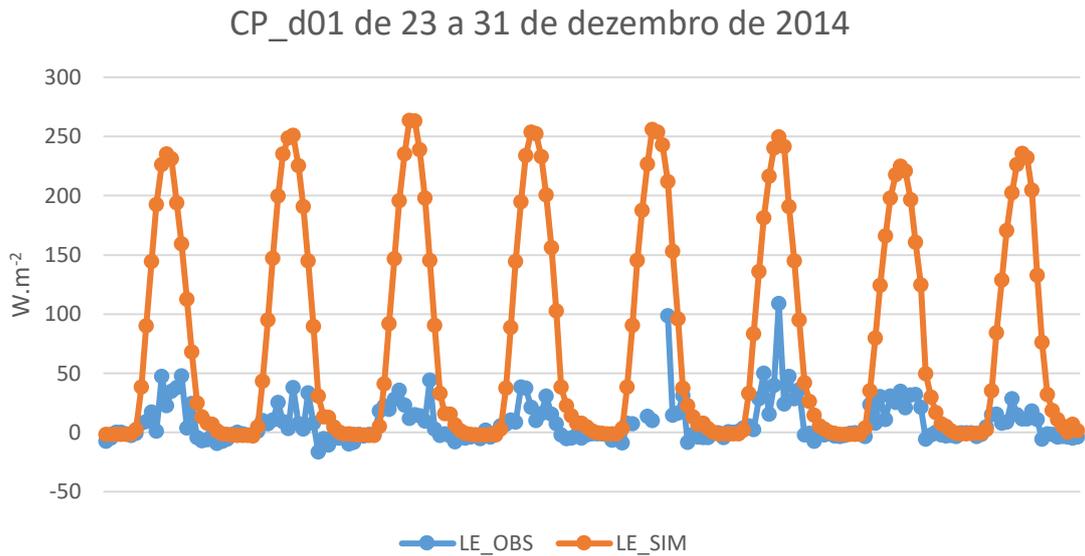


Figura 22 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

Na Figura 23 observa-se que os valores simulados pelo modelo superestima os valores observados em todo o período, mesmo assim, simulou bem os fluxos de calor sensível nos dias 23 e 30 de dezembro.

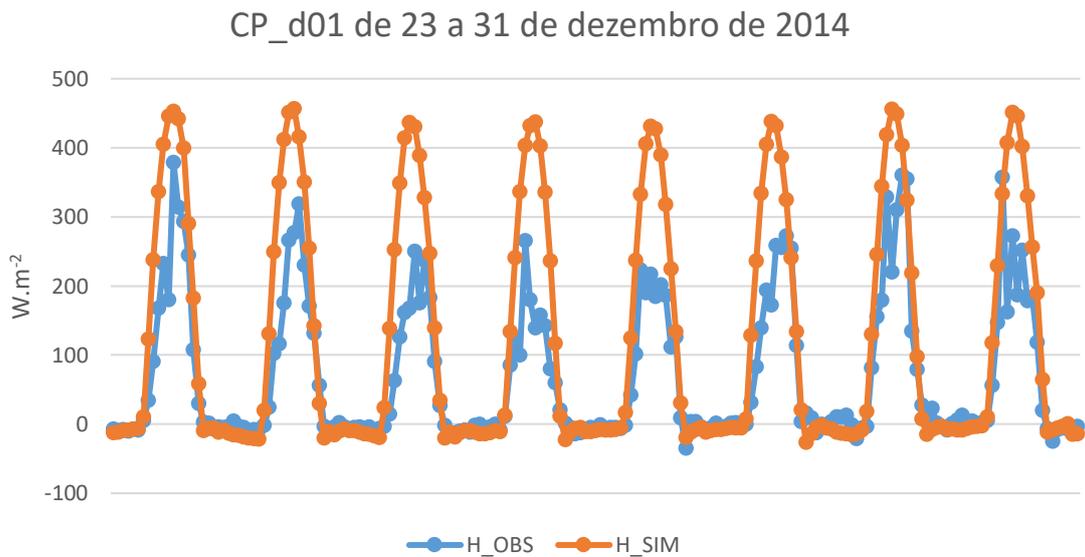


Figura 23 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

6.4 Fluxos de calor latente e sensível observados versus simulados em Caatinga preservada para o domínio d02 (5Km)

As Figuras de 24 à 25 apresentam os gráficos de fluxos de calor latente e sensível, observados, e simulados pelo modelo WRF em ambiente com vegetação Caatinga preservada para o domínio d02 (5 Km). Observa-se na Figura 6.17 os fluxos de calor latente e sensível no período de 23 à 31 de março de 2014. Para essa resolução do modelo, os valores simulados foram bem próximos da simulação do domínio d01 (15 Km) para o mesmo período em Caatinga preservada. Não obstante, o modelo não simulou bem numericamente em nenhum dos dias com domínio d02 (5 Km).

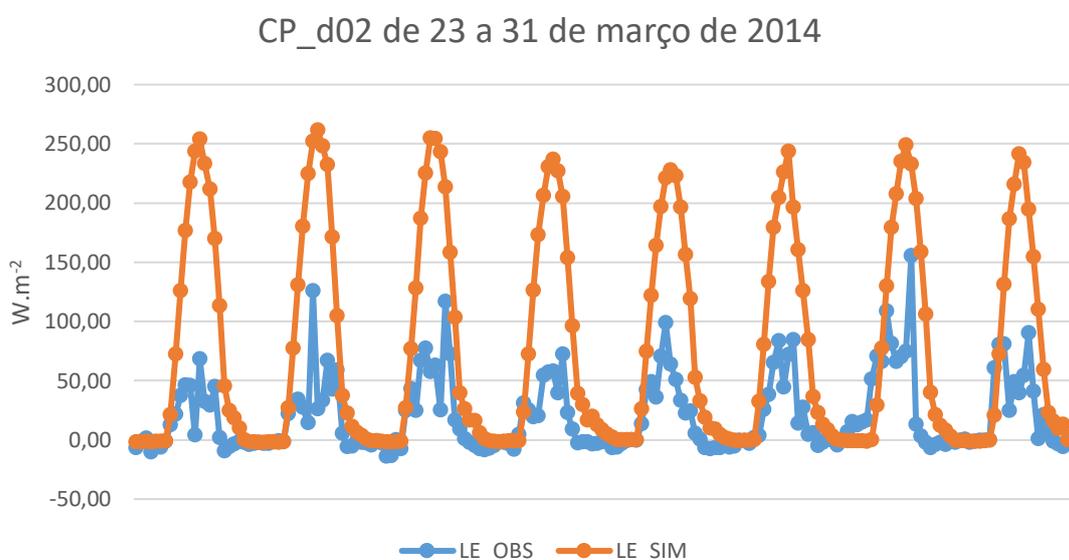


Figura 24 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

Os fluxos de calor sensível simulados pelo WRF versus observados na torre micrometeorológica situada em vegetação Caatinga preservada estão representados na Figura 25. Observa-se, no entanto, que ao contrário do fluxo de calor latente, o modelo representou bem, tanto temporal quanto numericamente os valores observados para o período compreendido entre os dias 23 e 31 de março de 2014. A exceção ficou por conta dos dias 23 e 31 nos quais foram observados diferenças de 107,6 W.m⁻² e 140,4 W.m⁻², respectivamente.

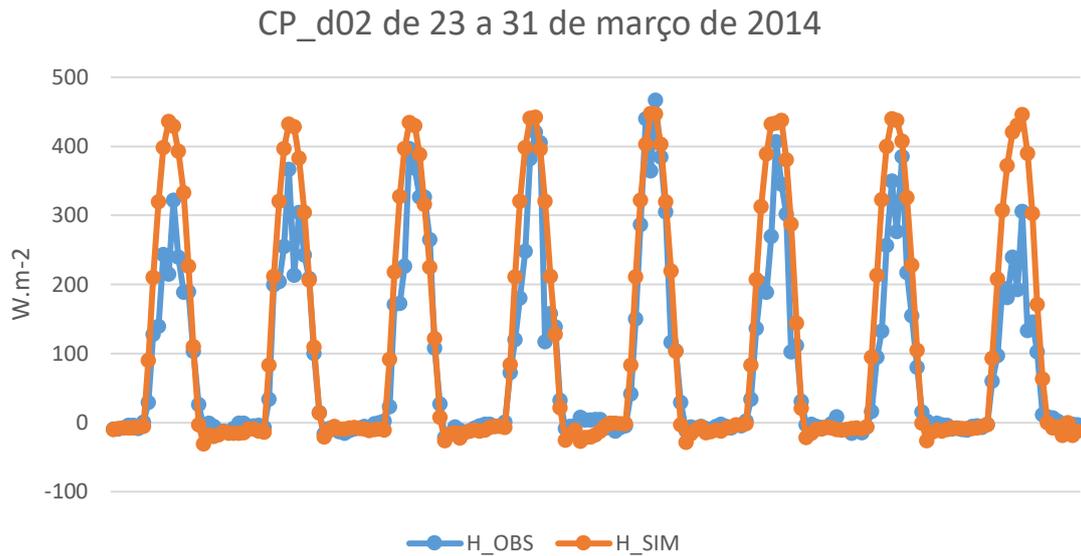


Figura 25 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

Para o mês de junho de 2014, Figura 26, mês climatologicamente considerado com maior volume de chuvas na região, apesar de não ter sido o caso do ano de 2014, observa-se melhores resultados para o fluxo de calor latente se comparado com os outros meses estudados, porém observa-se que nos primeiros dias, 21 e 22 de junho, o modelo superestimou os valores máximos em até 87,7 W.m⁻². O mesmo subestimou os valores máximos observados nos dias 23, 25 e 28 de junho com picos de até 88,0 W.m⁻².

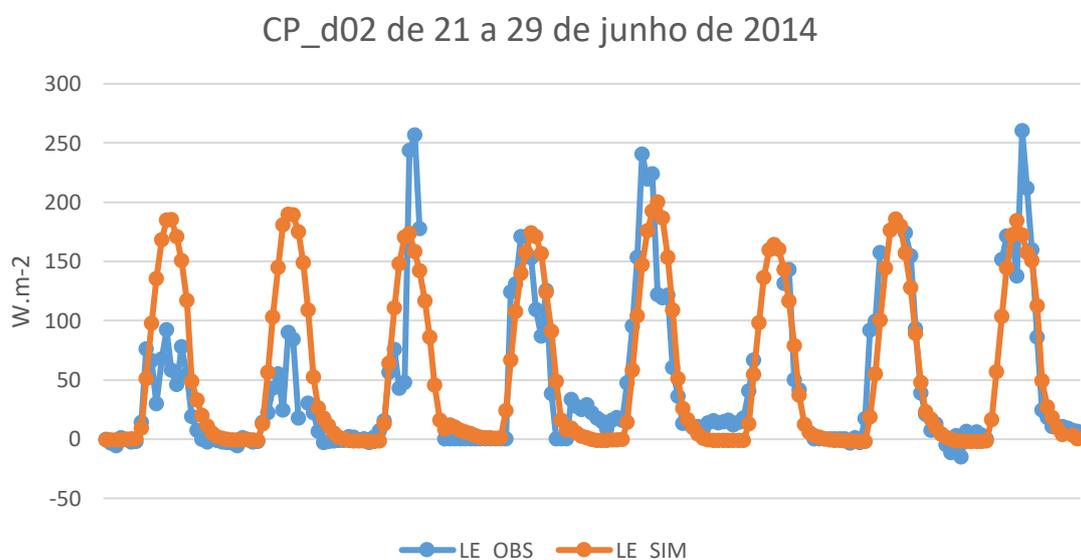


Figura 26 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

A Figura 27 mostra os fluxos de calor sensível observados e simulados para o período de 21 a 22 de junho de 2014. Observa-se que o modelo simulou bem apenas nos dias 21 e 22. Nos demais dias comparados, houve altíssimas diferenças entre os valores observados e simulados.

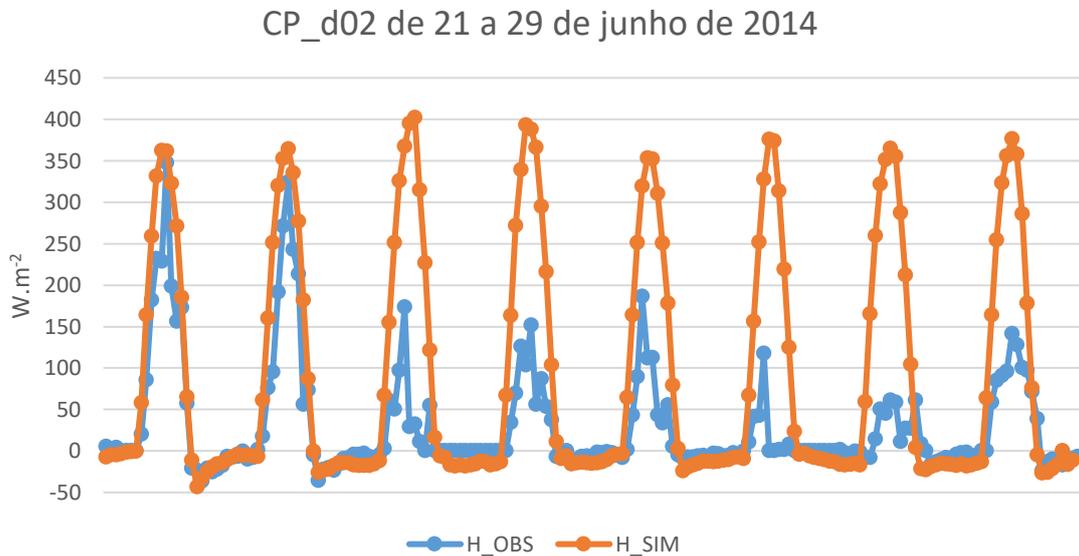


Figura 27 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Para o mês de setembro de 2014, as observações versus simulações para vegetação em Caatinga preservada, para os fluxos de calor latente e fluxo de calor sensível estão representadas nas figuras 28 e 29 respectivamente. Observa-se, no entanto, para o fluxo de calor latente, uma gradual melhora quando se comparado ao domínio d01 para este mesmo período, onde o maior valor simulado no domínio d02 foi 253,7 W.m⁻² no dia 23. Sendo assim, houve uma significativa redução na diferença entre os valores observados e simulados em todos os dias do período estudado. Para o fluxo de calor sensível, Figura 29, os valores simulados foram muito superiores se comparado com os valores simulados no domínio d01, Figura 21, onde o maior valor simulado foi 309,1 W.m⁻². Para o domínio d02, em todo o período simulado, os valores de fluxo de calor sensível foram próximos e em alguns dias superiores a 450,0 W.m⁻².

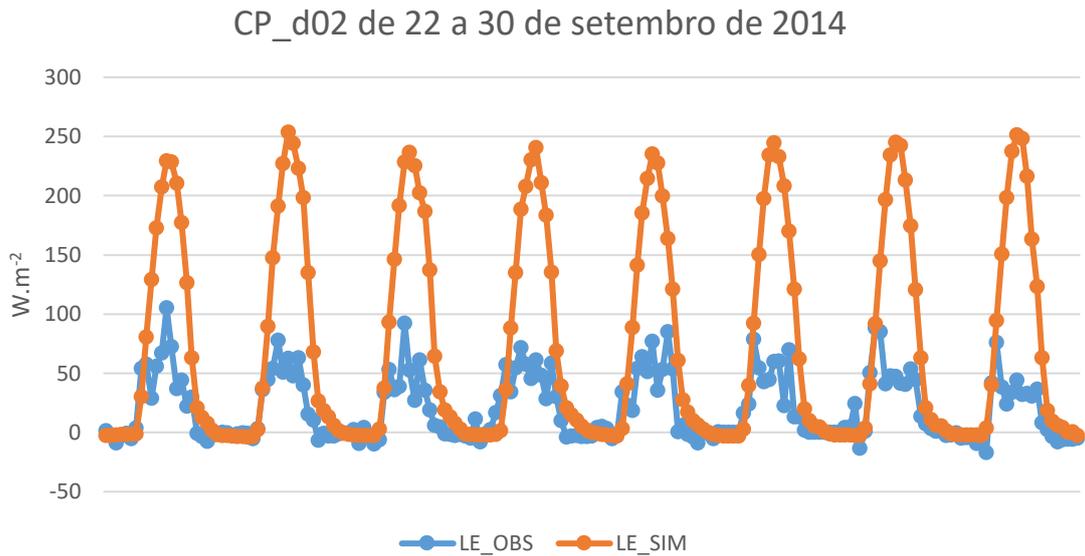


Figura 28 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

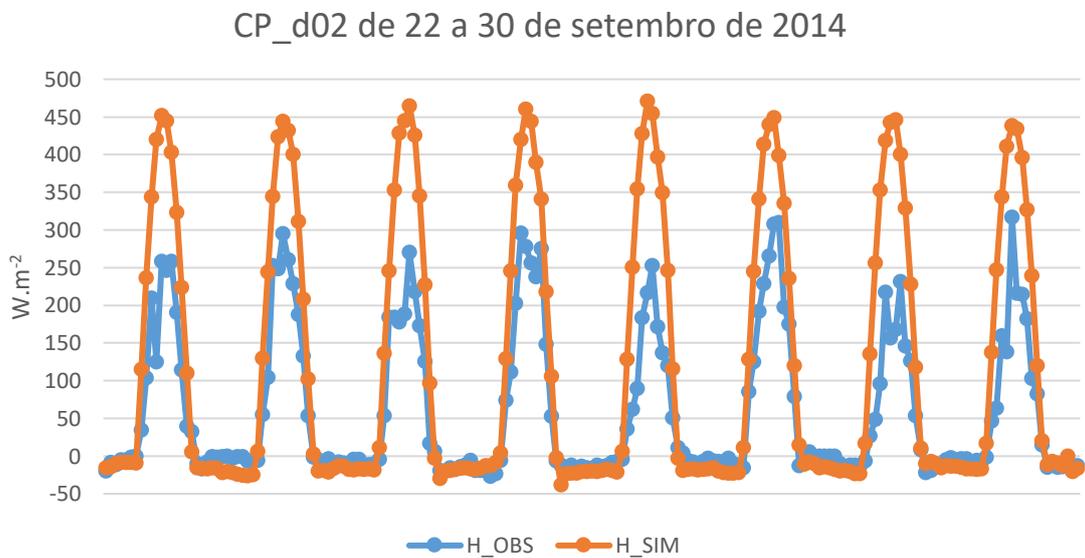


Figura 29 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

As Figuras 30 e 31 representam os fluxos de calor latente e sensível, respectivamente, em ambiente com vegetação Caatinga preservada, para o domínio d02, no mês de dezembro de 2014. Observa-se que não houve mudança significativa nos valores simulados quando comparados aos valores simulados com o domínio d01 quanto ao fluxo de calor latente, Figura 22. Enquanto os valores do domínio d01 variam entre 220,9 $W.m^{-2}$ e 262,9 $W.m^{-2}$

², no domínio d02 essa variação ficou entre 225,0 W.m⁻² e 263,7 W.m⁻², e ambas nos mesmos dias, 25 e 29 de dezembro de 2014, respectivamente.

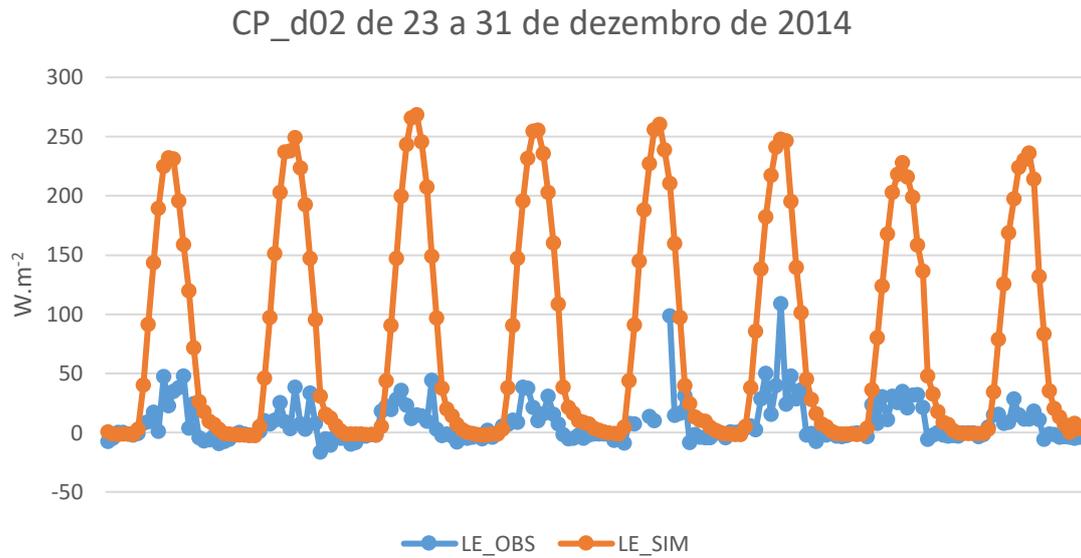


Figura 30 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) para no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

Para o fluxo de calor sensível no domínio d02 em Caatinga preservada no período de 23 a 31 de dezembro, Figura 31, observa-se que o modelo simulou bem nos primeiros dois dias. Como no mês o período estudado no mês de setembro, Figura 6.16, não houve diferença significativa nos valores simulados se comparado ao mesmo período de dezembro.

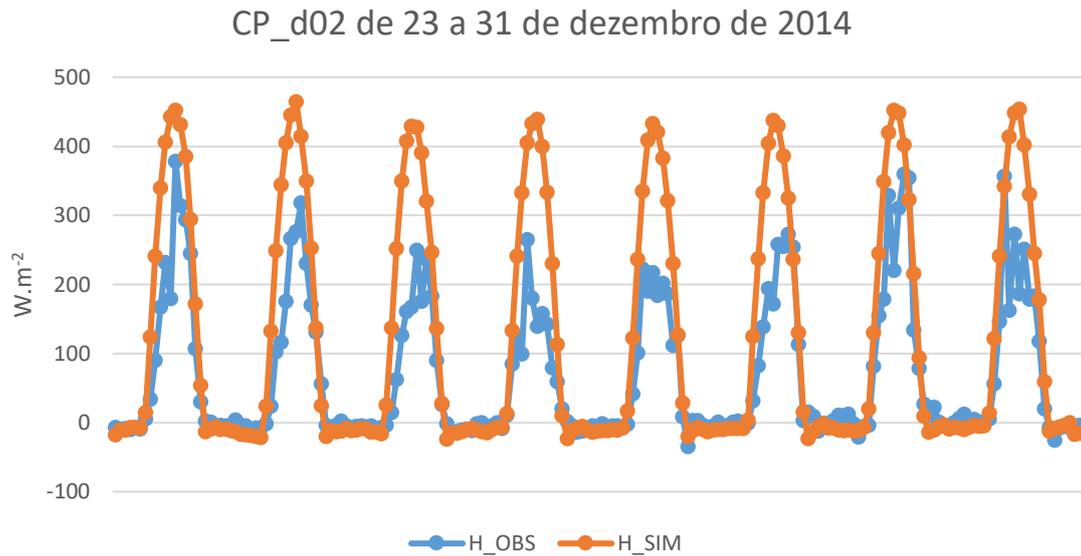


Figura 31– Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

6.5 Fluxos de calor latente e sensível observados versus simulados em Caatinga preservada para o domínio d03 (1 Km)

Os fluxos de calor latente e sensível, observados, e simulados pelo modelo WRF em ambiente com vegetação Caatinga preservada para o domínio d03 (1 Km) estão representados nas Figuras de 32 a 39. Para o período de 23 a 31 de março de 2014, Figura 32, para o fluxo de calor latente, observa-se que os valores simulados ficaram bem próximos dos valores simulados no domínio d02, porém inferior para todo o período. Verifica-se também, que nesse domínio, o modelo não simulou bem os dados observados. Já para o fluxo de calor sensível, Figura 33, ao contrário do fluxo de calor latente, durante o período de estudo do mês de março de 2014, o modelo WRF foi bem sucedido quanto a simulação. O modelo simulou bem, principalmente entre os dias 24 e 30 de março.

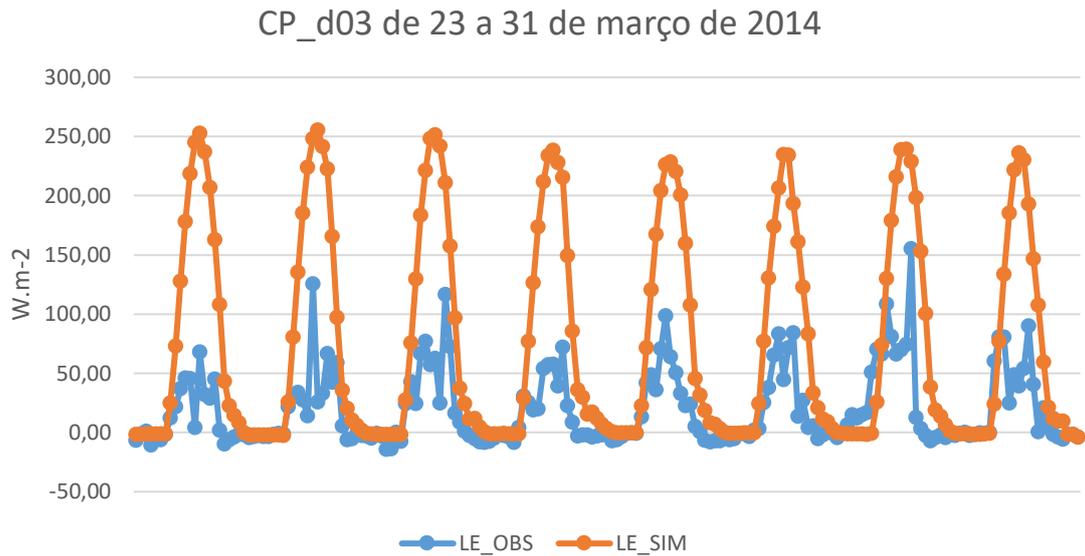


Figura 32 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

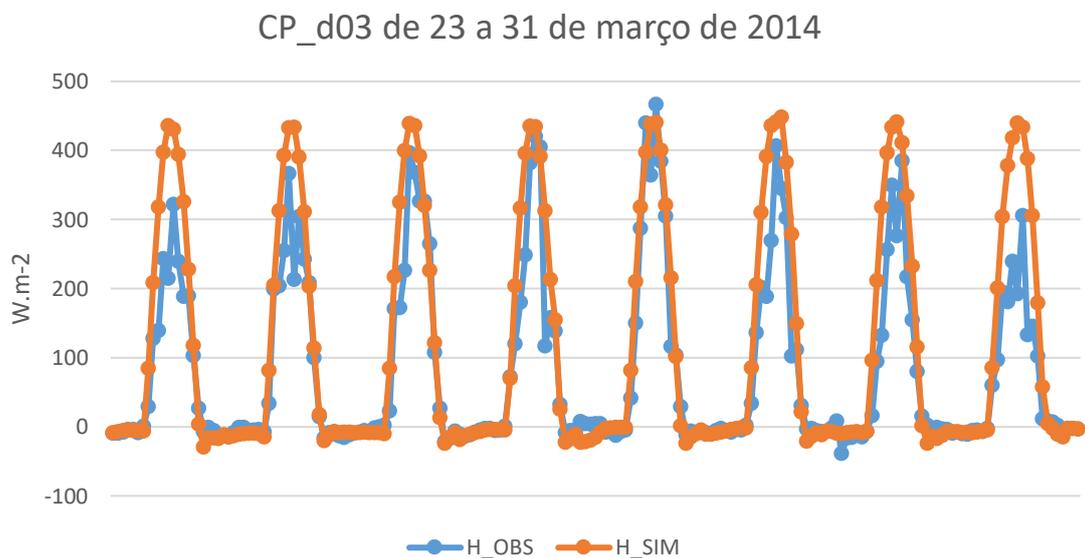


Figura 33 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

A Figura 34 mostra o ciclo diário, no período de nove dias, do fluxo de calor latente obtidos a partir das observações de campo para o período de 21 a 29 de junho de 2014 como também os dados simulados pelo modelo WRF. Verifica-se que a intensidade do fluxo de calor latente simulado é superior em relação ao observado em todo o período. O

fluxo de calor latente observado atinge valores máximos variando entre aproximadamente 90 e 270 Wm^{-2} próximo do meio dia, enquanto que os fluxos de calor latente simulados pelo modelo atingiram valores máximos variando entre 375 e 430 Wm^{-2} . Valores abaixo de 100 Wm^{-2} foram observados nos dias 21 e 22 de junho de 2014 indicando, possivelmente, condições de céu nublado e o período restante indicando, possibilidade de céu com poucas nuvens. Para o fluxo de calor sensível, Figura 35, verifica-se a existência de máximos variando entre 60 e 350 Wm^{-2} . Para este período, diferentemente do fluxo de calor latente, o fluxo de calor sensível foi bem simulado pelo modelo, com exceção dos dias 21 e 22, onde os valores simulados subestimaram os observados em até 213 Wm^{-2} de diferença no dia 21 de junho de 2014, ficando os dias de 23 a 29, os dados simulados bem próximos dos dados observados.

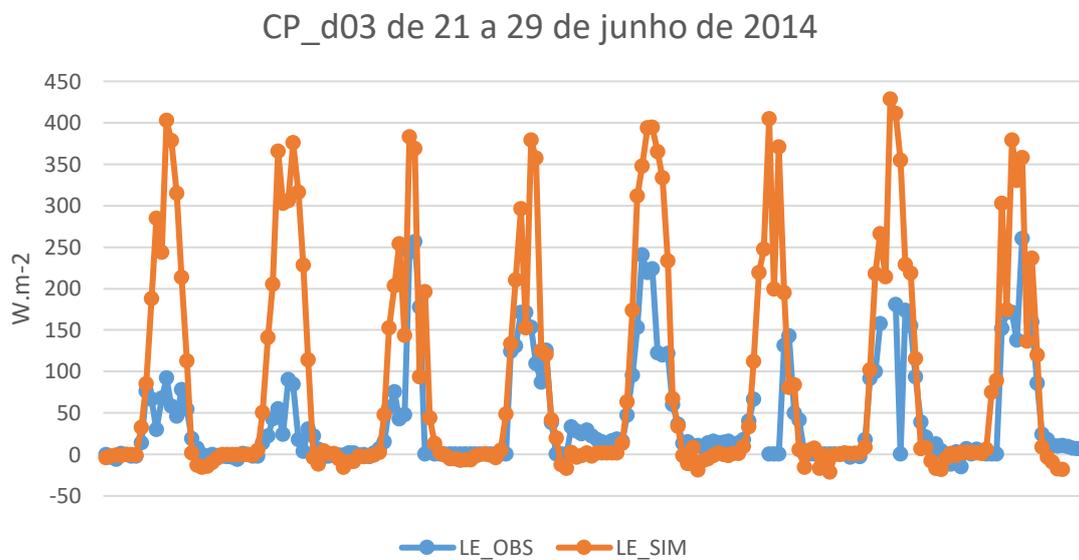


Figura 34 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

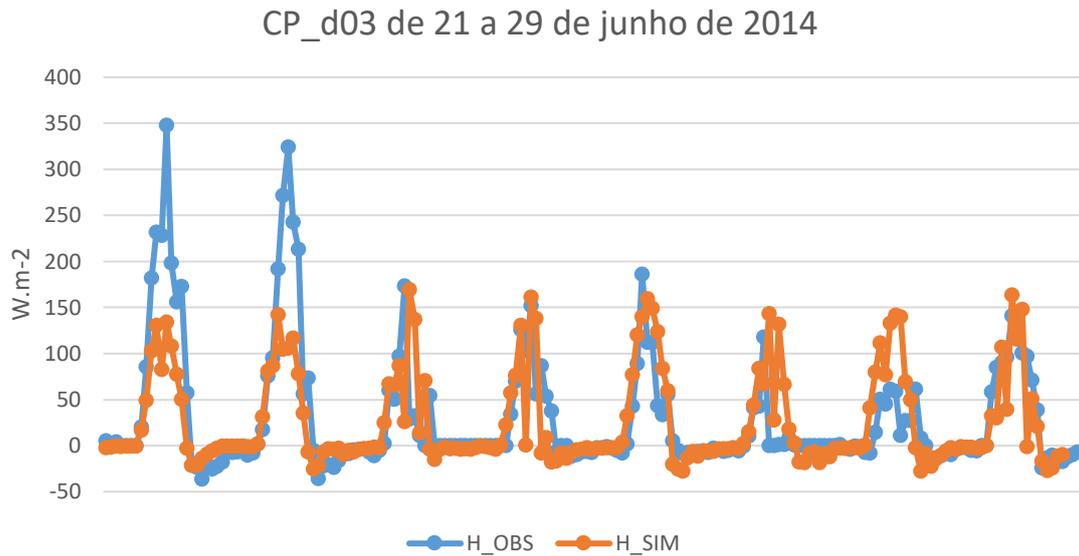


Figura 35 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Para o período de 22 a 30 de setembro de 2014, os fluxos de calor sensível e latente, tanto observados como simulados pelo modelo WRF, estão representados nas Figuras 36 e 37, respectivamente. Para este período em estudo, o valor máximo observado foi $105,4 \text{ Wm}^{-2}$ no dia 22, enquanto os valores restantes, do dia 23 a 30, não ultrapassaram os 100 Wm^{-2} . No entanto, os dados simulados pelo WRF, superestimaram, com valores de até 305 Wm^{-2} de diferença nos dias 23 e 27. Diferentemente do fluxo de calor latente, o fluxo de calor sensível, Figura 37, os dados simulados pelo modelo subestimaram em praticamente todo o período estudado. A exceção ficou por conta do dia 29 de setembro, onde o valor simulado superestimou o observado, mas com valor bem próximo. Para o fluxo de calor sensível, apesar do WRF subestimar para a maioria dos dias, o modelo simulou bem todo o período.

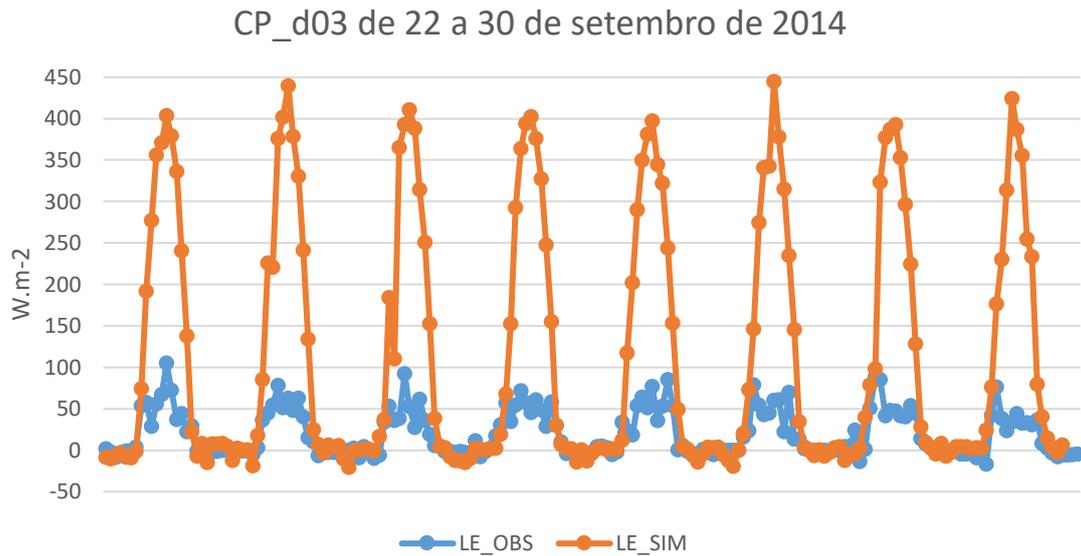


Figura 36 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

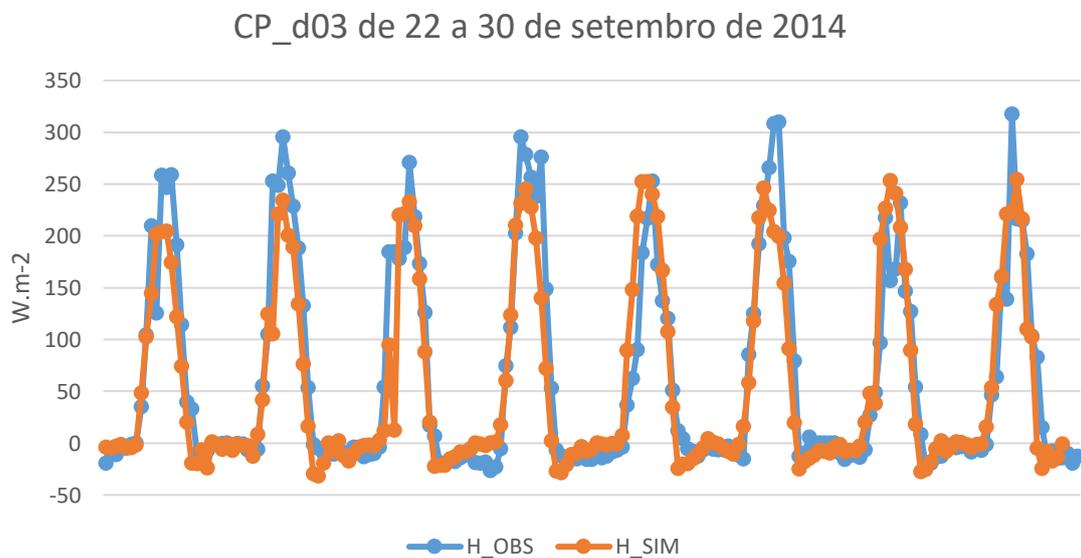


Figura 37 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

As Figuras 38 e 39 mostram os dados observados em campo dos fluxos de calor latente e sensível e suas respectivas simulações pelo modelo WRF para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014. Para o fluxo de calor latente, Figura 38, o WRF superestimou com valores bastante elevados os dados observados. Enquanto o valor máximo observado foi de $108,9 \text{ Wm}^{-2}$ no dia 28, o modelo WRF simulou valor de até $364,8 \text{ Wm}^{-2}$ no dia 25.

Sendo assim, observa-se que para o fluxo de calor latente, a acurácia do WRF é muito baixa para todo o período.

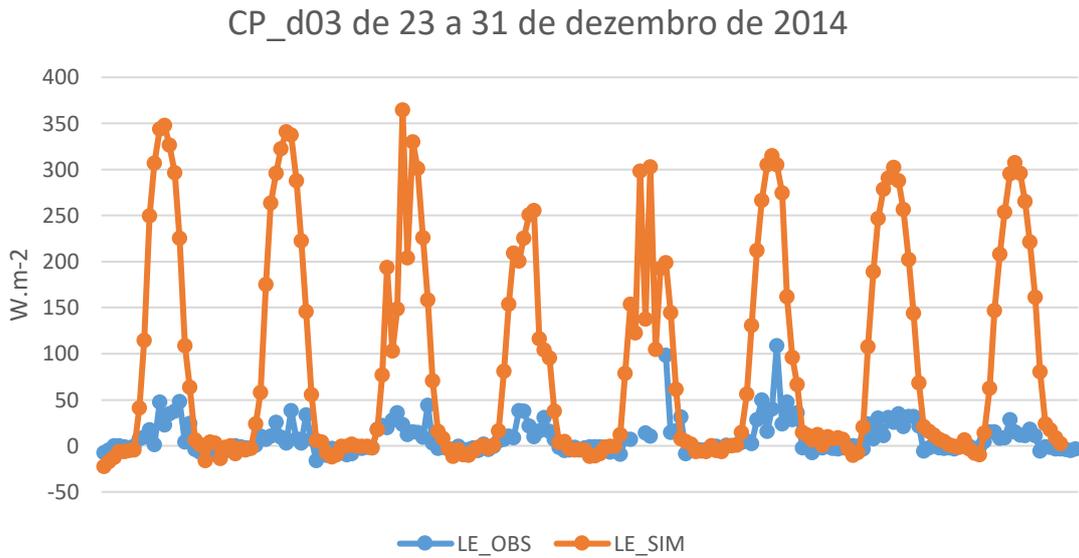


Figura 38 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

Já para o fluxo de calor sensível, o modelo WRF simulou satisfatoriamente os valores observados em campo, principalmente entre os dias 25 e 28 de dezembro de 2014. No primeiro dia, 23, o modelo subestimou o dado observado em 135 Wm^{-2} , Figura 39.

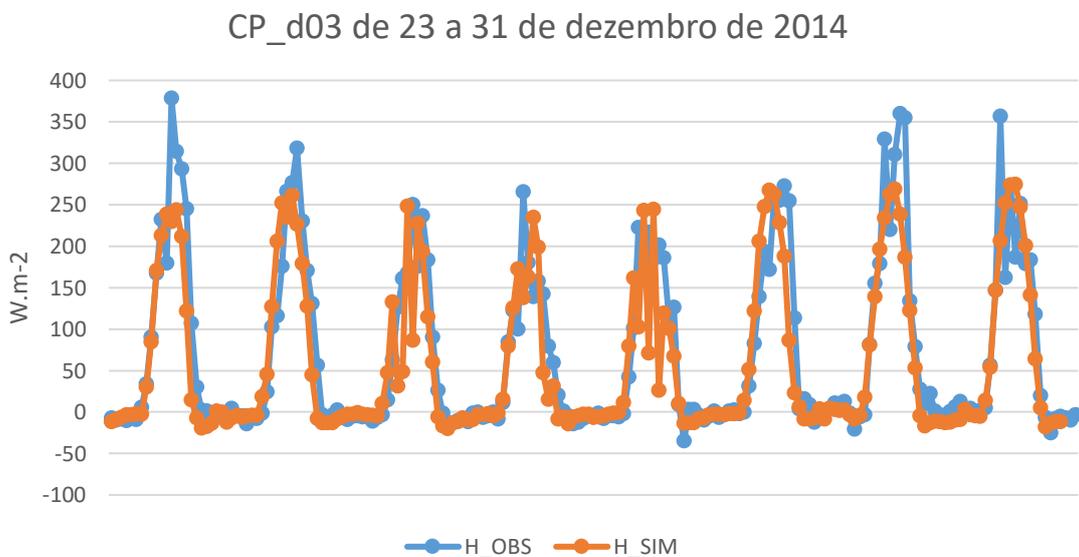


Figura 39 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga preservada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

6.6 Fluxos observados versus simulados em Caatinga degradada para o domínio d01 (15 Km)

Os gráficos de fluxos de calor latente e calor sensível, observados e simulados pelo modelo WRF em ambiente com vegetação Caatinga degradada para o domínio d01 (15 Km), estão representados nas Figuras de 40 à 47. Observa-se na Figura 40 o fluxo de calor latente observado e simulado, pelo WRF, no período de 23 à 31 de março de 2014. Nesse período, o modelo superestimou em todos os dias os dados observados. Os valores simulados pelo modelo resultaram, em média, 250 W.m^{-2} , os valores observados em campo não ultrapassaram 90 W.m^{-2} . O ciclo diário do fluxo de calor sensível observado e simulado pelo modelo WRF, no mesmo período, está representado na Figura 41. Observa-se que, em praticamente todos os dias, o modelo simulou suficientemente, em média, os dados observados em ambiente de Caatinga degradada, principalmente, nos dias 23 e 27 de março de 2014, onde os valores observados e simulados foram muito próximos.

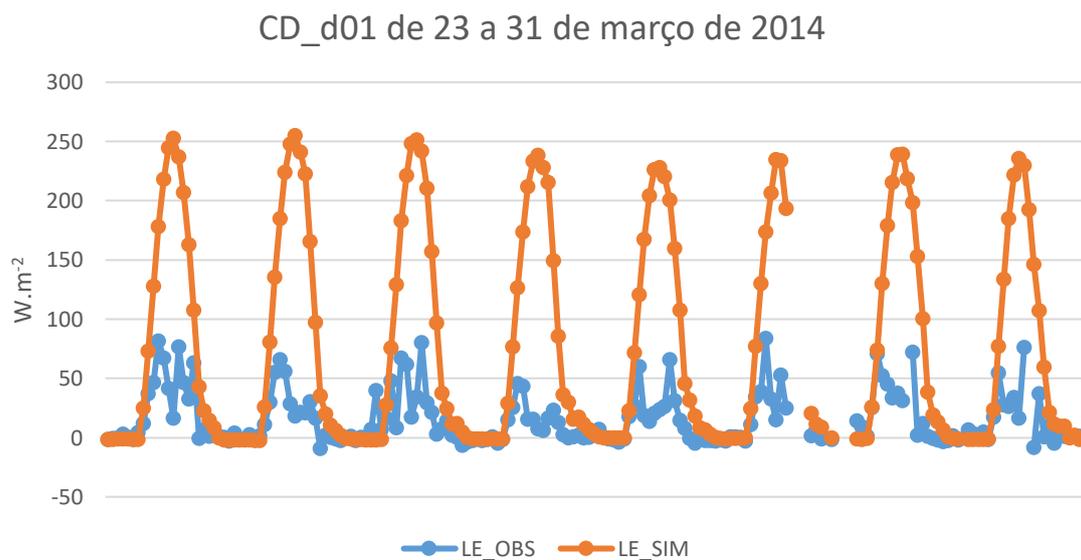


Figura 40 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

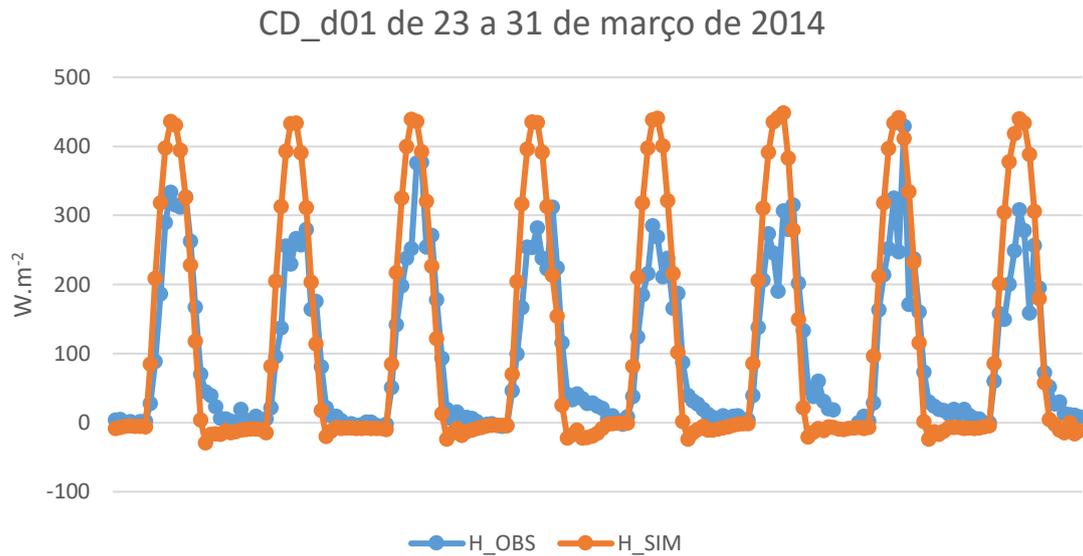


Figura 41 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

Para o período de 21 à 29 de junho de 2014, Figura 42, observa-se o gráfico do fluxo de calor latente com os valores observados e simulados pelo WRF. Verifica-se que na maioria dos dias, o modelo simulou bem, em média, os dados observados durante o período diurno, com destaque para os dias 24, 26, 27 e 28 de junho de 2014, em que os valores de pico observados foram muito próximos dos simulados, se comparados com os fluxos de calor latente dos outros meses estudados para esse mesmo domínio.

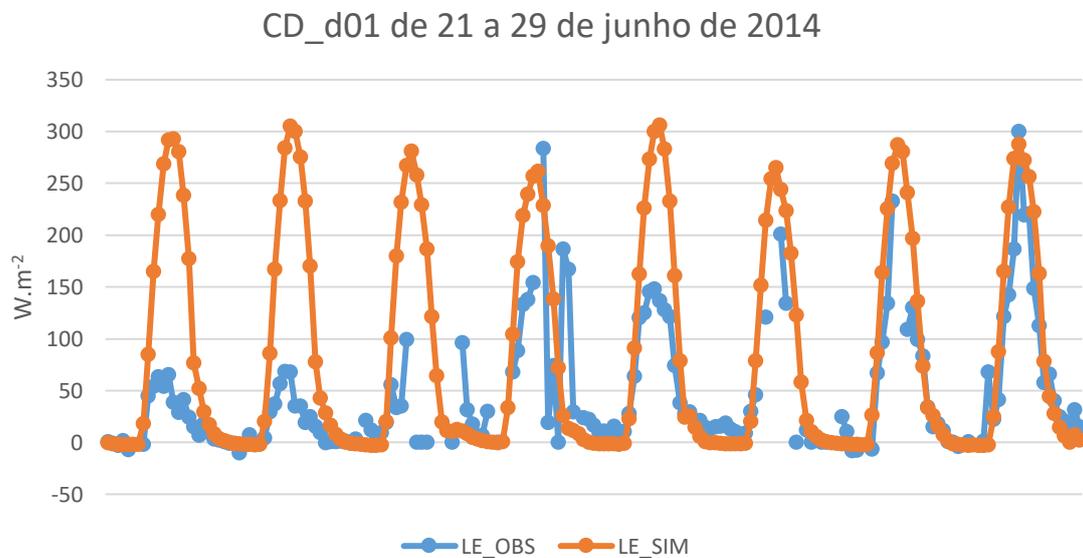


Figura 42 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Na Figura 43 estão representados os fluxos de calor sensível simulados e observados para o período de 21 a 29 de junho de 2014. Verifica-se que nos dias 21 e 22 o modelo WRF subestimou os valores observados em $84,8 \text{ W.m}^{-2}$ e $89,2 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente. Entre os dias 23 e 29 o modelo superestimou com valores que alcançaram até $228,3 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 27.

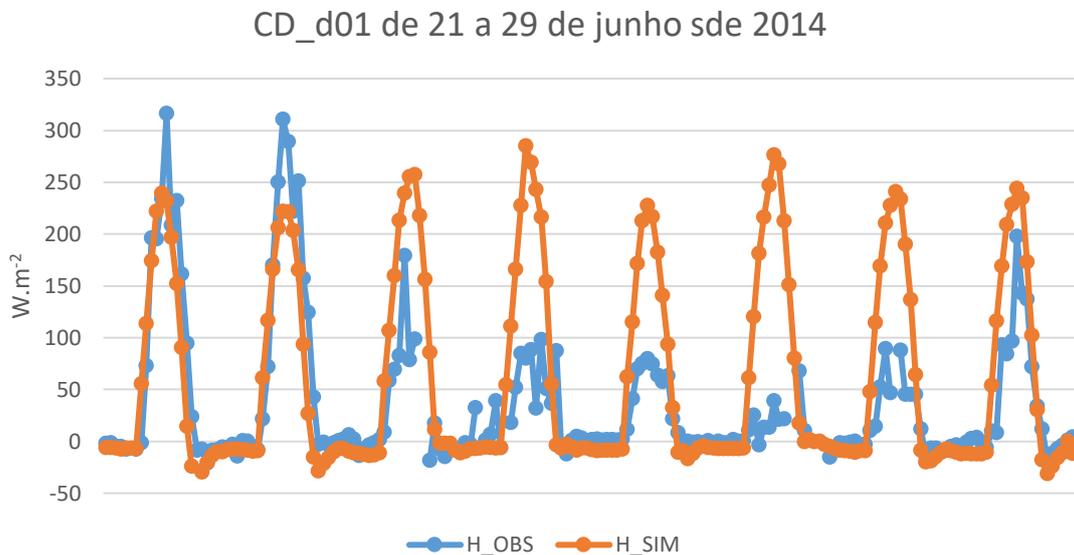


Figura 43 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Os valores de fluxo de calor latente observado e simulado entre os dias 22 e 30 de setembro de 2014, estão representados na Figura 44. Como ocorrido no mês de março, o modelo superestimou em todos os dias com diferenças bem significativas. Enquanto os dados observados, em média, ficaram em torno dos 100 W.m^{-2} , os dados simulados obtiveram valores superiores a 350 W.m^{-2} em todo o período. Com valores simulados bem próximo aos valores observados, os fluxos de calor sensível para o período de 22 a 30 de setembro em Caatinga preservada, destaca-se com relação aos meses de março e junho discutidos anteriormente, Figura 45. Com exceção do 27, o modelo representou muito bem os valores observados em todo o ciclo, tanto diurno quanto noturno, em que o maior valor simulado foi de $309,1 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 26 de setembro.

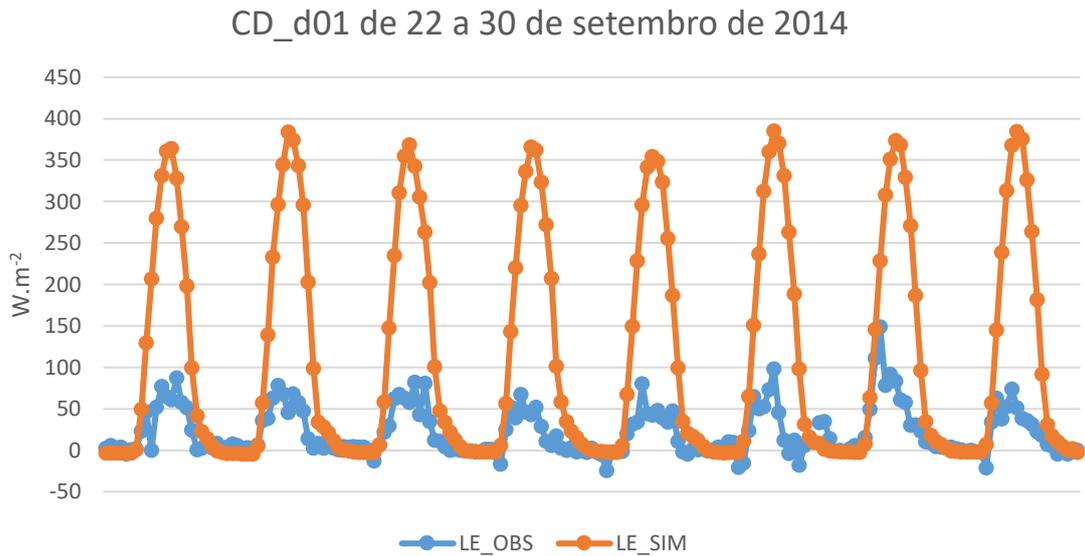


Figura 44 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

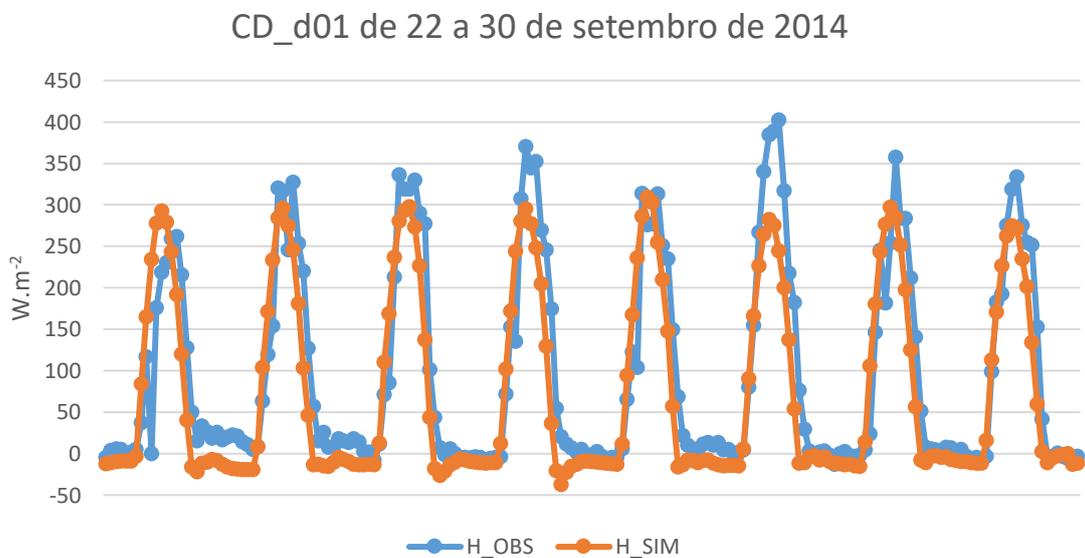


Figura 45 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

As Figuras 46 e 47 representam os fluxos de calor latente e sensível, respectivamente, em ambiente com vegetação Caatinga degradada, para o domínio d01, no mês de dezembro de 2014. Observa-se que no verão, o modelo não simulou bem os dados observados durante o período diurno. Houve uma enorme discrepância entre os valores observados e simulados, Figura 46. Enquanto os valores observados ficaram em média 30 W.m^{-2} , o modelo WRF simulou em média 250 W.m^{-2} . Para o fluxo de calor sensível, nesse mesmo domínio do modelo em Caatinga degradada para período de 23 a 31 de dezembro, Figura

47, observa-se que o modelo simulou bem nos dias 23, 24 e 25, onde a simulação condiz com as observações com valores muito próximos.

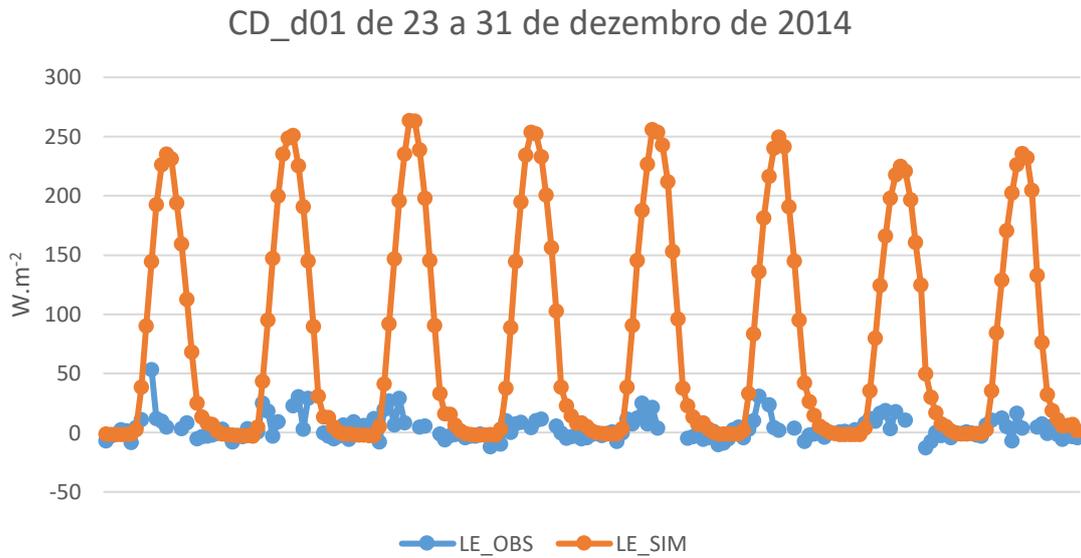


Figura 46 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

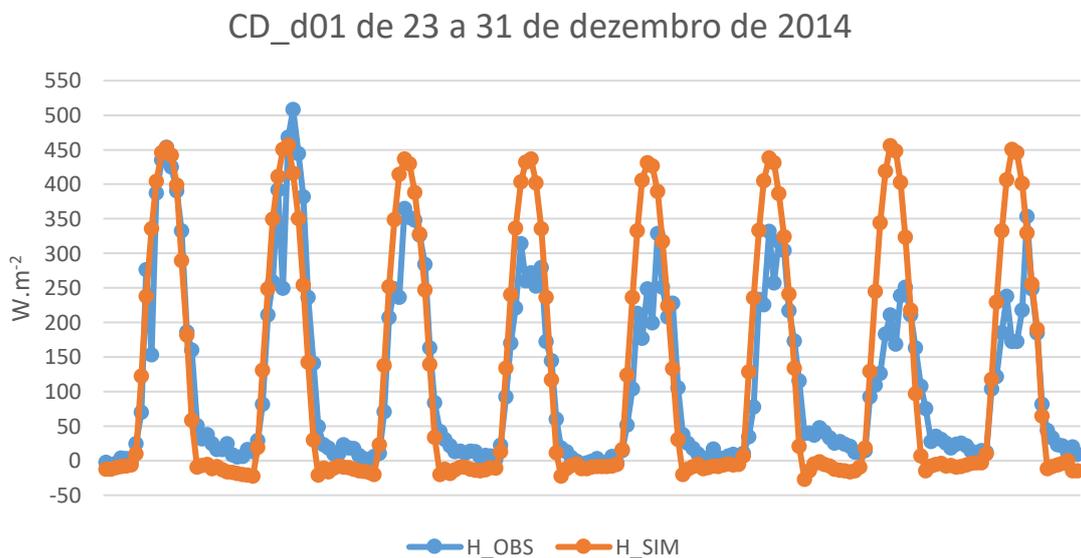


Figura 47 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d01 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

6.7 Fluxos observados versus simulados em Caatinga degradada para o domínio d02 (5 Km)

Nas Figuras de 48 à 55 estão representados os gráficos de fluxos de calor latente e sensível, observados e simulados pelo modelo WRF em ambiente com vegetação Caatinga degradada para o domínio d02 (5 Km). Na Figura 48 foi simulado o fluxo de

calor latente no período de 23 à 31 de março de 2014. Para essa resolução do modelo, os valores simulados foram bem próximos da simulação do domínio d01 (15 Km), Figura 6.33, para o mesmo período em Caatinga degradada. Não obstante, o modelo não simulou bem numericamente em nenhum dos dias com domínio d02 (5 Km), não havendo diferença significativa com relação ao domínio d01 (15 Km).

Os fluxos de calor sensível simulados pelo WRF versus observados na torre micrometeorológica situada em vegetação Caatinga degradada estão representados na Figura 49. Observa-se, no entanto, que ao contrário do fluxo de calor latente, o modelo representou bem numericamente os valores observados para o período compreendido entre os dias 23 e 31 de março de 2014, principalmente nos dias 25, onde o valor máximo simulado ($439,6 \text{ W.m}^{-2}$) e observados ($375,8 \text{ W.m}^{-2}$) foram relativamente próximos, com também no dia 29 com o valor máximo simulado ($450,9 \text{ W.m}^{-2}$) e o observado ($429,2 \text{ W.m}^{-2}$).

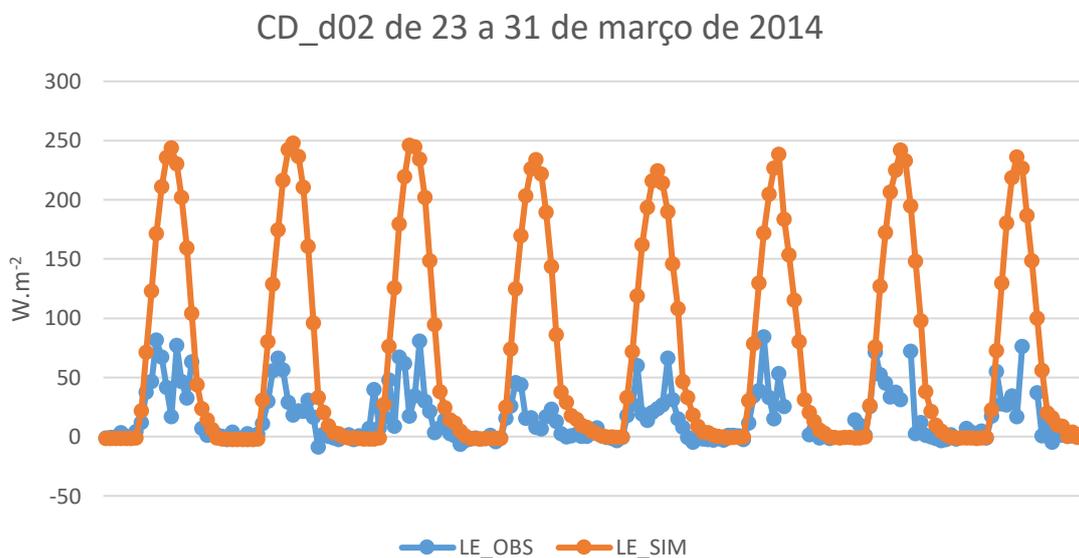


Figura 48 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) para o domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

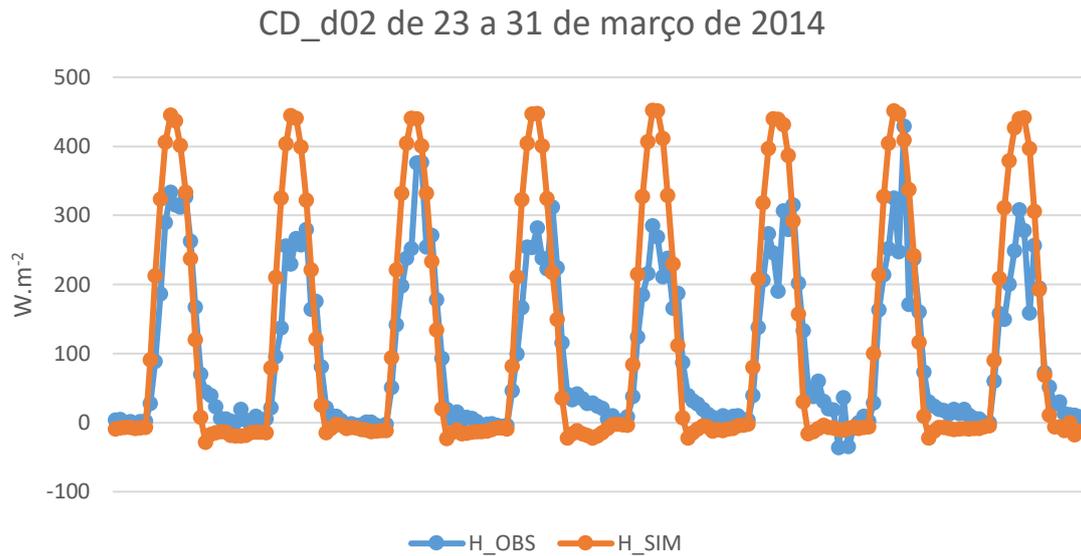


Figura 49 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

Na Figura 50 está representado os fluxos de calor latente observado versus simulado para o período 21 a 29 de junho de 2014, mês considerado chuvoso na região, apesar de não ter sido o caso do ano de 2014. Apesar do modelo WRF ter simulado bem os valores observados, houve uma melhora significativa quando comparado com os resultados da simulação do domínio d01 (15 Km), que em média, ficaram em torno de 300 W.m^{-2} , enquanto para o domínio d02 (5 Km) os dados simulados não ultrapassaram os 200 W.m^{-2} . Entretanto observa-se que nos dias, 21, 22 e 23 de junho, o modelo superestimou os valores máximos em até $117,0 \text{ W.m}^{-2}$, $120,0 \text{ W.m}^{-2}$ e $66,6 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente. Vale destacar os dias 25, 26 e 27, onde os valores simulados ficaram próximos aos observados. Os fluxos de calor sensível observados e simulados para o período de 21 a 29 de junho de 2014 estão representados na Figura 51. Ao contrário do que ocorreu com o fluxo de calor latente, Figura 6.43, para esse mesmo período de estudo, o WRF simulou bem apenas os dois primeiros dias, onde a diferença entre os valores observados nos dias 21 e 22 foram $49,9 \text{ W.m}^{-2}$ e $60,8 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente. Nos demais dias comparados, houveram diferenças significativas entre os valores observados e simulados.

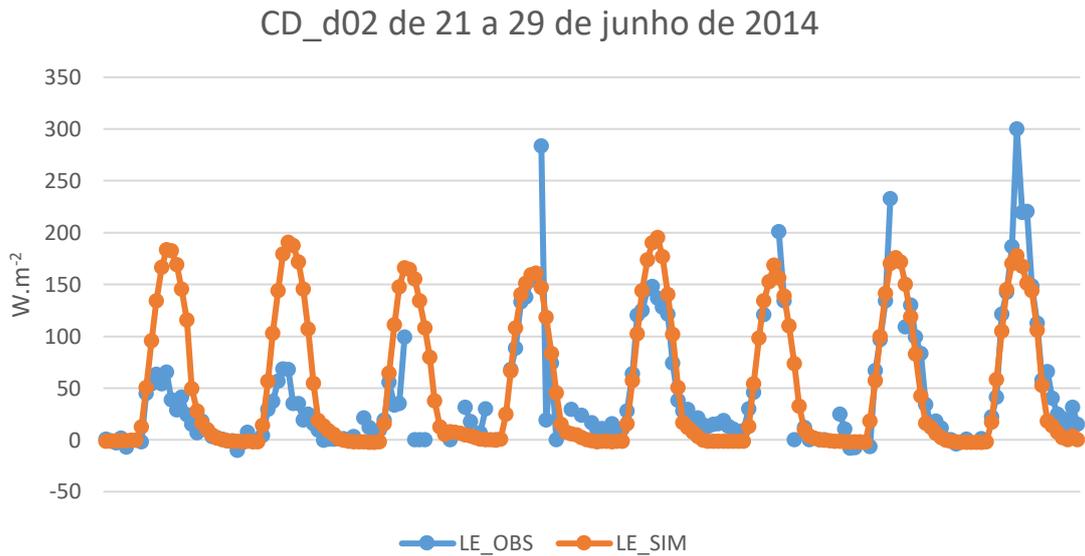


Figura 50 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

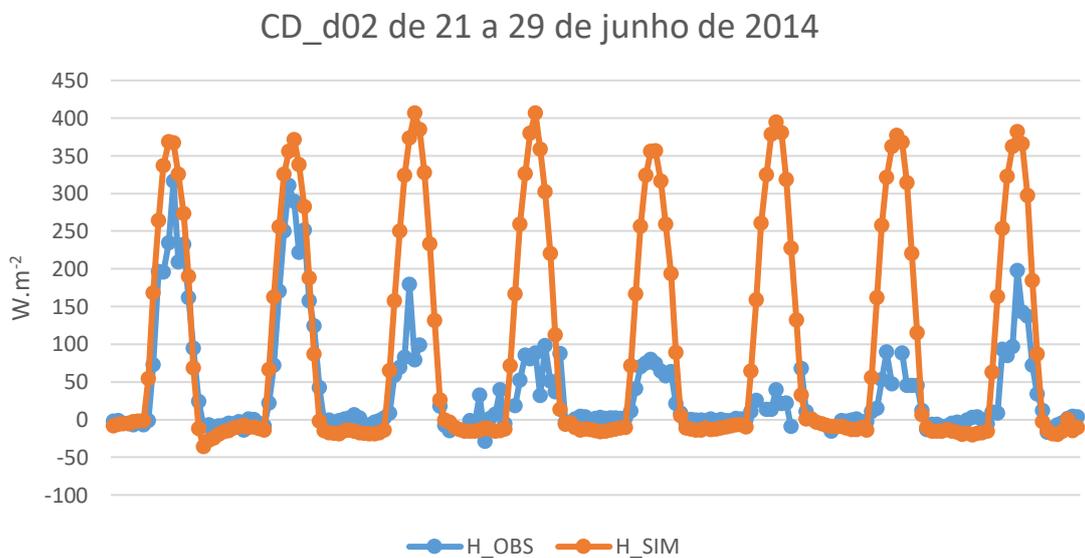


Figura 51 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Para o mês de setembro de 2014, entre os dias 22 e 30, as observações versus simulações para vegetação em Caatinga degradada, para os fluxos de calor latente e fluxo de calor sensível estão representadas nas Figuras 52 e 53, respectivamente. Observa-se, no entanto, para o fluxo de calor latente, que os valores simulados pelo WRF foram bem menores quando comparados com a simulação do domínio d01 (15 Km), Figura 44, para

esse mesmo período. Enquanto no domínio d01 as simulações ficaram entre $354,4 \text{ W.m}^{-2}$ e $385,0 \text{ W.m}^{-2}$, no domínio d02 não ultrapassou os $250,0 \text{ W.m}^{-2}$ em todo o período. Sendo assim, houve uma significativa redução na diferença entre os valores observados e simulados em todos os dias do período estudado. Na Figura 53 que representa o fluxo de calor sensível, os valores simulados foram muito superiores se comparado com os valores observados no domínio d01, Figura 45, onde o maior valor simulado foi $309,1 \text{ W.m}^{-2}$. Para o domínio d02, em todo o período simulado, os valores de fluxo de calor sensível, a exceção do dia 30 de setembro, foram superiores a $450,0 \text{ W.m}^{-2}$. Apesar do aumento da resolução do modelo, houve um aumento na diferença entre o observado e o simulado, ao contrário do que ocorreu com o fluxo de calor latente para esse mesmo período.

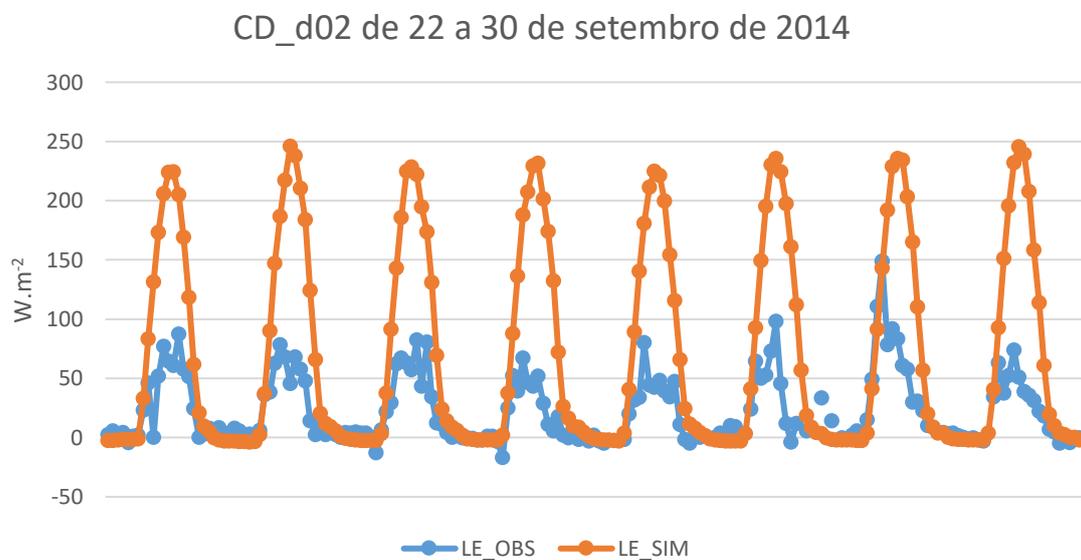


Figura 52 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

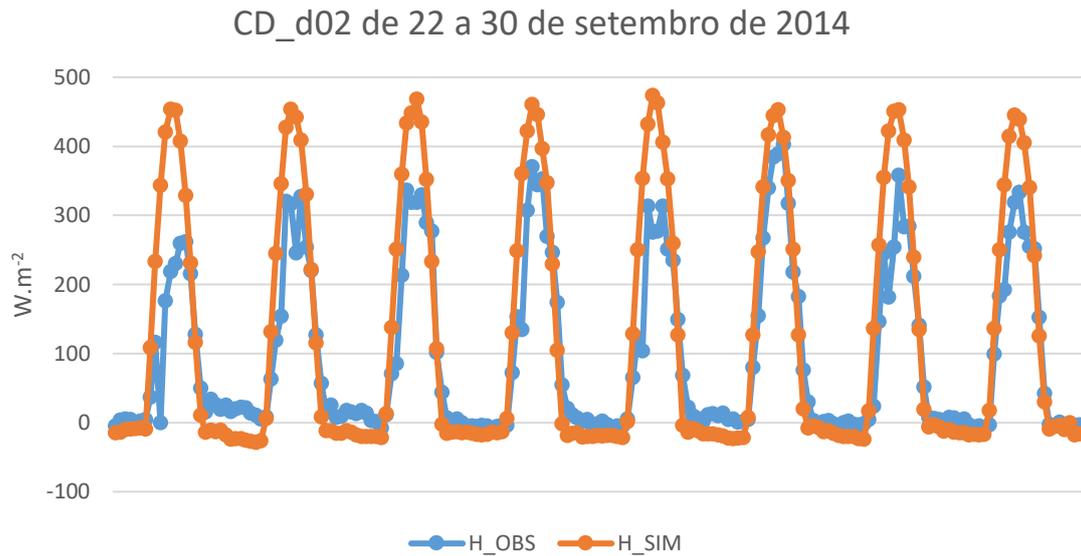


Figura 53 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

As Figuras 54 e 55 representam os fluxos de calor latente e sensível, respectivamente, em ambiente com vegetação Caatinga degradada, para o domínio d02, no mês de dezembro de 2014. Observa-se que não houve mudança significativa nos valores simulados quando comparados aos valores simulados com o domínio d01, Figura 46 quanto ao fluxo de calor latente. Os valores simulados para os domínios d01 e d02 foram muito próximos. Enquanto os valores do domínio d01 variam entre $220,9 \text{ W.m}^{-2}$ e $262,9 \text{ W.m}^{-2}$, no domínio d02 essa variação ficou entre $226,9 \text{ W.m}^{-2}$ e $257,5 \text{ W.m}^{-2}$. Para o fluxo de calor sensível no domínio d02 em Caatinga preservada no período de 23 a 31 de dezembro, Figura 55, observa-se que o modelo simulou bem nos primeiros três dias. Como ocorreu com o fluxo de calor latente, não houve praticamente nenhuma diferença entre os valores simulados no domínio d01 (15 Km), Figura 47 e d02 (5 Km), Figura 55 para o fluxo de calor sensível. Ambas as simulações tiveram valores médios muito próximos de 450 W.m^{-2} .

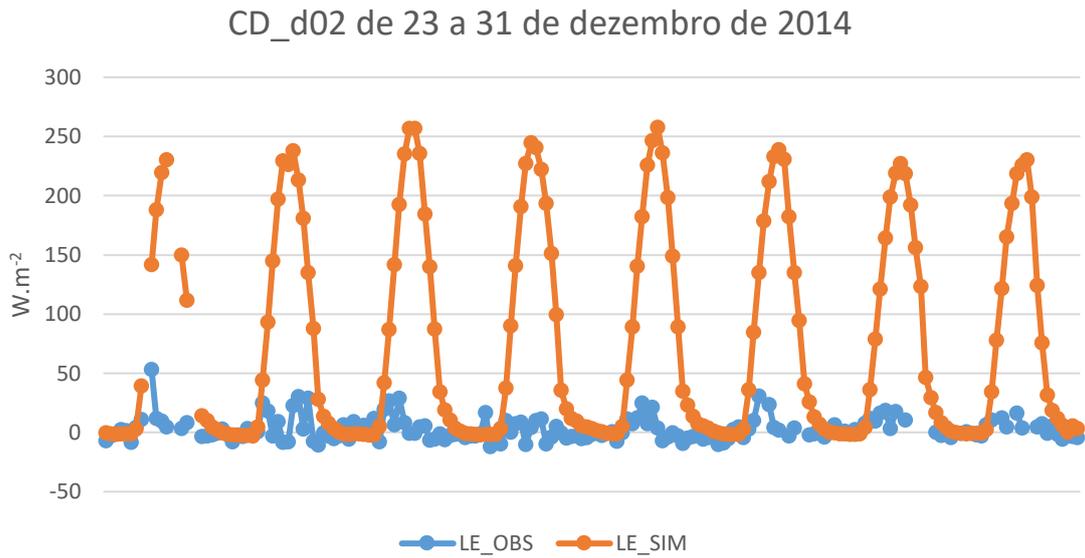


Figura 54 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

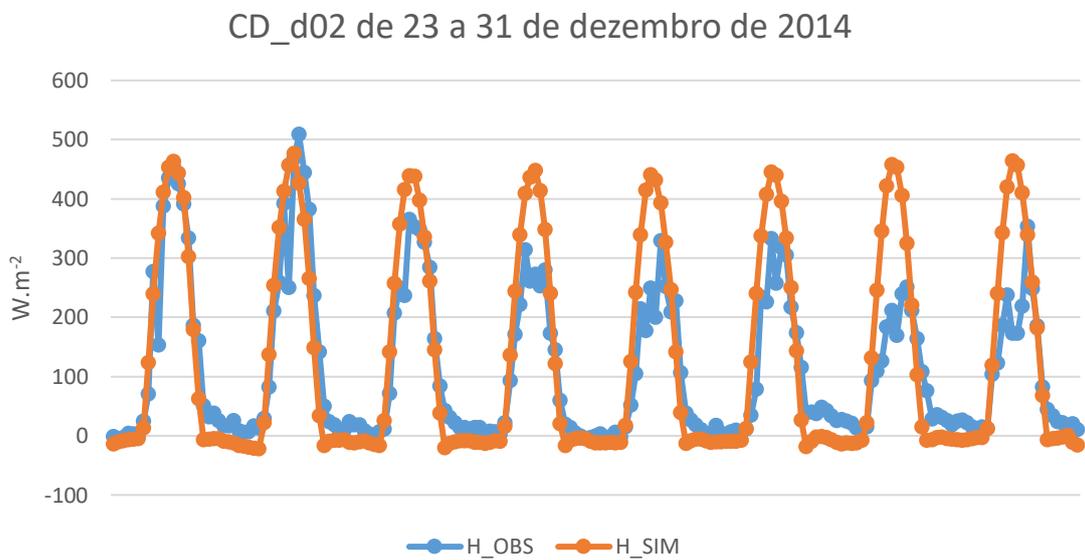


Figura 55 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d02 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

6.8 Fluxos observados versus simulados em Caatinga degradada para o domínio d03 (1 Km)

Os fluxos de calor latente e sensível, observados, e simulados pelo modelo WRF em ambiente com vegetação Caatinga degradada para o domínio d03 (1 Km) estão representados nas Figuras de 56 a 63. No período de 23 a 31 de março de 2014, Figura 56, para o fluxo de calor latente no domínio d03, observa-se que os valores simulados ficaram muito superiores aos valores simulados nos domínios d01 e d02. Verifica-se também, que nesse domínio, com a diminuição dos valores dos dados simulados, aumentou também a diferença para os dados observados. Já o fluxo de calor sensível, Figura 57, houve uma diminuição brusca na simulação do domínio d03 quando comparado aos domínios d01 e d02. Enquanto as simulações com os domínios d01 e d02 ficaram em torno de $450,0 \text{ W.m}^{-2}$, no domínio d03 variou entre $187,6 \text{ W.m}^{-2}$ e $230,6 \text{ W.m}^{-2}$. Sendo assim, o modelo WRF subestimou em até $254,1 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 27 de março e $80,4 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 30 de março de 2014.

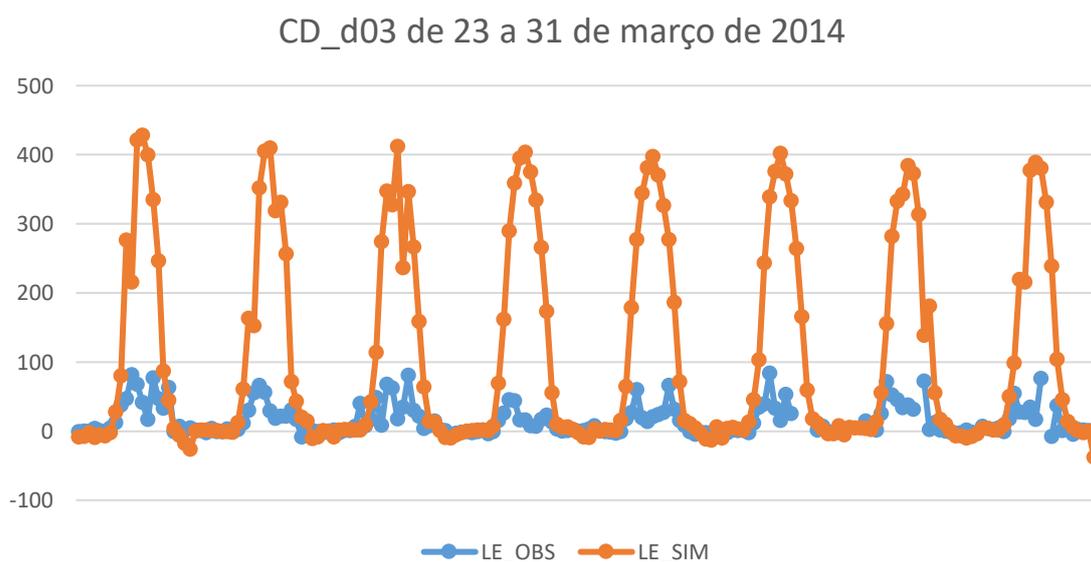


Figura 56 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

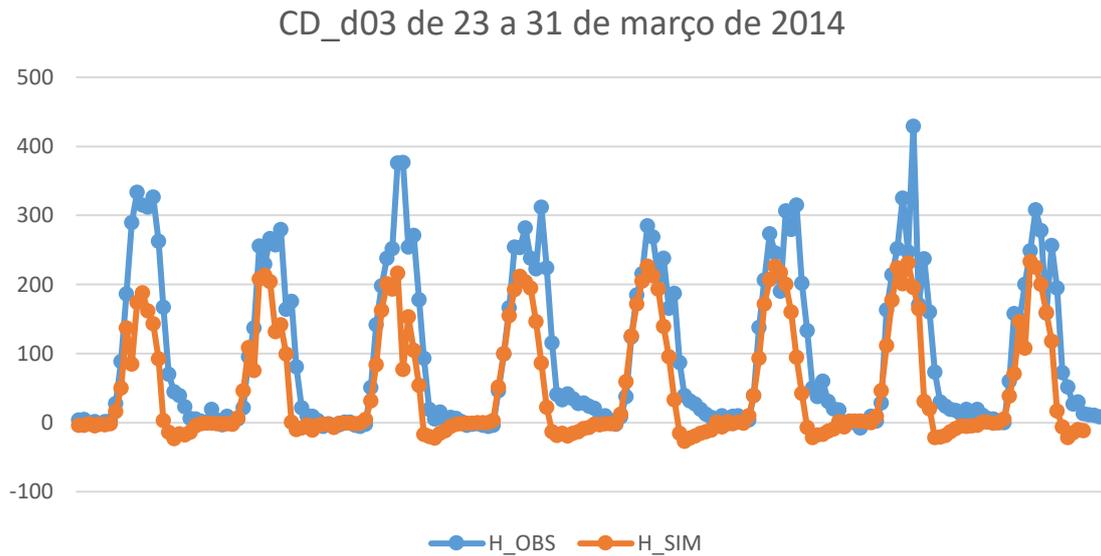


Figura 57 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de março de 2014.

A Figura 58 mostra o ciclo diário, no período de nove dias, do fluxo de calor latente obtidos a partir das observações de campo para o período de 21 a 29 de junho de 2014 como também os dados simulados pelo modelo WRF. Verifica-se que a intensidade do fluxo de calor latente simulado é superior em relação ao observado em todo o período. O fluxo de calor latente simulado atinge valores máximos variando entre aproximadamente $187,7 \text{ W.m}^{-2}$ e $230,6 \text{ W.m}^{-2}$ próximo do meio dia, enquanto que os fluxos de calor latente observados na estação micrometeorológica atingiram valores máximos variando entre $279,1 \text{ Wm}^{-2}$ e $232,9 \text{ Wm}^{-2}$. Para o fluxo de calor sensível, Figura 59, verifica-se que os valores simulados pelo modelo WRF subestimam os valores observados na dias 21, 22 e 23 de junho, com valores chegando até $158,3 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 21. Entre os dias 24 e 27, o modelo superestima os valores observados, em média, de $66,3 \text{ W.m}^{-2}$.

CD_d03 de 21 a 29 de junho de 2014

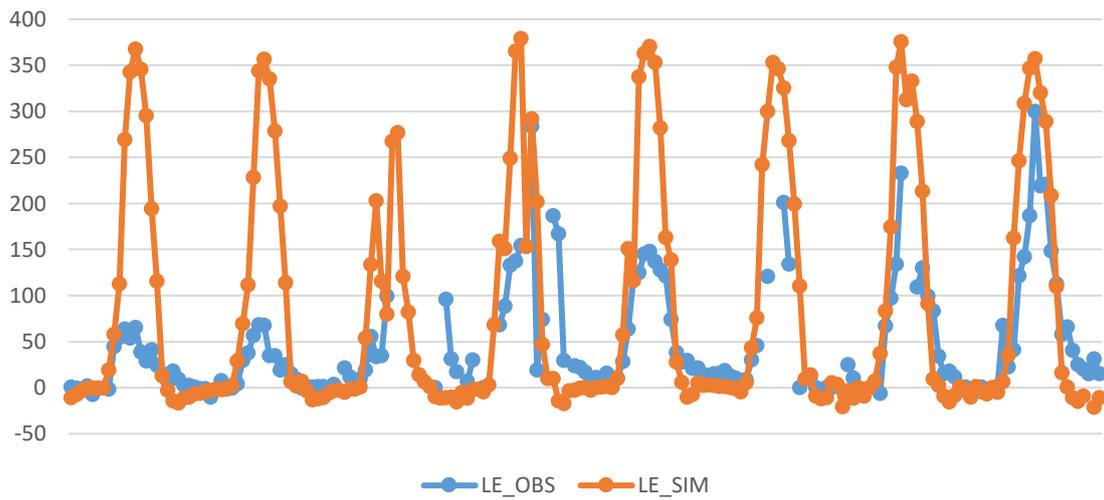


Figura 58 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

CD_d03 de 21 a 29 de junho de 2014

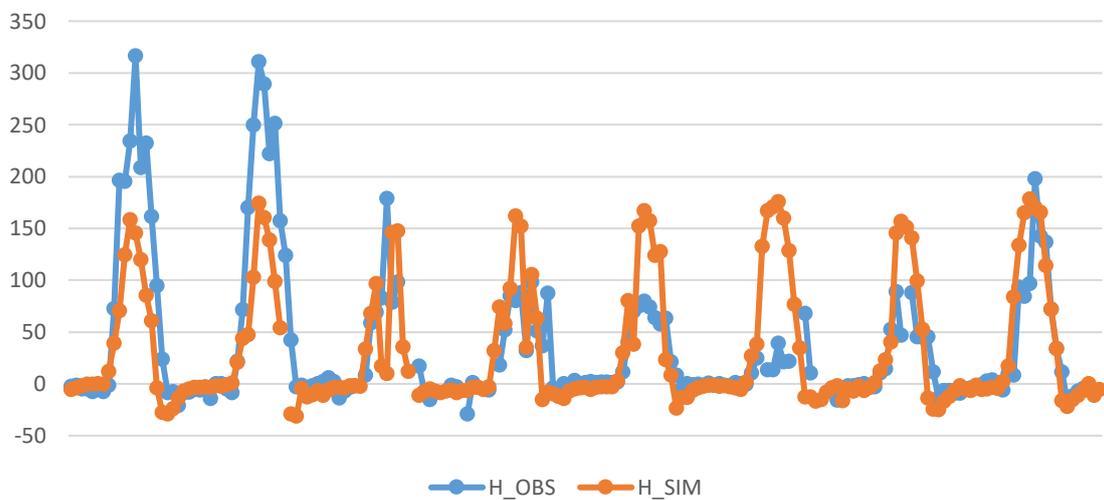


Figura 59 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 21 a 29 de junho de 2014.

Para o período de 22 a 30 de setembro de 2014, os fluxos de calor sensível e latente, tanto observados como simulados pelo modelo WRF, estão representados nas Figuras 60 e 61, respectivamente. Para este período em estudo, as simulações realizadas para o domínio d03 superaram os valores dos domínios d01 e d02 para o período, apresentando maior diferença entre os valores observados e simulados. Diferentemente do fluxo de calor latente, o fluxo de calor sensível, Figura 61, os dados simulados pelo modelo subestimaram em todo o período de estudo com valores próximos aos observados, com

maior diferença de $148,9 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 27 de setembro e menor do dia 22 de setembro com diferença entre o simulado e o observado de $55,0 \text{ W.m}^{-2}$.

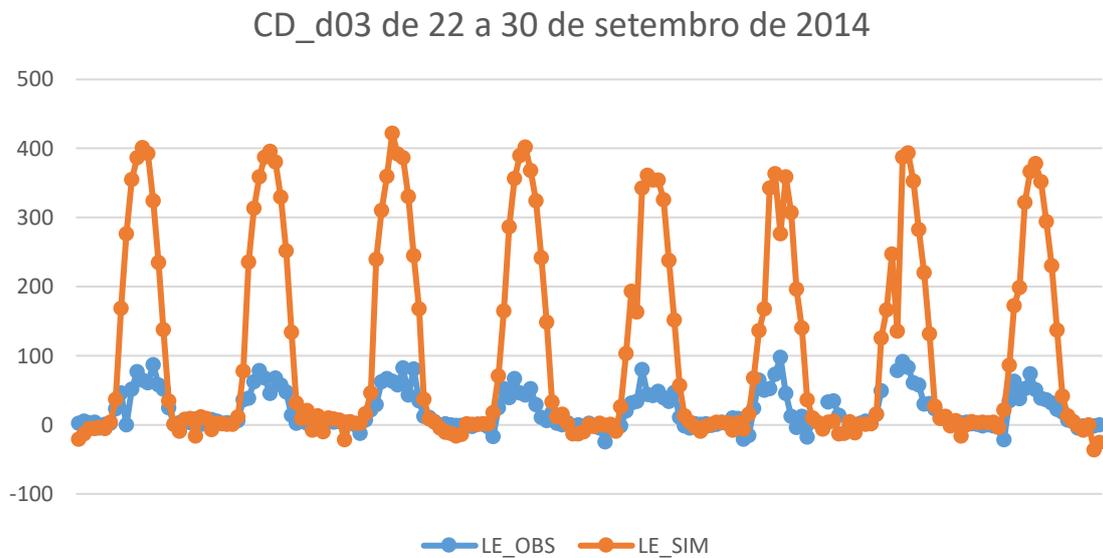


Figura 60 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

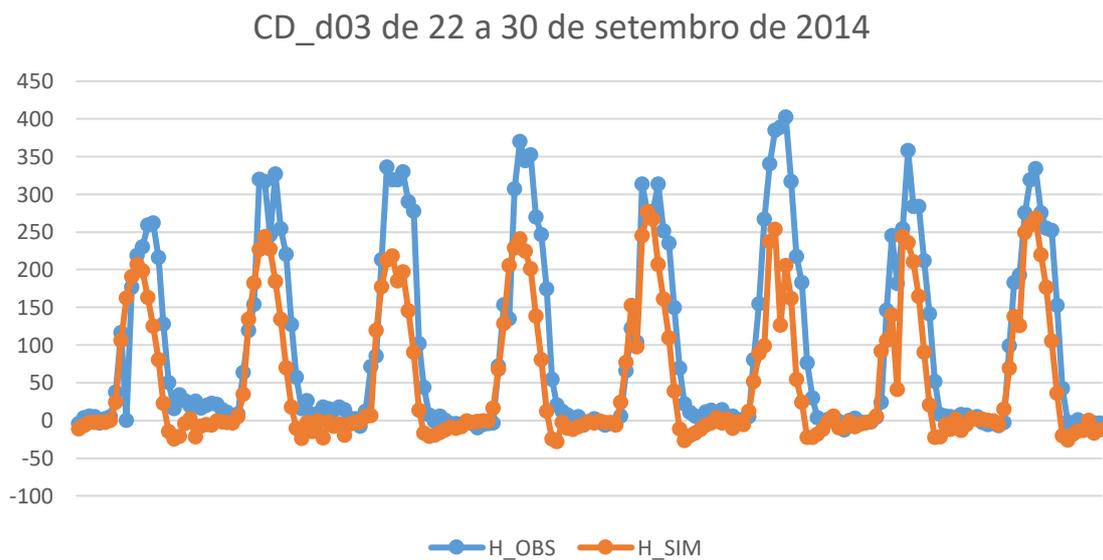


Figura 61 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 22 a 30 de setembro de 2014.

As Figuras 62 e 63 mostram os dados observados em campo dos fluxos de calor latente e sensível e suas respectivas simulações pelo modelo WRF para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014. Para o fluxo de calor latente, Figura 62, o WRF superestimou com valores bastante elevados os dados observados. Enquanto os valores médios observado

não superaram os $100,0 \text{ W.m}^{-2}$, o modelo WRF simulou valores médios em torno dos $400,0 \text{ W.m}^{-2}$, variando entre $361,1 \text{ W.m}^{-2}$ e $421,8 \text{ W.m}^{-2}$. Sendo assim, observa-se que para o fluxo de calor latente, a acurácia do WRF é muito baixa para todo o período. Na Figura 63 observa-se que para o fluxo de calor sensível, o modelo WRF simulou satisfatoriamente os valores observados em campo, principalmente entre os dias 27 e 30 de dezembro de 2014. Entre os dias 23 e 26 de dezembro o WRF superestimou com valores que chegaram até $280,0 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 24 de dezembro.

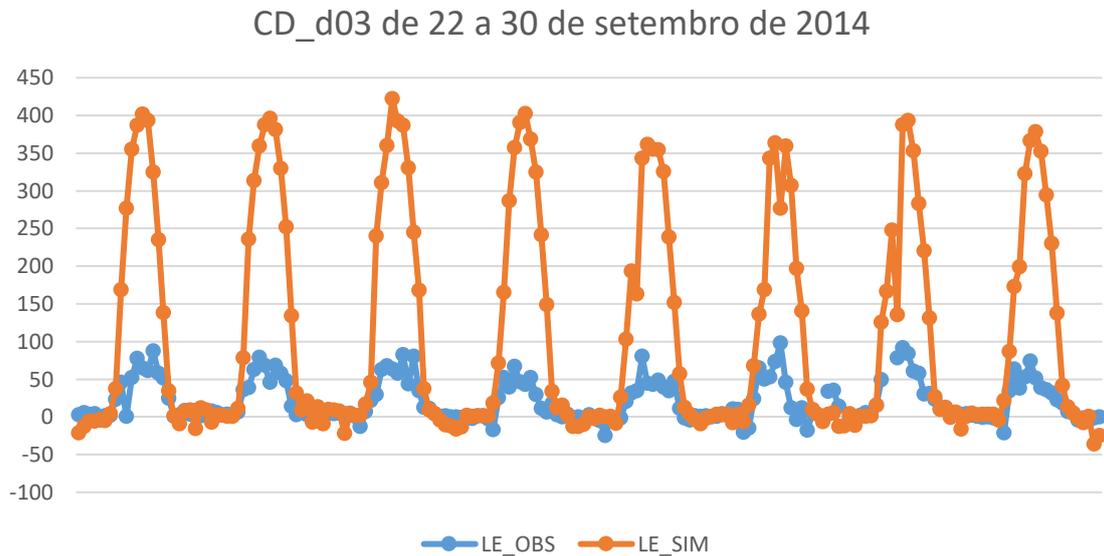


Figura 62 – Fluxos de calor latente observado (LE_OBS) e simulado (LE_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

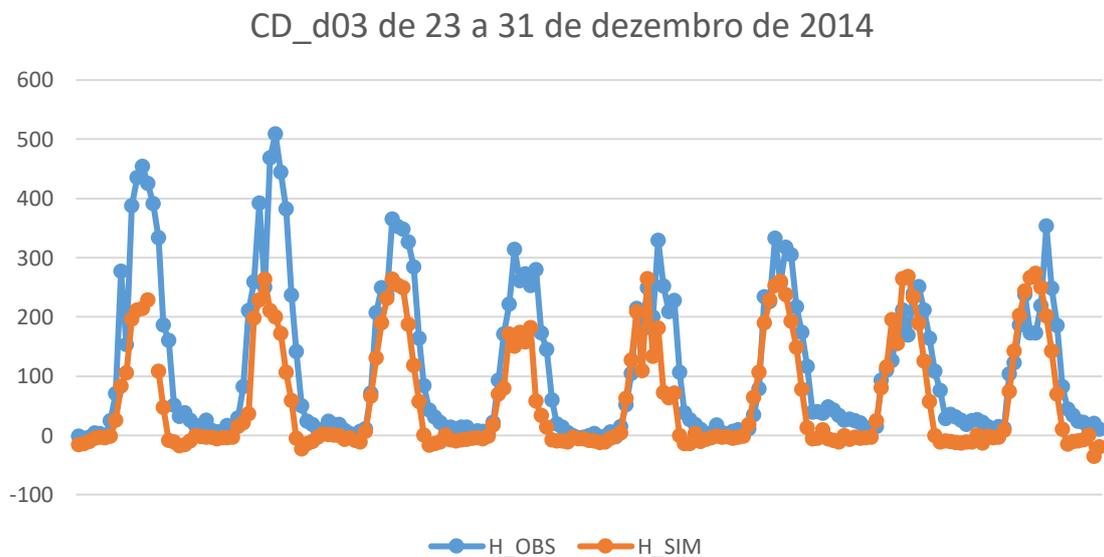


Figura 63 – Fluxos de calor sensível observado (H_OBS) e simulado (H_SIM) no domínio d03 em Caatinga degradada para o período de 23 a 31 de dezembro de 2014.

7. RESULTADOS ESTATÍSTICOS

As Tabelas 1 e 2 mostram as correlações entre os dados de fluxo de calor latente e sensível, respectivamente, observados e simulados pelo modelo WRF, nos três domínios (d01, d02 e d03) em vegetação de Caatinga preservada para as datas do estudo. De acordo com a Tabela 1, observou-se correlações igual ou superior a 0,70 em todos os dias do estudo, destacando-se, porém, as referentes ao mês de setembro, onde em todas os domínios as correlações ficaram acima de 0,80, fato que ocorreu também nas correlações observadas no período estudado no mês de junho para os domínios d02 (5Km) e d03 (1Km).

Tabela 1 – Correlações dos fluxos de calor latente nos três domínios estudados.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	0,76	0,74	0,81	0,70
d02 (5 Km)	0,77	0,81	0,81	0,74
d03 (1 Km)	0,76	0,80	0,83	0,71

Para o fluxo de calor sensível, Tabela 2, correlações superiores a 0,90 foram observadas para os períodos estudados nos meses de março e setembro, nos três domínios, e mês de dezembro para os domínios d01 (15Km) e d02 (5Km). Em dezembro, apenas o domínio d03 (1Km) apresentou valor abaixo de 0,90, ou seja, 0,88. Se comparando com os outros períodos estudados, junho teve a maior correlação no domínio d02 (5Km) chegando apenas a 0,77.

Tabela 2 – Correlações dos fluxos de calor sensível nos três domínios estudados.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	0,95	0,75	0,95	0,93
d02 (5 Km)	0,95	0,77	0,96	0,92
d03 (1 Km)	0,94	0,72	0,92	0,88

As Tabelas 3 e 4 apresentam as correlações entre os dados de fluxo de calor latente e sensível, respectivamente, observados e simulados pelo modelo WRF, nos três domínios (d01, d02 e d03) em vegetação de Caatinga degradada para os períodos estudados. Para o fluxo de calor latente observa-se os maiores valores de correlações para o período de

setembro, nos três domínios e no domínio d03 (1Km) para o período correlacionado no mês de junho.

Tabela 3 – Correlações dos fluxos de calor latente nos três domínios estudados.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	0,69	0,71	0,84	0,58
d02 (5 Km)	0,70	0,73	0,86	0,60
d03 (1 Km)	0,68	0,81	0,83	0,74

Observa-se que para o fluxo de calor sensível, a exceção do período estudado no mês de junho, todos os meses apresentaram alto grau de correlação com valores superiores a 0,90.

Tabela 4 – Correlações dos fluxos de calor sensível nos três domínios estudados.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	0,93	0,71	0,92	0,89
d02 (5 Km)	0,93	0,74	0,94	0,90
d03 (1 Km)	0,92	0,75	0,92	0,91

Os gráficos para a obtenção dos coeficientes de correlação estão mostrados no Anexo 1.

Os Erros sistemáticos (VIÉS) estão apresentados nas Tabelas 5 e 6. A Tabela 5 mostra os VIÉS do fluxo de calor latente, nos três domínios (d01, d02 e d03) em vegetação de Caatinga preservada. Observa-se, no entanto, que os melhores resultados acontecem para 21 a 29 de junho de 2014, período no qual foram apresentadas, também, valores altos de correlações, principalmente, para os domínios d02 e d03.

Tabela 5 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga preservada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	56,1	30,7	94,1	65,7
d02 (5 Km)	57,2	5,4	53,4	66,1
d03 (1 Km)	57,2	36,2	92,9	75,2

A Tabela 6 mostra VIÉS do fluxo de calor sensível, nos três domínios (d01, d02 e d03) em vegetação de Caatinga preservada para os meses em estudo. Verifica-se que os melhores resultados são observados para o domínio d03 para os períodos dos meses de junho, setembro e dezembro, com valores chegando a -5,5, -6,8 e -12,3, respectivamente.

Destaca-se, também, o período estudado de setembro, o domínio d01, com valor de 14,0. Apesar de erros sistemáticos baixos, não teve significância direta com relação as correlações, em que, o menor erro sistemático (-5,5) observado no domínio d03 no mês de junho, correspondeu a uma correlação de 0,72, enquanto que, em alguns erros sistemáticos maiores foram observados altos valores de correlações.

Tabela 6 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga preservada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	-33,8	27,3	14,0	54,0
d02 (5 Km)	33,0	58,2	58,8	53,6
d03 (1 Km)	32,9	-5,5	-6,8	-12,3

Para o ambiente de vegetação com Caatinga degradada, os Erros Sistemáticos dos fluxos de calor latente e calor sensível estão representados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente, para os três domínios (d01, d02 e d03) dos valores observados versus simulados pelo modelo WRF. Para o fluxo de calor latente, verifica-se que os melhores valores, ou seja, menores erros sistemáticos, foram observados para o período estudado no mês de junho, destacando-se, no entanto, o domínio d02 com erro de apenas 6,8.

Tabela 7 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga degradada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	57,1	30,8	91,8	47,4
d02 (5 Km)	54,4	6,8	48,7	44,8
d03 (1 Km)	89,2	30,2	90,6	73,7

Os menores erros sistemáticos, quando comparados com os valores nas Tabelas 5, 6 e 7, foram observados para o fluxo de calor sensível em ambiente de vegetação de Caatinga degradada, Tabela 8. Destaque para os valores encontrados para o domínio d03 nos períodos estudados em junho, setembro e dezembro, principalmente, o mês de junho com erro praticamente zero.

Tabela 8 – Erro Sistemático (VIÉS) em ambiente de Caatinga degradada, nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	21,2	21,8	-22,2	14,0
d02 (5 Km)	23,9	55,1	24,9	17,2
d03 (1 Km)	-34,6	-0,01	-7,2	-11,2

As Raízes dos Erros Médios Quadráticos (RMSE – sigla do inglês Root Mean Square Error) estão apresentados nas Tabelas 9, 10, 11 e 12. A Tabela 9 mostra os RMSE do fluxo de calor latente, nos três domínios (d01, d02 e d03) em vegetação de Caatinga preservada para os meses em estudo.

Tabela 9 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga preservada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	89,2	74,3	151,1	103,3
d02 (5 Km)	90,2	39,2	87,8	103,7
d03 (1 Km)	90,2	91,5	159,4	129,3

A Tabela 10 mostra os RMSE do fluxo de calor sensível, nos três domínios (d01, d02 e d03) em vegetação de Caatinga preservada para os meses em estudo.

Tabela 10 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga preservada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	72,2	67,8	40,3	101,9
d02 (5 Km)	72,7	114,7	105,3	101,4
d03 (1 Km)	72,5	46,4	40,0	50,1

Para o ambiente de vegetação com Caatinga degradada, os Erros Médios Absolutos dos fluxos de calor latente e calor sensível estão representados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente, para os três domínios (d01, d02 e d03) dos valores observados versus simulados pelo modelo WRF.

Tabela 11 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga degradada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor latente.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	95,6	76,8	148,9	90,0
d02 (5 Km)	91,5	40,3	82,1	86,6
d03 (1 Km)	159,7	82,1	154,0	128,7

Tabela 12 – Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em ambiente de Caatinga degradada nos três domínios estudados, para o fluxo de calor sensível.

Domínios	23 a 31/03/2014	21 a 29/06/2014	22 a 30/09/2014	23 a 31/12/2014
d01 (15 Km)	80,7	69,0	51,0	83,0
d02 (5 Km)	83,6	117,7	76,7	84,6
d03 (1 Km)	71,2	42,0	39,1	44,7

8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

1. O fluxo de calor latente atinge valores máximos no mês mais chuvoso da região, mês de junho, e mínimos nos períodos mais secos, nos meses de setembro e principalmente dezembro.
2. O fluxo de calor sensível apresenta comportamento contrário ao do calor latente, alcançando valores máximos nos meses de estiagem e mínimos no período mais chuvoso.
3. Nota-se que os valores do fluxo de calor latente foram maiores que os de fluxo de calor sensível em junho, período mais úmido na região em estudo. Esses resultados assemelham-se com os encontrados por Rodrigues et al. (2014) em estudo realizado no Bioma Cerrado, no qual, para o período de seca há predominância do fluxo de calor sensível.
4. Apesar do mês de junho ter sido com precipitações abaixo da média, esse é um mês úmido e as evapotranspirações apresentam valores elevados que explica os valores elevados dos fluxos de calor latente durante o dia, se comparado aos outros meses;
5. No mês de dezembro, um dos meses mais secos na região de estudo, tanto em vegetação de Caatinga preservada como degradada os valores de fluxo de calor latente foram muito inferiores aos de fluxo de calor sensível, pois a maior parte da energia disponível foi utilizada para o aquecimento do ar;
6. Com o aumento da resolução do modelo, os valores simulados se comparados ao observados tiveram uma melhora nos períodos de estudo dos meses de março e junho de 2014;
7. O fluxo de calor latente, no geral, simula bem a tendência mas os valores determinísticos mostram diferenças significativas;
8. O fluxo de calor sensível simula satisfatoriamente tanto a tendência como os valores determinísticos quando comparados aos dados observados;
9. De uma forma geral, apesar dos erros determinísticos, as parametrizações físicas usadas no modelo WRF são satisfatórias para região estudada.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTHES, R. A. et al. The evolution of the mesoscale environment of severe local storms: Preliminary modelling results. *Monthly Weather Review*, v. 110, p. 1187-1213, 1982.
- ARAÚJO, A. C.; DOLMAN, A. J.; WATERLOO, M. J.; GASH, J. H. L.; KUIJT, B.; ZANCHI, F. B.; LANGE, J. M. E.; STOEVELAAR, R.; MANZI, A. O.; NOBRE, A. D.; LOOTENS, R. N.; BACKER, J. The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.150, p.226-237, 2010.
- ARAÚJO FILHO, J.A.; SOUSA, F.B.; CARVALHO, F.C. Pastagens no semi-árido: pesquisa para o desenvolvimento sustentável. In: SIMPÓSIO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSISTEMAS BRASILEIROS: pesquisa para o desenvolvimento sustentável, 1995, Brasília. Anais... Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1995. p.63-75.
- BAKKE, O. A.; PEREIRA FILHO, J. M.; BAKKE, I. A.; CORDÃO, M. A. **Produção e utilização da forragem de espécies lenhosas da caatinga.** In: GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga.** Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010, p.160-179.
- BALDOCCHI, D. D. et al. Fluxnet, a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, p. 2415–2434, 2001.
- BALDOCCHI, D. Assessing the eddy-covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v.9, n.4, p.479–492, 2003.
- BALDOCCHI, D. D.; VOGEL, C. A.; HALL, B. Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy. *Journal of Geophysical Research*, v.102, n.D24, p.28951-28951, 1997.
- BALDOCCHI, D. D.; XU, L.; KIANG, N. How plant functional-type, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy balance of an oak-grass savanna and a annual grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.123, p.13-39, 2004.

- BORGE, R.; ALEXANDROV, V.; JOSE´ DEL VAS, J.; LUMBRERAS, J.; RODRI´GUEZ, E. A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Research*. V. 42, p. 8560–8574, mai-2008.
- Bromwich, D. H., L. Bai, and G. G. Bjarnason, 2005: High-Resolution Regional Climate Simulations over Iceland Using Polar MM5. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 3527–3547.
- CABRAL, O. M. R.; GASH, J. H. C.; ROCHA, H. R.; MARSDEN, C.; LIGO, M. A. V.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D.; GOMES, E. Fluxes of CO₂ above plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.151, p.49-59, 2011.
- FISCHER, M. L.; BILLESBACH, D. V.; BERRY, J. A.; RILEY, W. J.; TORN, M. S. Spatiotemporal variations in growing season exchange of CO₂, H₂O, and sensible heat in agricultural fields of the Southern Great Plains. *Earth Interactions*, v.11, v.17, p.1-21, 2007.
- GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R. A description of the fifth Generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5). 1994.
- HAO, Y.; WANG, Y.; HUANG, X.; CUI, X.; ZHOU, X.; WANG, S.; NIU, H.; JIANG, G. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China, *Agricultural and Forest Meteorology*, v.146, p.57–69, 2007.
- HILLER, R.; ZEEMAN, M. J.; EUGSTER, W.; Eddy-covariance flux measurements in the complex terrain of an alpine Valley in Switzerland. *Boundary-Layer Meteorology*, v.127, p.449-467, 2008.
- HOLZMAN, B.A., 2008. *Tropical Forest Biomes*. Greenwood Press, Westport.
- IPCC, Summary for Policymakers. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>.
- JONES, M. S.; COLLE, B. A.; TONGUE, J. S. Evaluation of a mesoscale short-range ensemble forecast system over northeast United States. *Weather and Forecasting*. v. 22, p. 36-55, fev-2007.

- LARA-FANEGO, V.; RUIZ-ARIAS, J. A.; POZO-VÁSQUEZ, D.; SANTOS-ALAMILLOS, F. J.; TOVAR-PESCADOR, J. Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (Southern Spain). *Solar Energy*, v.86, 2012, p. 2200-2217.
- LEAL, I. R.; BIEBER, A. G. D.; TABARELLI, M.; ANDERSON, A. N. Biodiversity surrogacy: indicator taxa as predictors of total species richness in Brazilian Atlantic forest and Caatinga. ***Biodiversity and Conservation***. V.19, p.3347-3360, 2010.
- LEAL, I. R.; SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; LACHER JR., T. E. Changing the course of biodiversity conservation in the caatinga of Northeastern Brazil. ***Conservation Biology***, v.19, n.3, p.701-706, 2005.
- MALHI, Y.; ARAGÃO, L. O. C.; METCALFE, D. B.; PAIVA, R.; QUESADA, C. A.; ALMEIDA, S.; ANDERSON, L.; BRANDO, P.; CHAMBERS, J. Q.; COSTA, A. C. L.; HUTYRA, L. R.; OLIVEIRA, P.; PATIÑO, S.; PYLE, E.; ROBERTSON, A.; TEIXEIRA, L. M. Comprehensive assesment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forest. *Global Change Biology*, v.15, p.1255-1274, 2009.
- MCCUMBER, M.C.; PIELKE, R.A. Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model: 1. Soil layer. *Journal of Geophysical Research*, v. 86, n. C10, p. 9929-9938, 1981.
- MELO, M. L.D. Efeito da vegetação em simulações numéricas com o modelo RAMS. 2003. 108f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003.
- MEIR, P.; METCALFE, D. B.; COSTA, A. C. L.; FISHER, R. A. The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Science*, v.363, p.1849-1855, 2008.
- METCALFE, D. B.; MEIR, P.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LOBO-DO-VALE, R.; GALBRAITH, D.; FISHER, R. A.; CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; COSTA, A. C. L.; ALMEIDA, S. S.; BRAGA, A. P.; GONÇALVES, P. H. L.; ATHAYDES, J.; COSTA, M.; PORTELA, T. T. B.; OLIVEIRA, A. A. R.; MALHI, Y.; WILLIAMS, M. Shift in plant respiration and carbon use efficiency at a large-scale drought experimental in the eastern Amazon. *New Phytologist*, v.187, p.608-621, 2010.

- MILDENBERGER, K.; BEIDERWIEDEN, E.; HSIA, Y-J.; KLEMM, O. CO₂ and water vapor fluxes above a subtropical mountain cloud forest – The effect of light conditions and fog. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1730-1736, 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.378-386, 2006.
- PAIVA, S. C.; Cavalcanti, E. P. (2011). **Fluxos de Calor Latente e Sensível à Superfície em Caatinga: Estudo Observacional e de Simulação com o BRAMS no Início do Período de Secas**. *Revista Brasileira de Geografia*. V. 04. p. 677-691.
- PENNINGTON, R. T.; PRADO, D. E.; PENDRY, C. A. Neotropical seasonally dry forest and Quaternary vegetation changes. **Journal of Biogeography**, v.27, p.261-273, 2000.
- Rodrigues, T. R.; Vourlitis, G. L.; Lobo, F. D. A.; Oliveira, R. G.; Nogueira, J. S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south central Mato Grosso, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, v. 119, n. 1, p. 1-13, 2014.
- ROTEMBERG, E.; YAKIR, D. **Contribution of Semi-Arid forests to the climate system**. *Science*. V.327, p.451-454, 2010.
- SÁNCHEZ, J. M.; CASELLES, V.; RUBIO, E. M. Analyses of the energy balance closure over a FLUXNET boreal forest in Finland. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.14, p.1487-1497, 2010.
- SANTOS, E. P.; JUNIOR V. G. C.; ARAÚJO, A. L.; BRITO, J. I. B. Desempenho dos modelos BRAMS e WRF na estimativa dos fluxos de calor sensível e latente sobre o nordeste brasileiro. In. IX Simpósio Internacional de Climatologia, 2011, João Pessoa-Brasil.
- SILVA, F. M. et al. Um estudo experimental do balanço de energia e dos fluxos de calor

acima da vegetação de caatinga. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu, Anais..., Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. p. 2549-2555.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; SOUZA, L. S. B.; BRANDÃO, E. O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.139-147, 2011.

SOTTA, E. D.; VELDKAMP, E.; SXHWENDENMANN, L.; GUIMARÃES, B. R.; PAIXÃO, R. K.; RUIVO, M. L. P.; COSTA, A. C. L.; MEIR, P. Effects of na induced drought and soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil. *Global Change Biology*, v.13, p.2218-229, 2007.

TARGINO, A. C. e J. Soares, 2002: Modeling surface energy fluxes for Ipero ,SP, Brazil: an approach using numerical inversion, *Atmospheric Research* 63 (2002) 101–121.

VARGAS, R.; ALLEN, M. F.; ALLEN, E. B. Biomass and carbon accumulation inf a fire chronosequece of a s seasonally dry tropical forest. **Global Change Biology**, v.14, p.109-124, 2008.

VEENENDAAL, E. M.; KOLLE, O.; LLOYD, J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. *Global Change Biology*, [S.l.], v. 10, p. 318-328, 2004.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. S.; CASEIRO, F. T.; CAMPELO JR., J. H. Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest (cerradão). *Functional Ecology*, v.15, p.388-395, 2001.

WEDAM, G. B.; McMURDIE, L. A.; MASS, C. F. Comparison of Model Forecast Skill of Sea Level Pressure along the East and West Coasts of the United States. *Weather and Forecasting*, v. 24, p. 843-854, jun-2009.

XINMEI, H.; LYONS, T. J. The simulation of surface heat fluxes in a land surface-atmosphere model. **Journal of Applied Meteorology**, [S.l.], v. 34, p. 1099-1111, 1995.

- ZHAO, Y. W.; CHOI, Y.; ZENG, T. Summertime impact of convective transport and lightning NO_x production over North America: modeling dependence on meteorological simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 9, p. 4315-4327, jul-2009.
- ALVES, J.M.B.; CAMPOS, J.N.B.; NASCIMENTO, L.S.V. Sensibilidade intrasazonal de um downscaling dinâmico de precipitação (1971-2000): Uma análise na bacia hidrográfica do Açude Castanhão-CE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 1, p. 73-87, 2008.
- CAVALCANTI, I.F.A.; MARENGO, J.A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C.A.; TROSNIKOV, I.; et al. Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. *Journal of Climate*, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.
- GIORGI, F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, v. 3, n. 9, p. 941-963, 1990.
- KINTER III, J.L.; PAOLINO, D.; STRAUS, D.; KIRTMAN, B.; MIN, D. Seasonal prediction with CCSM: Impact of atmosphere and land surface initialization, in: *Science and Technology Infusion Climate Bulletin - Test Bed Joint Seminar Series*, US National Oceanic and Atmospheric Administration Climate, NCEP, Camp Springs, Maryland, 4 May 2009.
- LAPRISE, R.; KORNIC, D.; RAPAIC, M.; SEPAROVIC, L.; LEDUC, M.; et al. Considerations of domain size and large-scale driving for nested regional climate models: Impact on internal variability and ability at developing small-scale details, in: *Climate Change*, edited by: Berger, A., Mesinger, F., and Sijacki, D., Springer, Vienna, doi: 10.1007/978-3-7091-0973-1_14, p. 181-199, 2012.
- LEIVAS, J.F.; RIBEIRO, G.G.; SARAIVA, I.; SANTO, J.S.E.; SOUZA, M.B.; et al. Avaliação dos prognósticos de precipitação simulada pelo modelo BRAMS na Amazônia Ocidental na estação chuvosa. *Acta Amazonica*, v. 41, n. 3, p. 347-354, 2011.
- LEUNG, L.R.; KUO, Y.H.; TRIBBIA, J. Research needs and directions of regional climate modeling using WRF and CCSM. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 87, n. 12, p. 1747-1751, 2006.
- LIU, Y.; GIORGI, F.; WASHINGTON, W.M. Simulation of summer monsoon climate over east Asia with an NCAR regional climate model. *Monthly Weather Review*, v. 122, n. 10, p. 2331-2348, 1994.

- MASS, C.F.; OVENS, D.; WESTRICK, K.; COLLE, B.A. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? The results of two years of real-time numerical weather prediction over the Pacific Northwest. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n. 3, p. 407- 430, 2002.
- MISRA, V.; DIRMEYER, P.A.; KIRTMAN, B.P. Dynamic downscaling of seasonal simulations over South America. *Journal of Climate*, v. 16, n. 1, p. 103-117, 2003.
- PESQUERO, J.F.; CHOU, S.C.; NOBRE, C.A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961- 1970 using the ETA model. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 99, p. 75-93, 2010.
- SALES, D.C.; COSTA, A.A.; SILVA, E.M.; JÚNIOR, F.C.V.; CAVALCANTE, A.M.B.; et al. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste Brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.
- SAMPAIO, G.; DIAS, P.L.S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. *Revista USP*, n. 103, p. 41- 54, 2014.
- SILVA, R.R.; DIAS, P.L.S.; MOREIRA, D.S.; SOUZA, E.B. Modelo OLAM (Ocean-Land-Atmosphere-Model): Descrição, aplicações, e perspectivas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 2, p. 144-157, 2009.
- SILVEIRA, C.S.; FILHO, F.A.S.; COSTA, A.A.; CABRAL, S.L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no Século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o Cenário RCP8.5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013.
- SNYDER, M.A.; SLOAN, L.C. Transient future climate over the western United States using a regional climate model. *Earth Interactions*, v. 9, n. 11, p. 1-21, 2005.
- SOUZA, E.P.; SILVA, E.M. Impacto da implementação de uma parametrização de convecção rasa em um modelo de mesoescala: Descrição e testes de sensibilidade do esquema. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 18, n. 1, p. 33-42, 2003.

10. ANEXOS

ANEXO 1

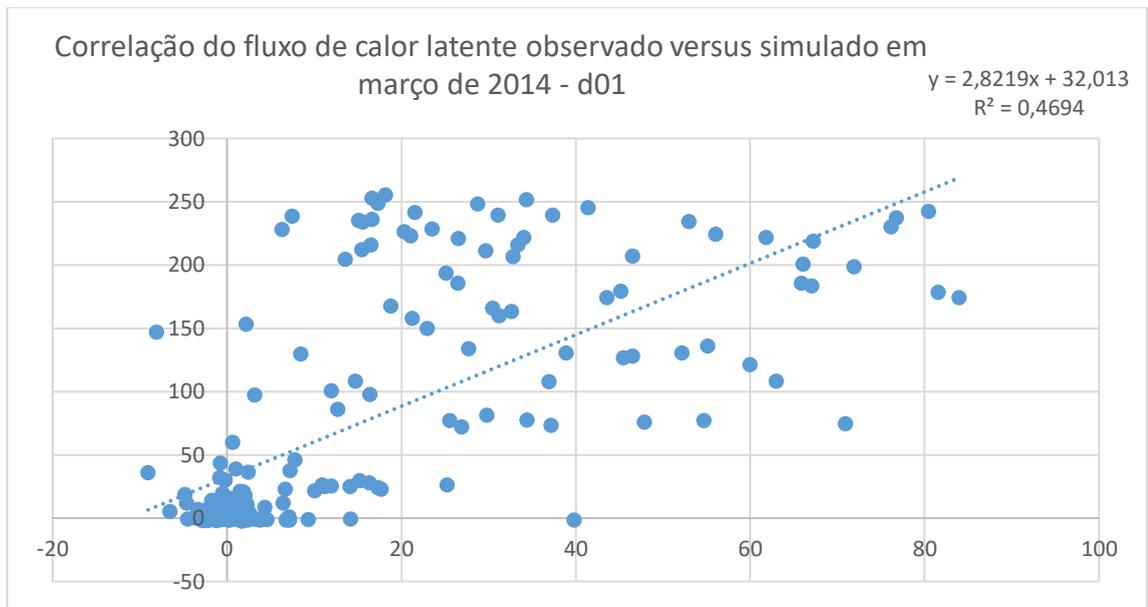


Figura 64 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

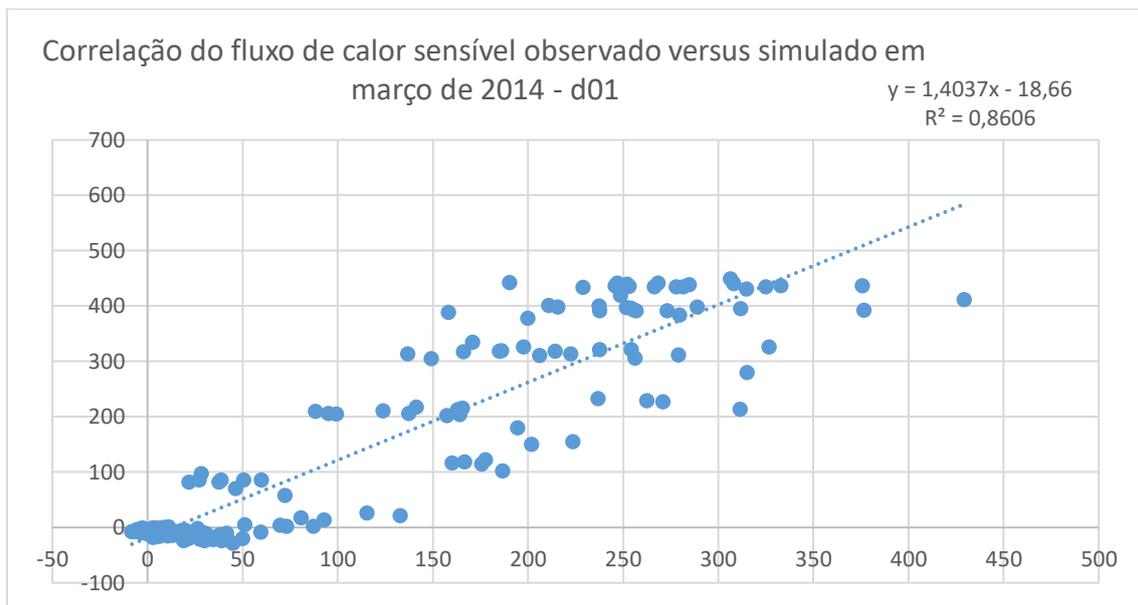


Figura 65 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

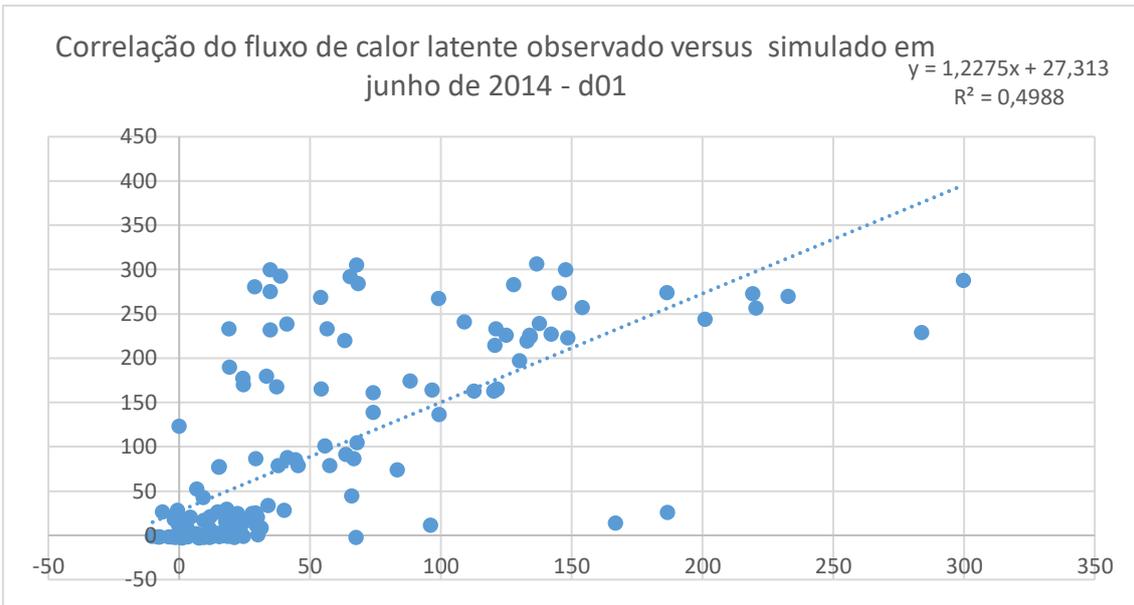


Figura 66 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

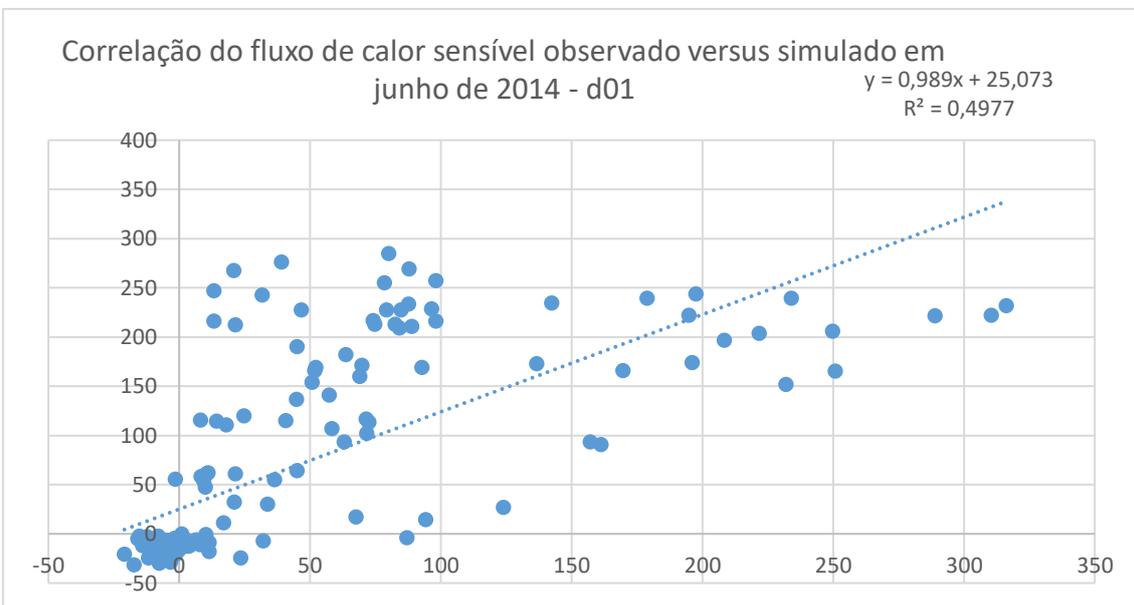


Figura 67 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

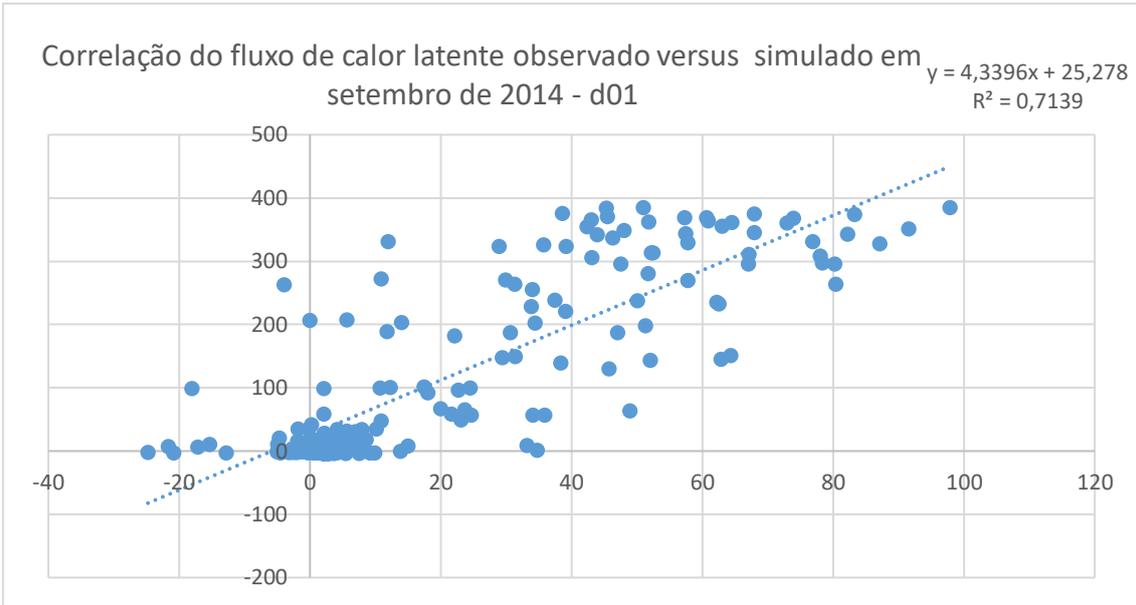


Figura 68 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

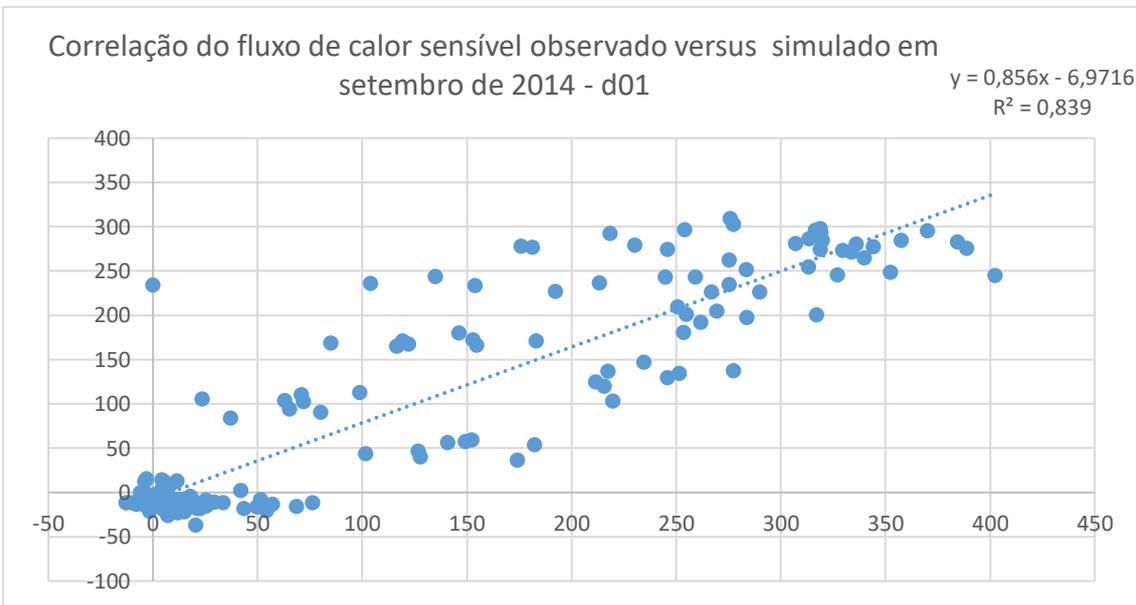


Figura 69 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

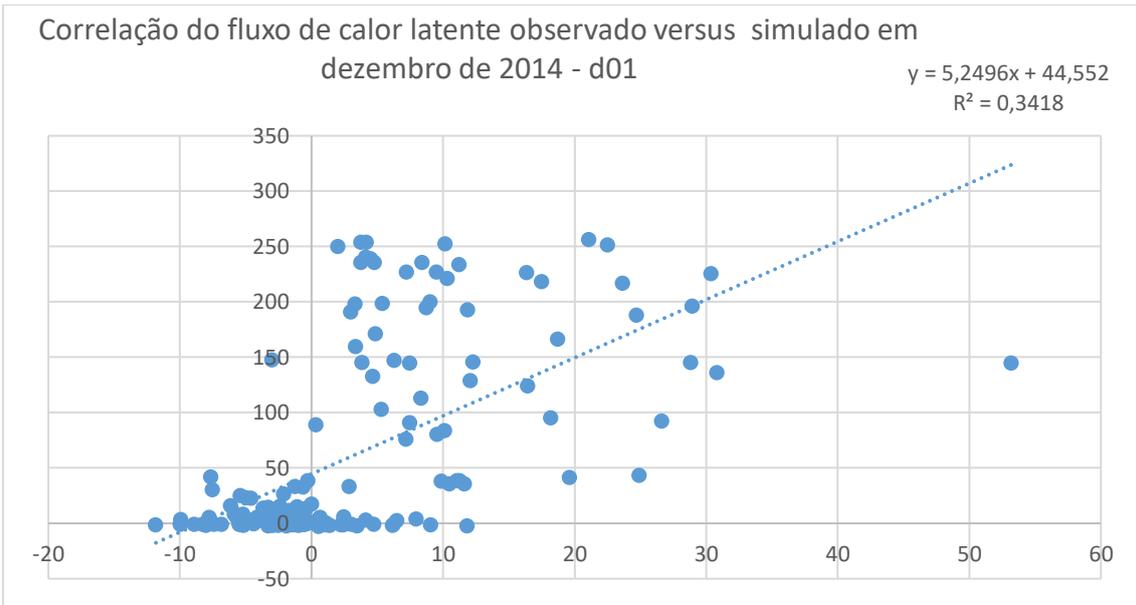


Figura 70 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

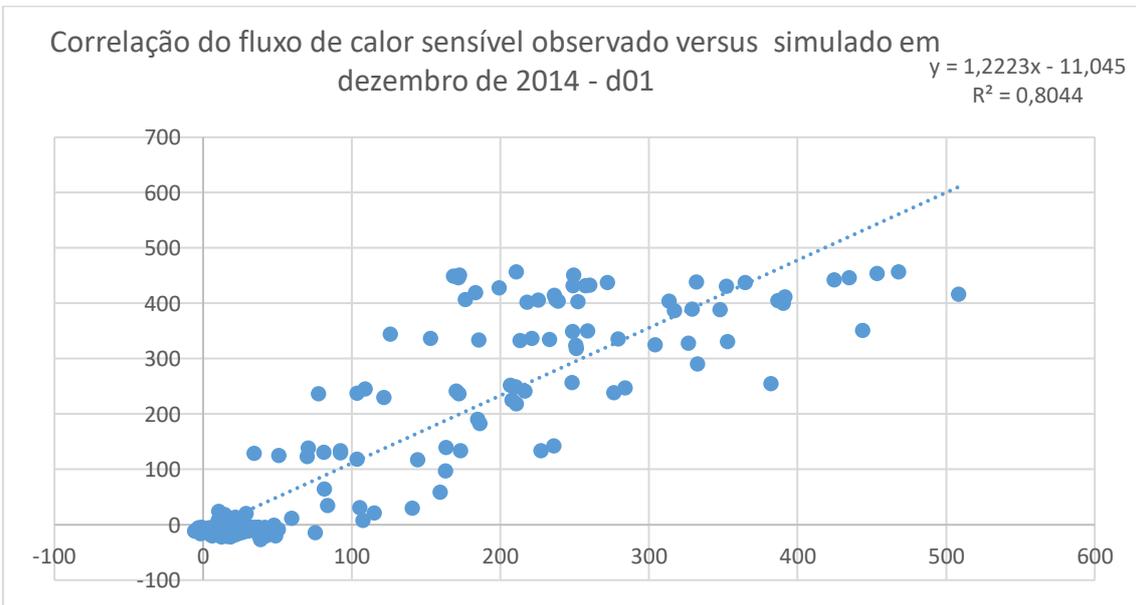


Figura 71 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d01 (15 Km).

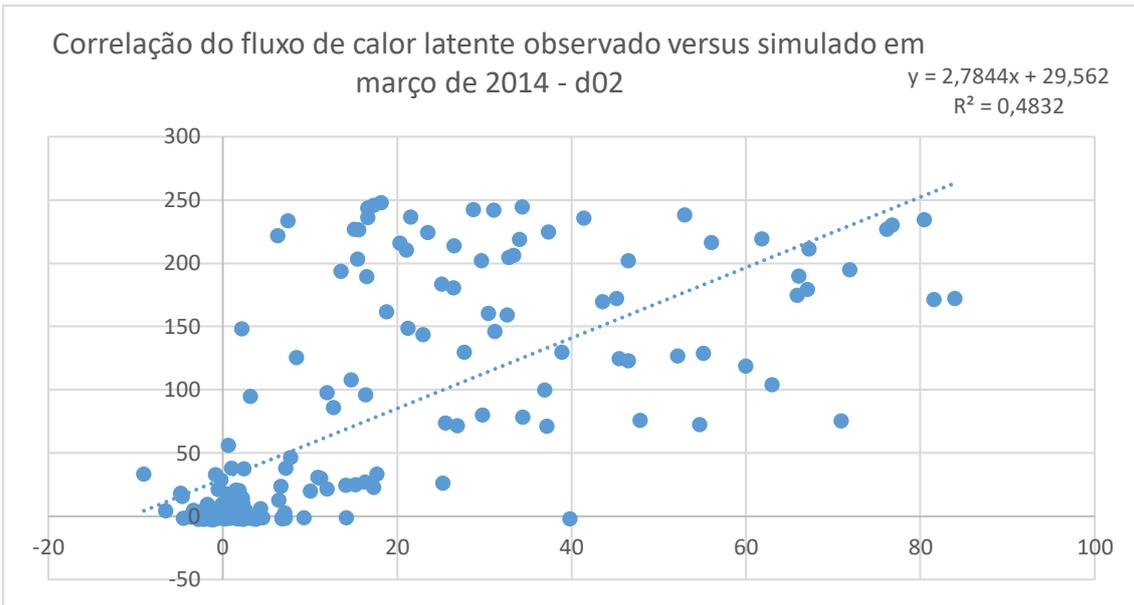


Figura 72 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

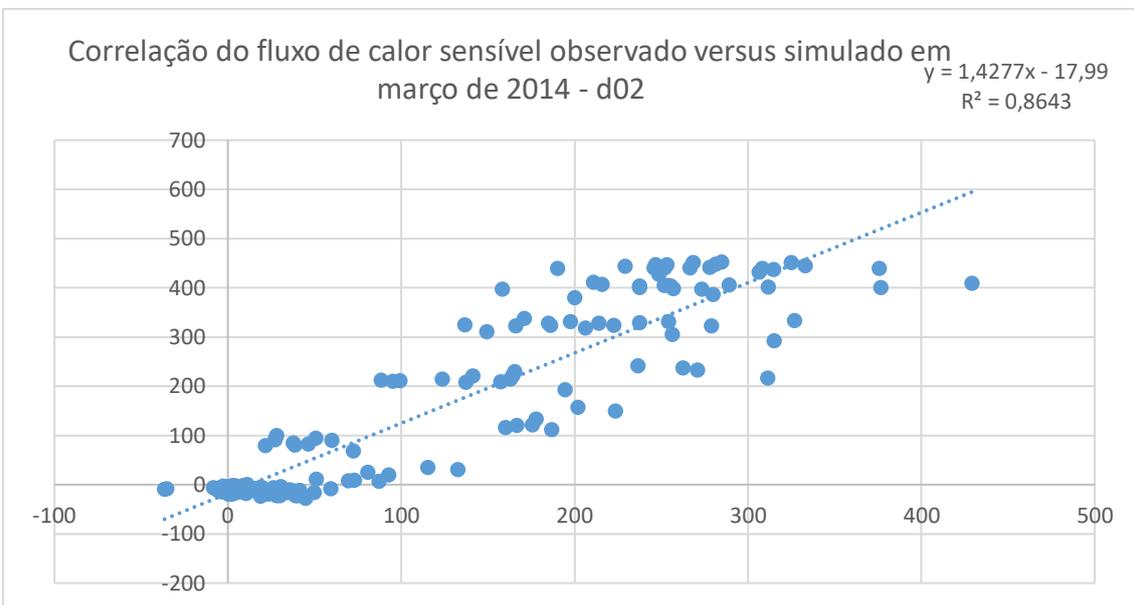


Figura 73 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

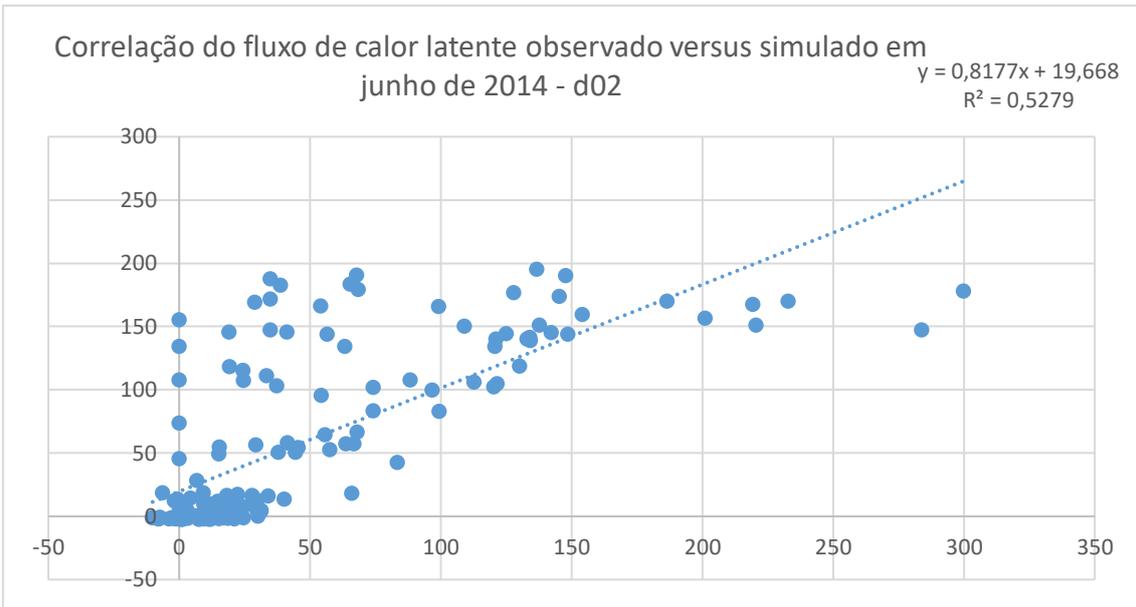


Figura 74 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

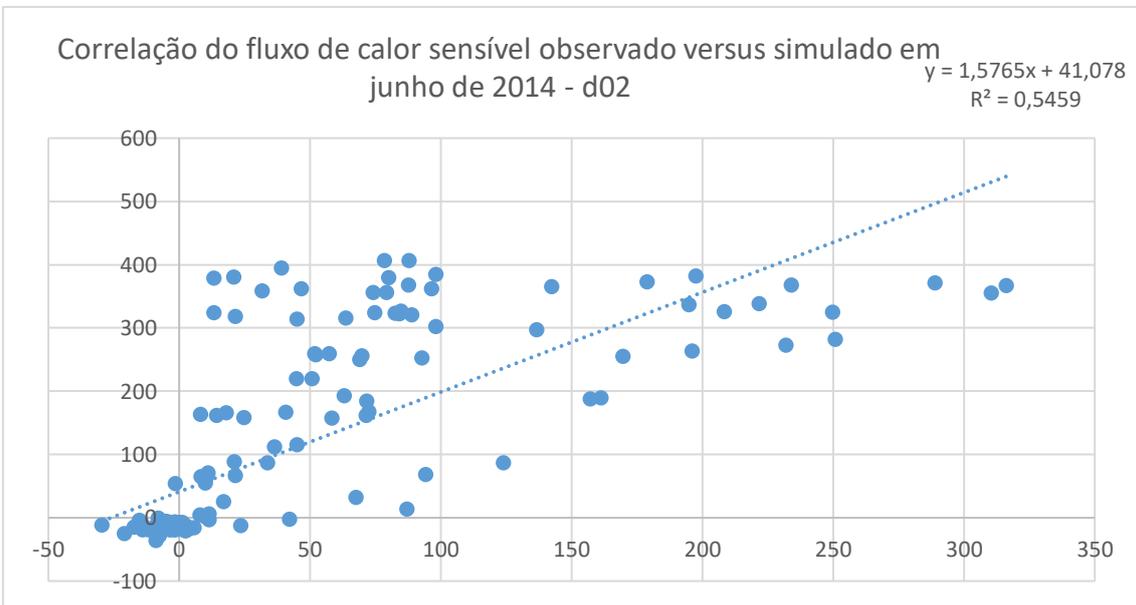


Figura 75 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

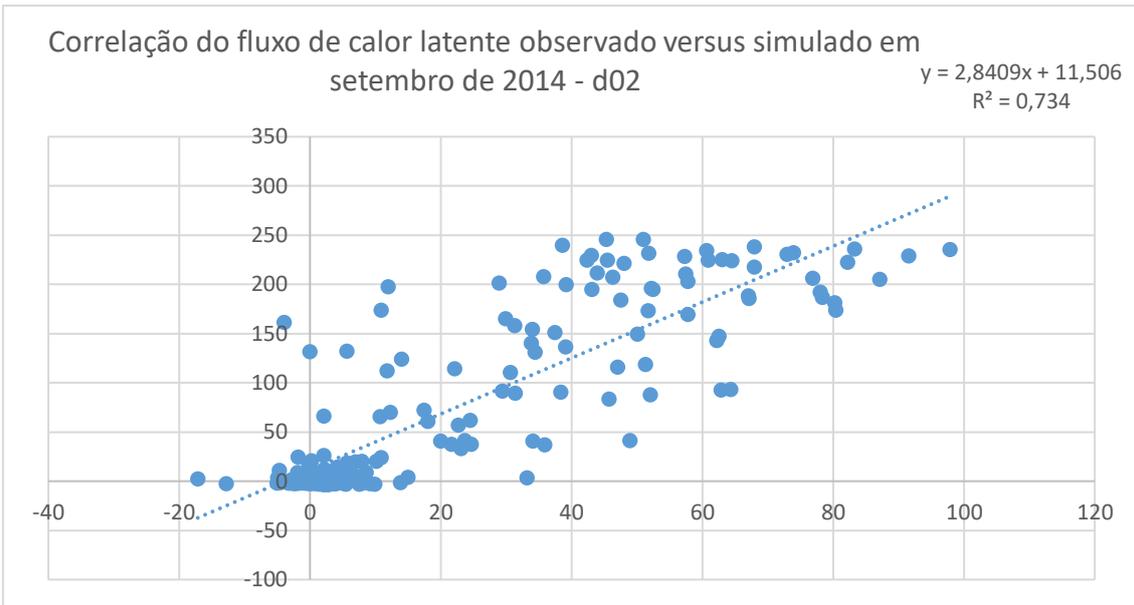


Figura 76 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

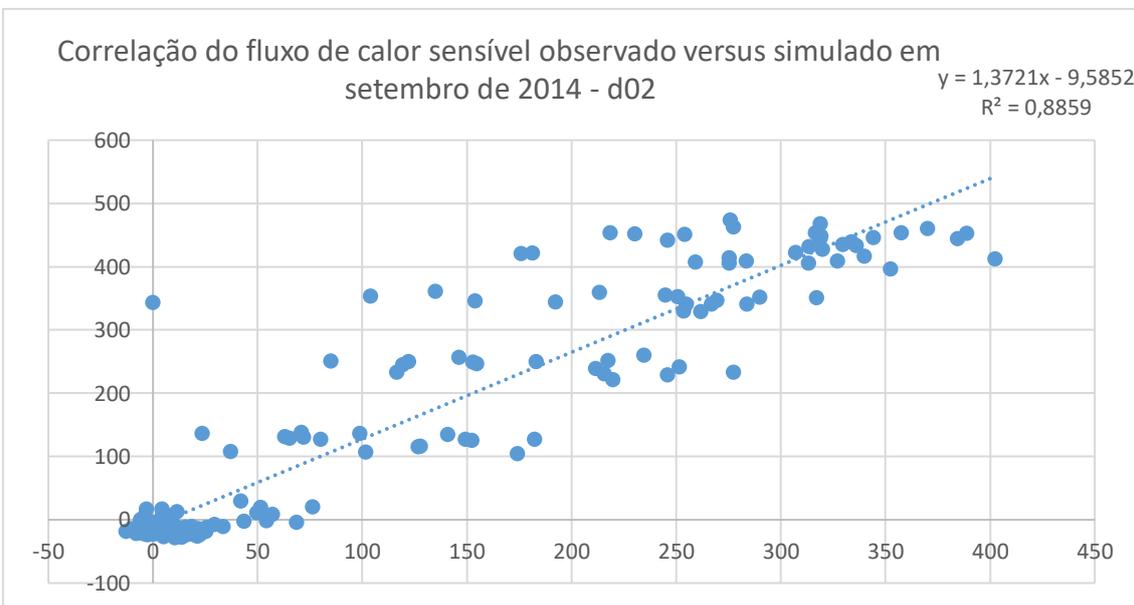


Figura 77 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

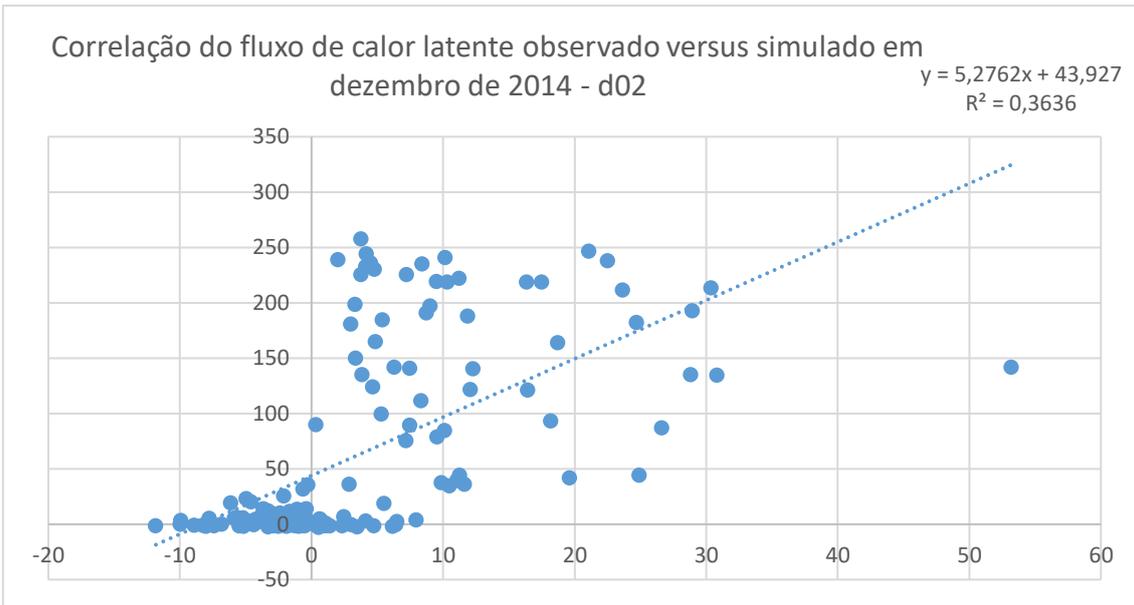


Figura 78 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

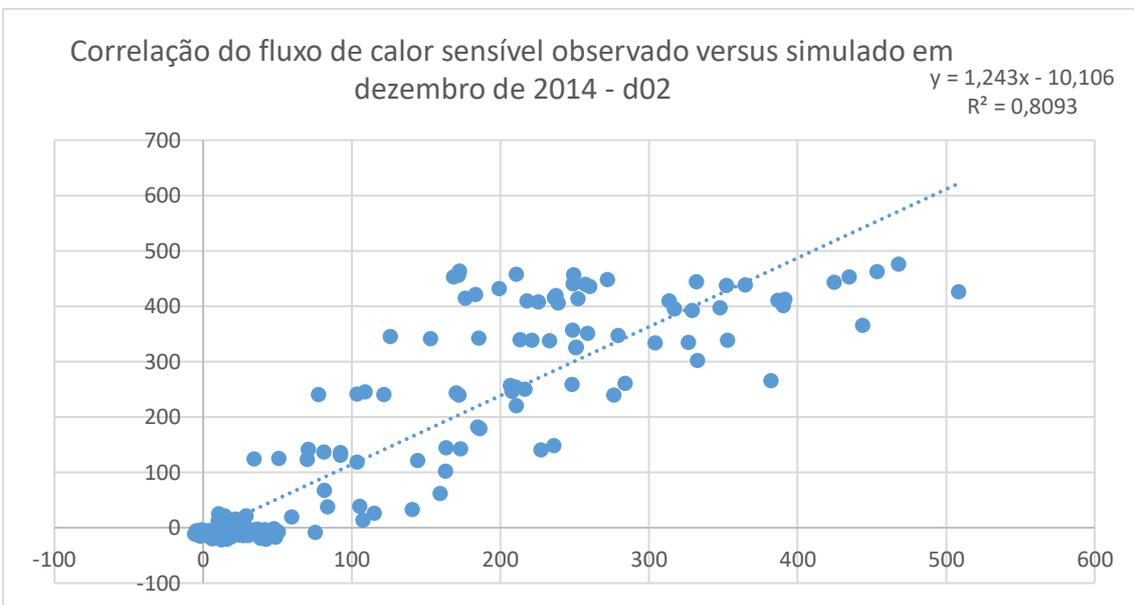


Figura 79 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d02 (5 Km).

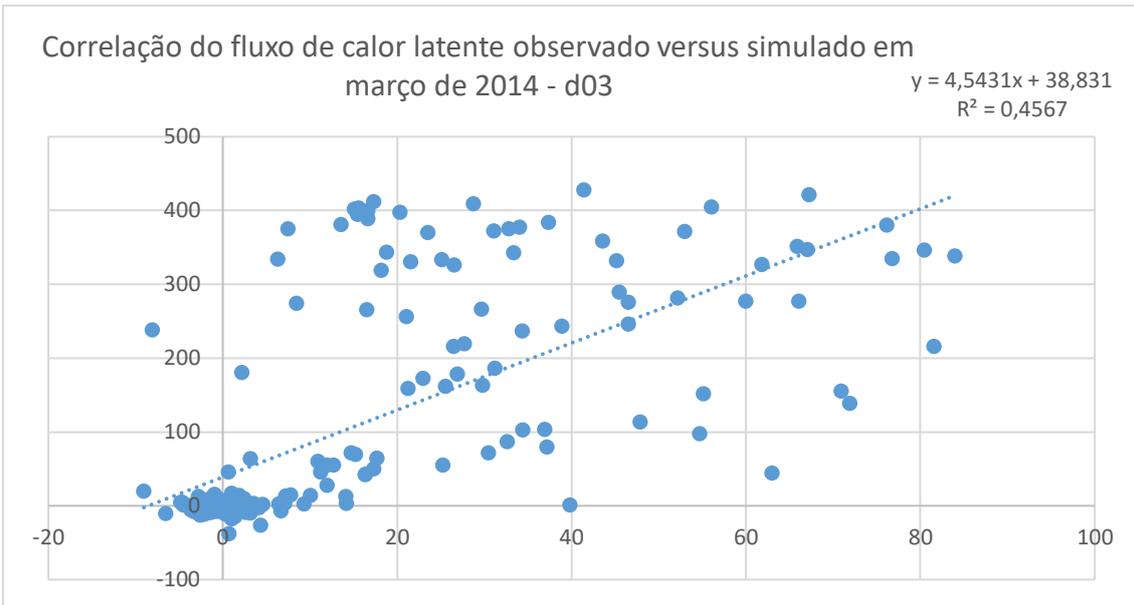


Figura 80 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d03 (1 Km).

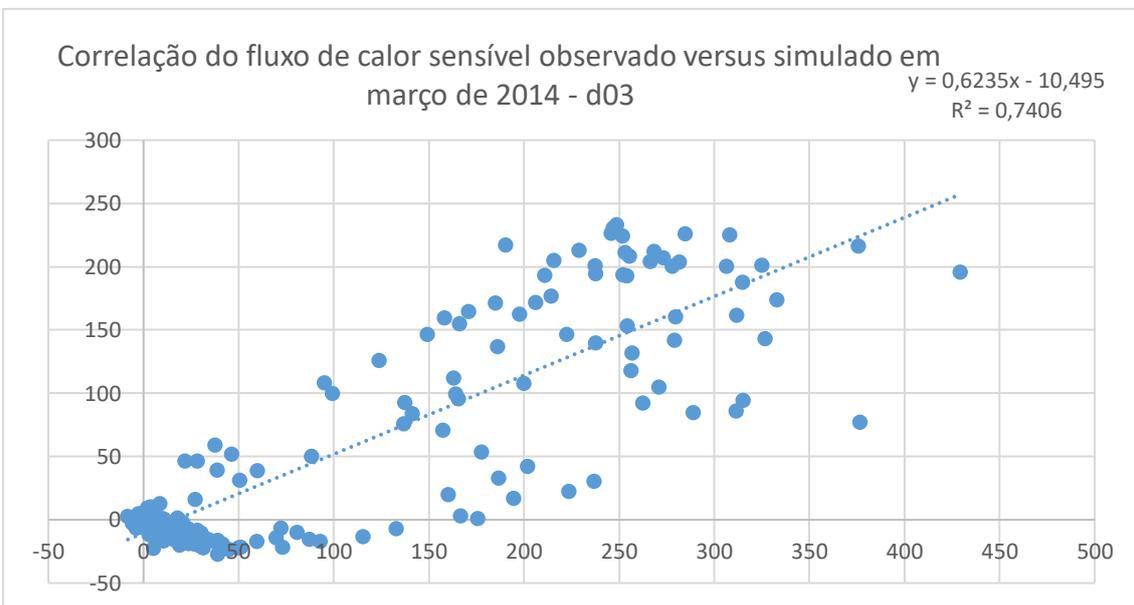


Figura 81 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de março de 2014 para o domínio d03 (1 Km).

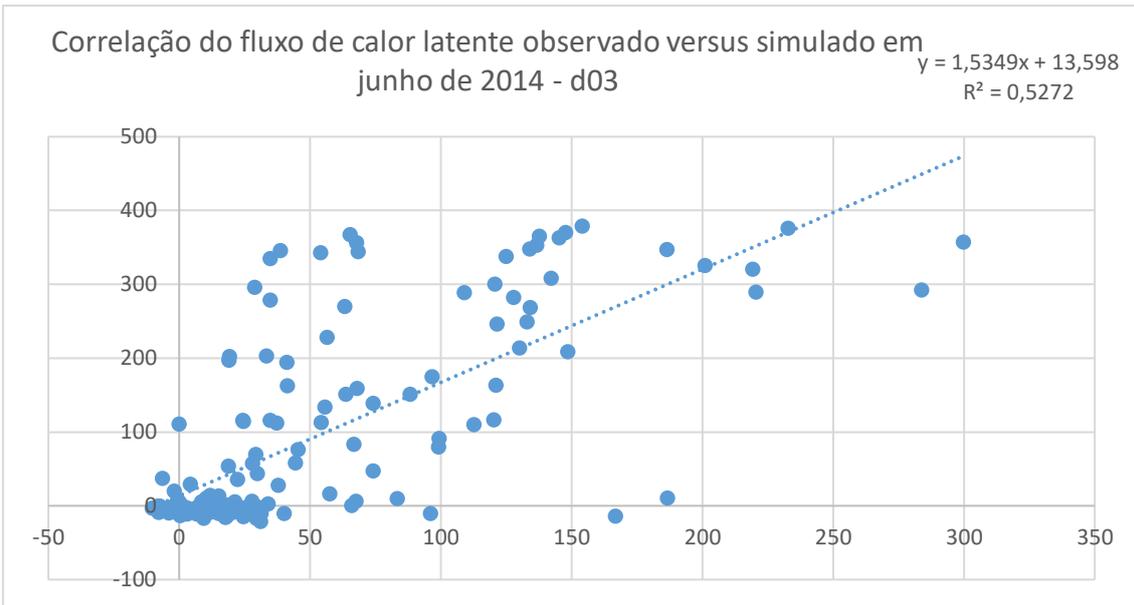


Figura 82 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d03 (1 Km).

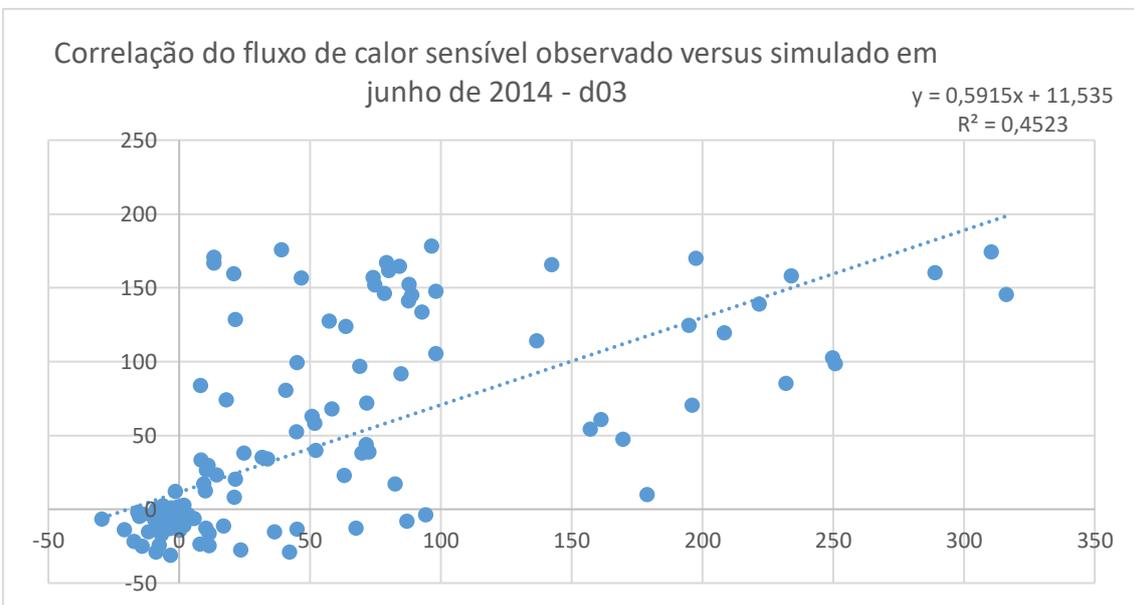


Figura 83 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 21 e 29 de junho de 2014 para o domínio d03 (1 Km).

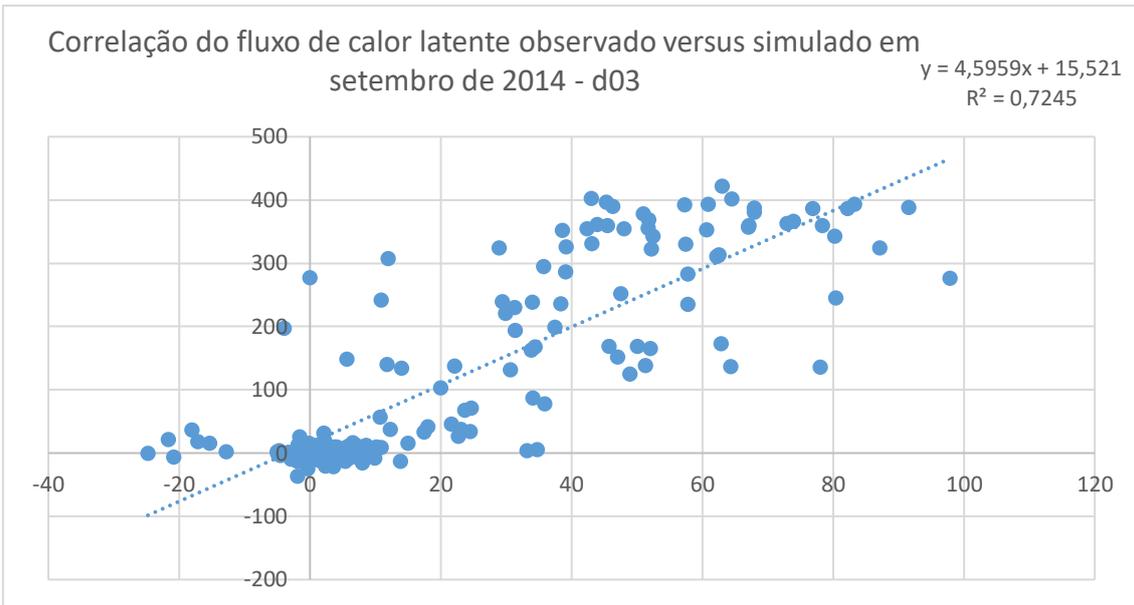


Figura 84 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km).

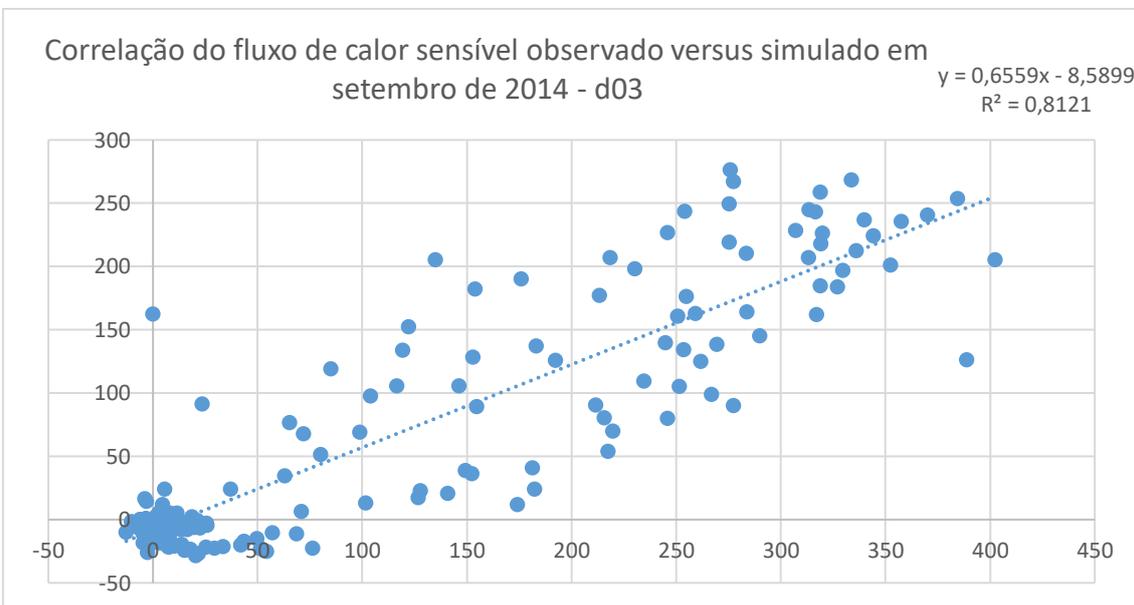


Figura 85 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 22 e 30 de setembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km).

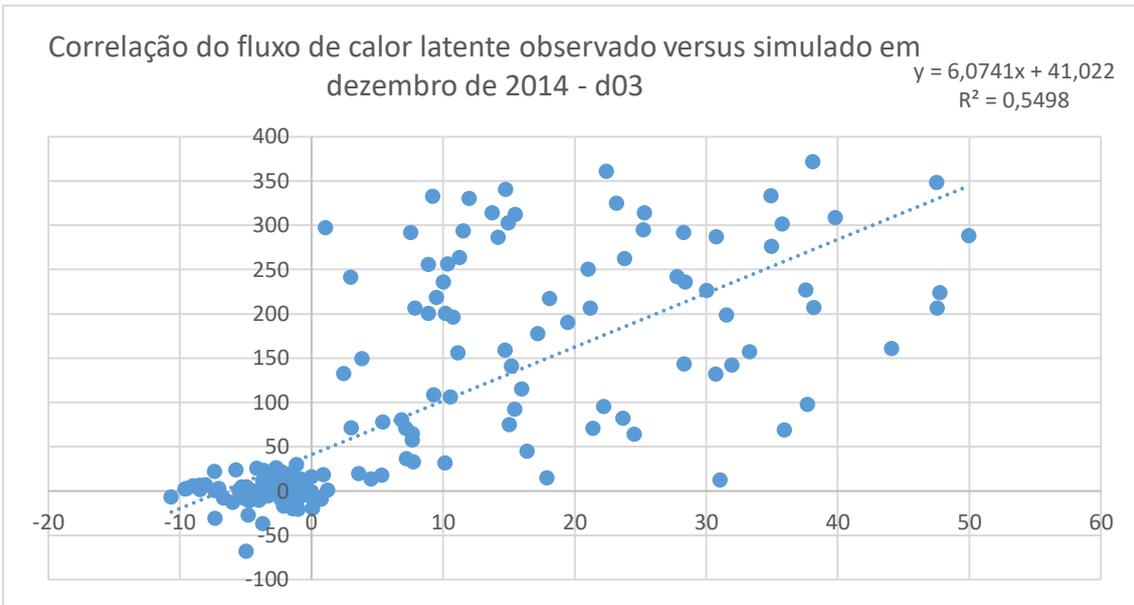


Figura 86 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor latente observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km).

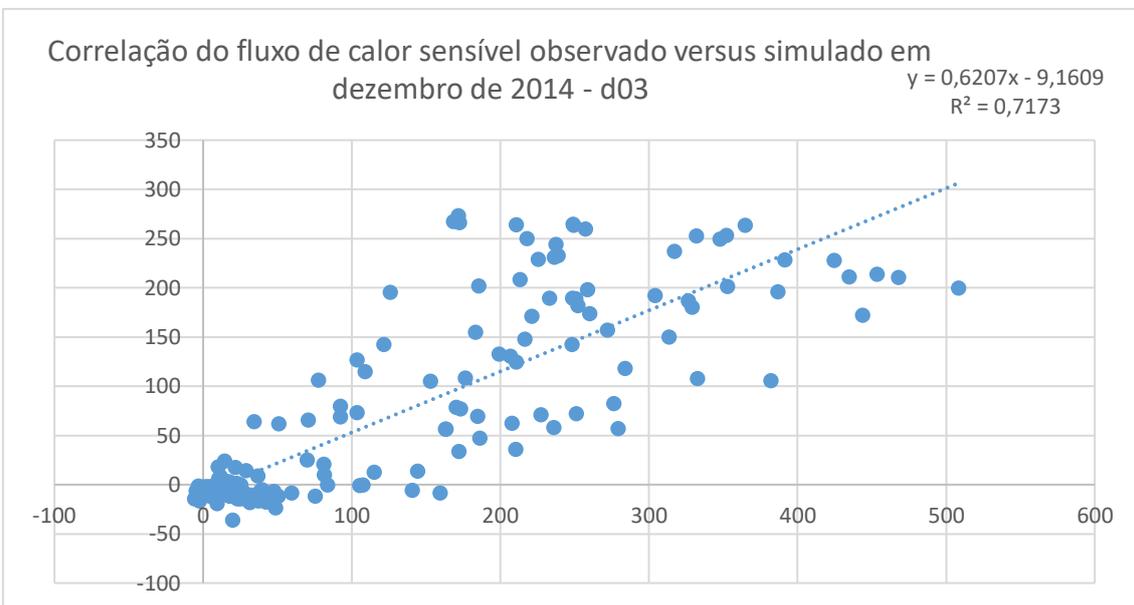


Figura 87 – Coeficiente de correlação do fluxo de calor sensível observado versus simulado entre 23 e 31 de dezembro de 2014 para o domínio d03 (1 Km).