



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO BAIXO TOCANTINS
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL**

MAILSON BORGES TELES

**LEVANTAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR DA ILHA DO
MARAJÓ UTILIZANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DE
PEQUENO PORTE**

Abaetetuba-PA

2014

MAILSON BORGES TELES

**LEVANTAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR DA ILHA DO
MARAJÓ UTILIZANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DE
PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, *Campus* Universitário do Baixo Tocantins, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Industrial, sob a orientação do Prof. M. Sc. Hallan Max Silva Souza.

Abaetetuba-PA

2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

T269l Teles, Mailson Borges.
LEVANTAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO
SOLAR DA ILHA DO MARAJÓ UTILIZANDO SISTEMA DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E DIMENSIONAMENTO DE
UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DE PEQUENO
PORTE / Mailson Borges Teles. — 2014.
109 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Hallan Max Silva Souza
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Abaetetuba, Curso de
Engenharia Industrial, Abaetetuba, 2014.

1. Mapas temáticos. 2. Ilha do Marajó. 3. Sistema
Fotovoltaico Isolado. 4. Energia Solar. 5. Sistema de
Informação Geográfica. I. Título.

CDD 620

MAILSON BORGES TELES

LEVANTAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR DA ILHA DO MARAJÓ UTILIZANDO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DE PEQUENO PORTE

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado e aprovado, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial pelo corpo docente da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Campus Universitário do Baixo Tocantins.

Abaetetuba, 28 de AGOSTO de 2014



Prof. M. Sc. Hallan Max Silva Souza

UFPA

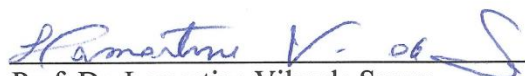
Orientador



Prof. M. Sc. Claudomiro F. O. Barbosa

UFPA

Examinador



Prof. Dr. Lamartine Vilar de Souza

UFPA

Examinador

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais Marinélio e Marinete.

Aos meus irmãos Mairlém, Mailza, Mauro, Mateus e Mael.

Aos meus tios Stanei, Graciete e Gilberto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me dá força e coragem para buscar meus objetivos.

Aos meus pais Marinélio e Marinete aos meus irmãos e a minha namorada Diane pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos meus tios Graciete e Gilberto por me acolherem em seu lar, pois através desta oportunidade pude concluir o ensino médio e ingressar na universidade.

Ao meu querido tio Stanei por tudo que fez e vem fazendo durante toda minha vida.

Ao meu orientador, professor Hallan Max Silva Souza, por seus ensinamentos e contribuição na realização deste trabalho.

Aos colegas do GEDAE pelo apoio e incentivo nesta caminhada.

Aos professores Claudomiro Barbosa e Lamartine Souza por disponibilizarem seu tempo para ler o trabalho e compor a banca examinadora.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro por meio de bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. -Ing. João Tavares Pinho, coordenador do projeto que derivou este trabalho.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização da minha graduação e para confecção deste trabalho.

*“O insucesso é apenas uma oportunidade
para recomeçar com mais inteligência”*

(Henry Ford)

RESUMO

Através deste trabalho foram elaborados os mapas temáticos, representando a irradiação solar direta, difusa e global para o arquipélago do Marajó, com o objetivo de mostrar a viabilidade da geração de energia elétrica através da fonte renovável solar e identificar quais áreas apresentam maior potencial, além de propor o dimensionamento básico de um sistema fotovoltaico isolado para uma residência típica da região.

Para tanto, foram abordados os conceitos de energia solar com o intuito de entender as principais características desta abundante fonte renovável, assim como, buscar conhecer de que forma a radiação solar poder ser transformada em energia elétrica por meio das células fotovoltaicas.

Para a obtenção dos mapas temáticos foi preciso buscar o entendimento e domínio dos sistemas de informação geográfica – SIGs. Ferramenta esta que se mostrou bastante útil em apresentar informações que auxiliam no processo de tomada de decisão.

Em seguida apresenta-se a proposta de um sistema fotovoltaico isolado de pequeno porte para o atendimento de uma residência localizada em uma região que, de acordo com os mapas solarimétricos, mostra um bom potencial de geração de energia solar para ser convertida em energia elétrica.

Os mapas produzidos no capítulo 3 mostram que a irradiação solar na ilha varia de 4,5 kWh/m²/dia chegando a alcançar 6,2 kWh/m²/dia. Por tanto, visualizou-se que a ilha do Marajó apresenta um bom potencial para a geração de energia elétrica através da fonte renovável solar.

Palavras chaves: Mapas temáticos, Ilha do Marajó, Sistema Fotovoltaico Isolado, Energia Solar, Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT

Through this work the thematic maps were drawn, representing the direct, diffuse and global solar irradiation for the Marajó archipelago, in order to show the feasibility of generating electricity through solar renewable source and identify which areas have the highest potential, as well propose the basic design of an isolated photovoltaic system for a typical residence in the region.

For this, the concepts of solar energy in order to understand the main features of this abundant renewable resource were discussed, as well as seek to know how solar radiation can be transformed into electrical energy by means of photovoltaic cells.

To obtain the thematic maps was necessary to seek the understanding and mastery of geographic information systems - GIS. The tool that has proved very useful in presenting information that assist in the decision making process.

Then we will introduce a proposed photovoltaic system isolated small for the care of a residence located in a region that, according to the solarimetric maps, shows good potential of solar energy to be converted into electrical energy.

The maps produced in chapter 3 show that the solar radiation on the island between $4.5 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ getting to reach $6.2 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$. Therefore, it is envisioned that the Marajó island has a good potential for the generation of electricity through renewable solar power.

Key words: Thematic Maps, Marajo Island, Isolated Photovoltaic System, Solar Energy, Geographic Information System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Estrutura do Sol.....	3
Figura 1.2 – Irradiância espectral extraterrestre.	5
Figura 1.3 – Movimento da terra em torno do sol.	5
Figura 1.4 – Declinação solar ao longo do ano.	6
Figura 1.5 – Curva da Declinação Solas δ	6
Figura 1.6 – Ilustração dos ângulos α e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal.	7
Figura 1.7 – Ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano ângulos β , γ , γ_s e θ	8
Figura 1.8 – Fluxo de potência global (em W/m^2).	9
Figura 1.9 – Heliógrafo Cambell-Stokes e cartas de registro.	12
Figura 1.10 – Actinógrafo bimetálico do tipo Robitzsch-Fuess.	12
Figura 1.11 – Piranômetro Fotovoltaico.	13
Figura 1.12 – Piranômetro do tipo Black & White Eppley 8-48.	14
Figura 1.13 – Piranômetro Campbell Scientific CMP11-L.	14
Figura 1.14 – Pireliômetro Campbell Scientific CHP1-L.	15
Figura 1.15 – Esquema de montagem de um piranômetro com banda de sombra,	15
Figura 1.16 – Efeito fotovoltaico na junção pn	17
Figura 1.17 – Silício monocristalino	18
Figura 1.18 – Silício policristalino	19
Figura 1.19 – Sistema fotovoltaico conectado à rede.	20
Figura 1.20 – Sistema fotovoltaico isolado.	21
Figura 1.21 – Módulos em série.	22
Figura 1.22 – Módulos em paralelo.....	23
Figura 1.23 – Módulos em série-paralelo.	24
Figura 2.1 – Mapa de Londres com óbitos por cólera identificados por pontos e poços de água representados por cruces.....	27
Figura 2.2 – Invasão Russa por Napoleão Bonaparte.....	27
Figura 2.3 – Componentes de um SIG.	30
Figura 2.4 – Forma esférica do planeta terra.	32
Figura 2.5 – Representação geográfica do geóide.....	33

Figura 2.6 – Superfície real da terra, geóide e elipsóide.	34
Figura 2.7 – Coordenadas geográficas.	35
Figura 2.8 – Interface do QGIS.	40
Figura 2.9 – Interface do gerenciador de complementos.....	41
Figura 2.10 - Passos para instalar um complemento.	42
Figura 2.11 - Processo de desinstalação de um complemento.	42
Figura 2.12 – Camada vetorial e <i>raster</i> carregadas no QGIS.....	43
Figura 3.1 – Arquipélago do Marajó.	44
Figura 3.2 – Distribuição do banco de dados.	45
Figura 3.3 – Configurações para carregar uma camada de texto delimitado.	46
Figura 3.4 – Especificação do SRC da camada.	47
Figura 3.5 – Especificações para adicionar uma camada vetorial.	47
Figura 3.6 – Área de trabalho do QGIS após o carregamento das camadas.....	48
Figura 3.7 – Alteração do estilo da camada Retângulo Abrangente.	48
Figura 3.8 – Alteração do estilo da camada Municípios Marajó.....	49
Figura 3.9 – Alteração do estilo da camada Massa Dagua Marajó.	49
Figura 3.10 – Alterações nos rótulos da camada Cidades_Marajó.	50
Figura 3.11 – Mapa base.	50
Figura 3.12 – Parâmetros do Plug-in Interpolação.	51
Figura 3.13 – Camada <i>Raster</i> antes da alteração no estilo.	52
Figura 3.14 – Configurações para colorir uma camada raster.....	52
Figura 3.15 – Irradiação global para o mês de Janeiro.....	53
Figura 3.16 – Janela do compositor de impressão.....	53
Figura 3.17 – Adicionar o mapa no compositor.	54
Figura 3.18 – Determinação da extensão do mapa.....	54
Figura 3.19 – Irradiação global para o mês de Janeiro.....	56
Figura 3.20 – Irradiação global para o mês de Fevereiro.	57
Figura 3.21 – Irradiação global para o mês de Março.	58
Figura 3.22 – Irradiação global para o mês de Abril.	59
Figura 3.23 – Irradiação global para o mês de Maio.	60
Figura 3.24 – Irradiação global para o mês de Junho.....	61
Figura 3.25 – Irradiação global para o mês de Julho.....	62
Figura 3.26 – Irradiação global para o mês de Agosto.....	63
Figura 3.27 – Irradiação global para o mês de Setembro.....	64

Figura 3.28 – Irradiação global para o mês de Outubro.	65
Figura 3.29 – Irradiação global para o mês de Novembro.	66
Figura 3.30 – Irradiação global para o mês de Dezembro.	67
Figura 3.31 – Média anual da irradiação global.	68
Figura 3.32 – Total anual da irradiação global.	69
Figura 4.1 – Diagrama de blocos de sistemas fotovoltaicos isolados.	71
Figura 4.2 – Variação da irradiação solar para o local selecionado durante o ano.	72
Figura 4.3 – Local de proposta do Sistema Fotovoltaico Isolado.	73
Figura 4.4 – Esquema de ligação dos componentes do sistema	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Cronologia da tecnologia dos SIG.	29
Tabela 2.2 – Principais elipsóides e seus parâmetros.	33
Tabela 4.1 – Consumo estimado de energia elétrica da residência.....	74
Tabela 4.2 – Especificações técnicas do módulo Yingli Solar SW140.	79
Tabela 4.3 – Especificações técnicas da bateria Freedom DF2500.	80
Tabela 4.4 – Comparação entre SFI de 12 V e 24 V.	80
Tabela 4-5 – Especificações técnicas do controlador de carga Epsolar Landstar LS2024.	81
Tabela 4-6 – Especificações técnicas do inversor Xantrex PROwatt 250W.	81
Tabela 4-7 – Equipamentos necessários ao sistema.	82
Tabela 4-8 – Comprimento máximo da fiação (m).....	83
Tabela 4-9 – Dimensionamento do ramal de ligação e entrada das instalações em 127/220 V.	84
Tabela 4-10 – Estimativa de custo do sistema.	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NASA – *National Aeronautics and Space Administration* (Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço)

OMM – Organização Meteorológica Mundial

SIG – Sistema de Informação Geográfica

PIB – Produto Interno Bruto

GIS – *Geographic Information System* (Sistema de Informação Geográfica)

SQL – *Structured Query Language* (Linguagem de Consulta Estruturada)

GPS – *Global Positioning System* (sistema de posicionamento global)

pH - Potencial hidrogeniônico ou potencial de hidrogênio

AMAM – Associação dos Municípios do Arquipélago do Marajó

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

SWERA – *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (Levantamento de Recurso de Energia Solar e Eólica)

DMA – Divisão de Clima e Meio Ambiente.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.

LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

QGIS – Quantum GIS.

SRC – Sistema de Referência de Coordenada.

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas.

WMO – *World Meteorological Organization* (Organização Meteorológica Mundial)

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SFI – Sistema Fotovoltaico Isolado

SPPM – Seguimento de Ponto de Potência Máxima

EUA – Estados Unidos da América

CAD – *Computer Aided Design* (Desenho Assistido por Computador)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PIB – Produto Interno Bruto

AMAM – Associação dos Municípios do Arquipélago do Marajó.

HSP – Horas de Sol Pleno.

LISTA DE SÍMBOLOS

δ – Declinação solar

θ_z – Ângulo zenital

α – Altura ou elevação solar

γ_s – Ângulo azimutal do sol

γ – Ângulo azimutal da superfície

β – Inclinação da superfície de captação

θ – Ângulo de incidência

I_h – Radiação global horizontal

I_{bn} – Radiação direta

I_d – Radiação difusa

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
1 ENERGIA SOLAR.....	3
1.1 O sol.....	3
1.2 Radiação solar.....	4
1.2.1 Constante solar.....	4
1.2.2 Descrição da trajetória solar.....	5
1.2.3 Ângulos de incidência da radiação solar.....	7
1.2.4 Atenuação da radiação solar pela atmosfera.....	9
1.2.5 Medição da radiação solar.....	10
1.2.5.1 Instrumentos solarimétricos.....	11
1.2.5.2 Medição da radiação solar difusa.....	15
1.3 Energia solar fotovoltaica.....	16
1.3.1 Efeito fotovoltaico.....	16
1.3.2 Tipos de células fotovoltaicas.....	18
1.3.3 Tipos de sistema fotovoltaico.....	19
1.3.3.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede (<i>On – Grid</i>).....	19
1.3.3.2 Sistema fotovoltaico isolado ou autônomo (<i>off – Grid</i>).....	20
1.3.4 Componentes de um sistema fotovoltaico.....	21
1.3.4.1 Módulo fotovoltaico.....	21
1.3.4.1.1 Associação em série.....	22
1.3.4.1.2 Associação em paralelo.....	22
1.3.4.1.3 Associação mista.....	23
1.3.4.2 Controlador de carga.....	24
1.3.4.3 Bateria.....	24
1.3.4.4 Inversor.....	25
2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA.....	26

2.1	Histórico.....	26
2.2	O que é um sistema de informação geográfica?	29
2.2.1	Dados	30
2.2.2	Metodologias.....	30
2.2.3	Hardware	30
2.2.4	Recursos humanos	31
2.2.5	Software	31
2.3	Fundamentos cartográficos e geodésicos	31
2.3.1	Elipsóide de referência e geóide	32
2.3.2	<i>Datum</i> geodésico.....	34
2.3.3	Sistemas de coordenadas.....	34
2.3.4	Coordenada geográfica	35
2.4	Importância de um SIG	35
2.5	Bancos de dados geográficos	36
2.5.1	Modelos de dados geográficos	36
2.5.1.1	Dados vetoriais.....	37
2.5.1.2	Dados matriciais.....	37
2.5.2	Banco de dados geográficos <i>on-line</i>	38
2.6	Emprego de um SIG.....	38
2.7	Quantum GIS	39
2.7.1	Instalação	40
2.7.2	Iniciando o QGIS	41
2.7.3	Instalar e remover complementos	41
2.7.4	Criar um novo projeto no QGIS.....	43
3	METODOLOGIA	44
3.1	Local da pesquisa.....	44
3.2	Banco de dados geográficos.....	45

3.3	Operações no QGIS	46
3.3.1	Carregar o banco de dados e bases cartográficas	46
3.3.2	Alterações nas camadas	48
3.3.3	Interpolação.....	50
3.3.4	Colorir as camadas interpoladas	51
3.3.5	Compositor de impressão.....	53
3.4	Mapas solarimétricos da Ilha do Marajó.....	55
4	PROJETO BÁSICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO – SFI.....	71
4.1	Etapas para o dimensionamento do sistema.....	71
4.1.1	Levantamento do recurso solar disponível na região da aplicação.....	72
4.1.2	Definição do local de instalação	73
4.1.3	Levantamento da demanda e do consumo energético.....	73
4.1.4	Dimensionamento do gerador fotovoltaico.....	74
4.1.5	Dimensionamento do banco de baterias	77
4.1.6	Dimensionamento do controlador de cargas.....	78
4.1.7	Dimensionamento do inversor	79
4.1.8	Determinação da tensão de operação do sistema	79
4.1.9	Dimensionamento dos condutores elétricos.....	82
	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICE A – Mapas de irradiação solar difusa.....	94
	APÊNDICE B – Mapas de irradiação solar direta	109

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que possui dimensões continentais e talvez seja por essa característica ou por falta de políticas públicas adequadas que ainda não consegue atender toda sua demanda quando se diz respeito à energia elétrica. Dentro desse contexto destaca-se a Ilha do Marajó, localizada no estado do Pará que possui 16 municípios e que ainda não possui fornecimento de energia elétrica em sua totalidade.

Atualmente muito se fala a respeito de sustentabilidade e dentro dessa vertente produzir energia proveniente de fontes renováveis torna-se muito importante, pois assim se tem a diminuição da dependência do petróleo e conseqüentemente tem-se também a diminuição da emissão de gases poluentes para a atmosfera.

A radiação solar é, sem dúvida, a principal fonte de energia para o nosso Planeta. Como fonte primária de energia, dela se derivam praticamente todas as outras formas. Por exemplo, o aquecimento da superfície terrestre pela radiação solar desencadeia uma série de fenômenos meteorológicos, dentre eles a evaporação, com a formação de nuvens e, conseqüentemente, a chuva, possibilitando que as águas possam ser represadas e assim construídas usinas de geração hidrelétrica. Outro fenômeno meteorológico originado do aquecimento desigual da superfície terrestre pela radiação solar são os ventos, que possibilitam a geração de energia elétrica através de aerogeradores. Os combustíveis fósseis, tais como o carvão mineral e o petróleo, que se originaram da decomposição de plantas e animais, que por sua vez para crescerem, também usaram a radiação solar como fonte de energia. Combustíveis derivados de vegetais, tais como óleos e álcool, também só podem ser produzidos se houver luz solar, o que propicia o desenvolvimento das plantas.

A Ilha do Marajó pode apresentar um bom potencial para geração de eletricidade através de fontes renováveis como solar, eólica, hídrica e biomassa. E para realizar um estudo científico, com o objetivo apresentar esses possíveis potenciais, é imprescindível o levantamento de dados acerca do recurso renovável que se pretende trabalhar.

A coleta de informações sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas, devido à necessidade de planejamento. Contudo, até recentemente isto era feito apenas em documentos e mapas em papel, o que impede uma análise mais apurada das informações. Com o desenvolvimento dos recursos computacionais, tornou-se possível o armazenamento e manipulação de informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o surgimento do Geoprocessamento, o qual abrange os Sistemas de Informação Geográfica - SIG.

Um SIG é um sistema automatizado usado para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la.

Desta forma este trabalho procura realizar um estudo para fazer o levantamento do potencial de geração de energia elétrica através da fonte solar, utilizando como ferramentas um SIG, e posteriormente propor o dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado para a área da ilha que apresentar uma boa oferta de radiação solar.

O trabalho está estruturado em quatro capítulos, no primeiro são apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento da energia solar e do processo de transformação da radiação solar em eletricidade por meio das células fotovoltaicas.

No segundo capítulo é apresentada a teoria sobre Sistema de Informação Geográfica – SIG, mostrando desde seu histórico até em que áreas um SIG pode ser empregado para auxiliar na tomada de decisão.

O terceiro capítulo trata da metodologia, ou seja, como o trabalho foi realizado, enfatizando o local da pesquisa, a coleta e análise dos dados e também os procedimentos para a geração dos mapas temáticos.

No quarto capítulo serão mostrados os passos necessários para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, iniciando com a escolha do local proposto, passando pela determinação da quantidade de módulos fotovoltaicos, do controlador de carga, do banco de bateria, do inversor, até finalizar com o dimensionamento dos condutores elétricos para o atendimento das cargas.

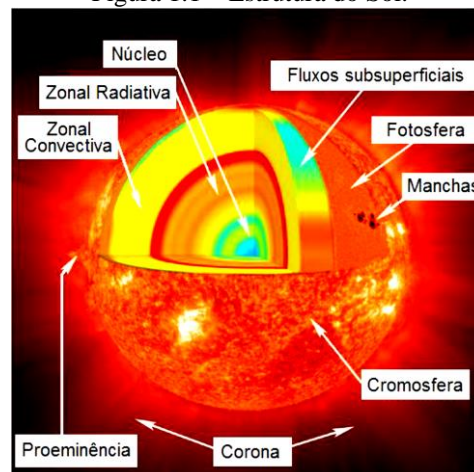
1 ENERGIA SOLAR

1.1 O sol

O Sol tem desempenhado um papel dominante para diferentes atividades naturais no Universo em geral e sobre a Terra, em particular, para a formação de combustíveis fósseis e das fontes de energia renováveis.

O Sol é uma esfera de matéria gasosa extremamente quente, com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m, e está localizado em média a $1,5 \times 10^{11}$ m da terra. O Sol gira sobre seu próprio eixo uma vez a cada quatro semanas. No entanto, ele não gira como um corpo sólido, o equador leva cerca de 27 dias, e as regiões polares levam por volta de 30 dias para cada rotação [1]. Sua estrutura, Figura 1.1, é composta pelas regiões: núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera e coroa (ou às vezes chamada de corona).

Figura 1.1 – Estrutura do Sol.



Fonte – [2]

Através de reações nucleares, que acontecem em seu interior, o Sol fornece energia para a existência de toda forma de vida no planeta Terra. É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que, originalmente, obtiveram a energia necessária ao seu desenvolvimento da radiação solar. As reações químicas às quais a matéria orgânica foi submetida, a altas temperaturas e pressões, por longos períodos de tempo, também utilizaram o Sol como fonte de energia. É também por causa da energia do Sol que a matéria orgânica,

como a cana-de-açúcar, é capaz de se desenvolver, fazer fotossíntese para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas [3].

1.2 Radiação solar

Radiação solar é a energia proveniente do Sol, na forma de radiação eletromagnética. Devido à grande distância existente entre o Sol e a Terra, apenas uma mínima parte atinge a superfície da terrestre. Esta radiação corresponde a uma quantidade de energia de $1,5125 \times 10^{18}$ KWh/ano [4].

A quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra corresponde, aproximadamente, a dez mil vezes à procura global de energia. Assim, seria necessário utilizar apenas 0,01% desta energia para satisfazer a procura energética total da humanidade [2].

Ao longo dos últimos anos uma atenção crescente está sendo dada ao estudo das possibilidades de aproveitamento desta forma de energia. O que implica na necessidade de um conhecimento detalhado da mesma.

O conhecimento da trajetória da radiação solar até atingir a superfície terrestre é importante para que seja diferenciada a intensidade, a quantidade e a qualidade da radiação incidente sobre determinada localidade e época do ano, no topo da atmosfera e na superfície da Terra [5].

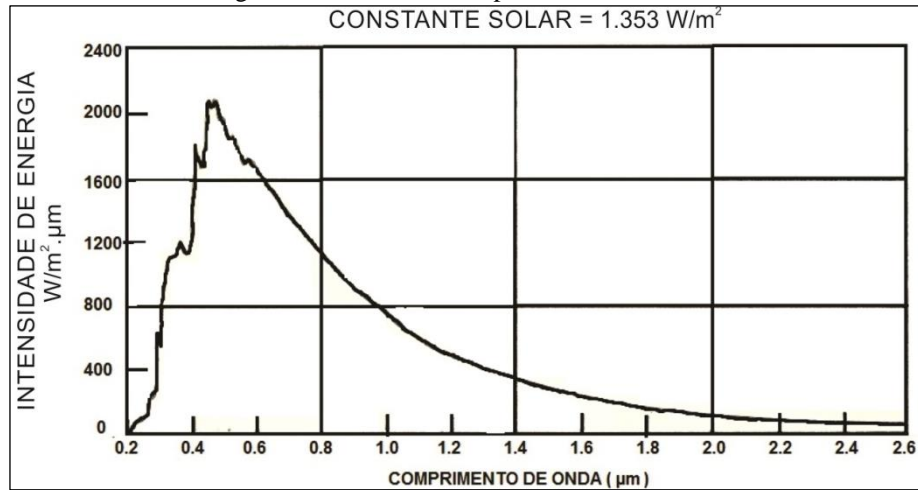
1.2.1 Constante solar

A constante solar é a quantidade de energia que incide numa superfície unitária, normal aos raios solares, por unidade de tempo numa região situada no topo da atmosfera. A distribuição espectral da radiação nesse local é denominada espectro solar extraterrestre.

O valor da constante solar determinado em 1971, pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA é 1.353 W/m^2 , com erro de $\pm 1,5\%$, contudo, medições mais recentes têm apontado o valor de 1.372 W/m^2 [4].

A Figura 1.2 mostra o espectro da radiação solar no topo da atmosfera, ou seja, antes de sofrer interferências por absorção ou espalhamento pelas moléculas de gases, partículas ou vapor de água que constituem a atmosfera terrestre.

Figura 1.2 – Irradiância espectral extraterrestre.

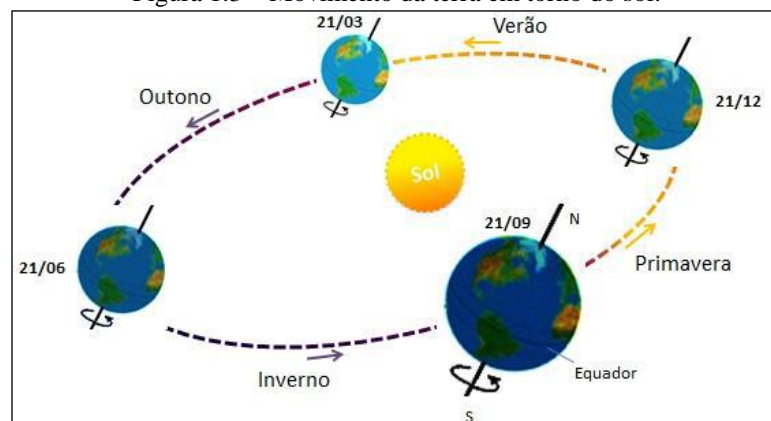


1.2.2 Descrição da trajetória solar

Nos estudos de energia solar é importante compreender a posição do Sol em relação à Terra. Uma importante ferramenta para explicar e compreender a posição do Sol é a trajetória solar em relação a um determinado local na superfície da terra.

A Terra gira em um ângulo de $23,45^\circ$ em relação ao plano orbital eclíptico. Esse ângulo de rotação é responsável pelas estações do ano [6]. A Figura 1.3 ilustra o movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul.

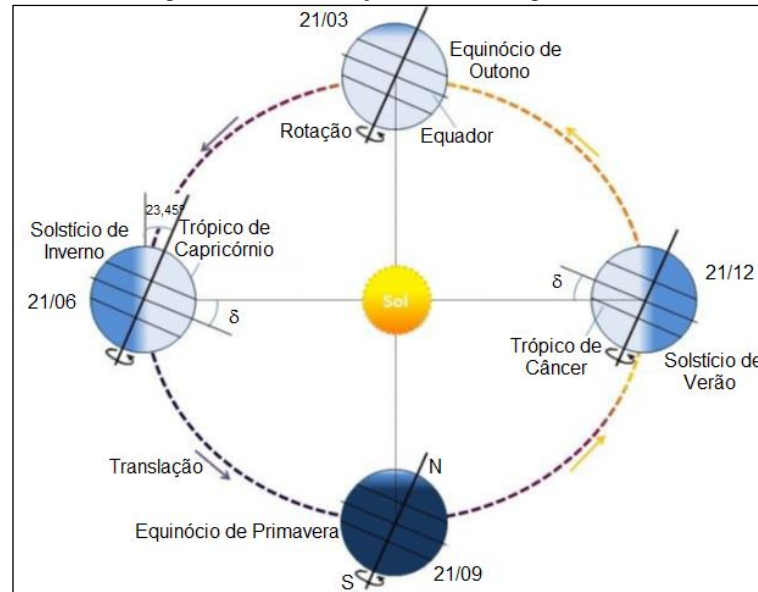
Figura 1.3 – Movimento da terra em torno do sol.



Ao observar o movimento aparente do Sol, ao meio dia solar, ao longo do ano, verifica-se que o ângulo entre os seus raios e o plano do Equador varia entre $+23,45^\circ$ em torno do dia 21 de junho (solstício de inverno no Hemisfério Sul), e $-23,45^\circ$ em 21 de dezembro

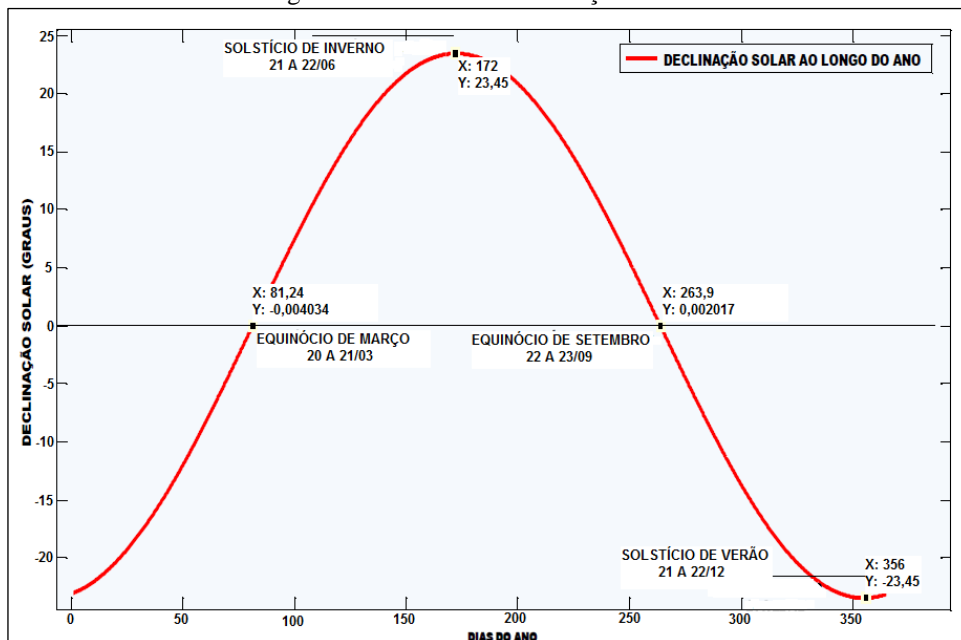
(solstício de verão no hemisfério Sul). Este ângulo, denominado Declinação Solar (δ), é positivo ao Norte e negativo ao Sul do Equador. Nos dias 21 de setembro (equinócio de primavera) e 21 de março (equinócio de outono) os raios solares se alinham com o plano do Equador ($\delta = 0$) [2]. A Figura 1.4 mostra a Declinação Solar (δ) em quatro posições da Terra ao longo do ano. Já a Figura 1.5 apresenta a curva da Declinação Solar durante o ano.

Figura 1.4 – Declinação solar ao longo do ano.



Fonte – [2]

Figura 1.5 – Curva da Declinação Solar δ .



Fonte – [3]

Considerando-se as convenções para a Declinação Solar e latitudes positivas ao Norte e negativas ao Sul do Equador, a diferença entre a declinação e a latitude determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra. A Declinação Solar pode ser calculada utilizando-se a Equação 1.1 [7].

$$\text{sen}(\delta) = -\text{sen}(23,45)\cos\left[\left(\frac{360}{365,25}\right)(n + 10)\right] \quad (1.1)$$

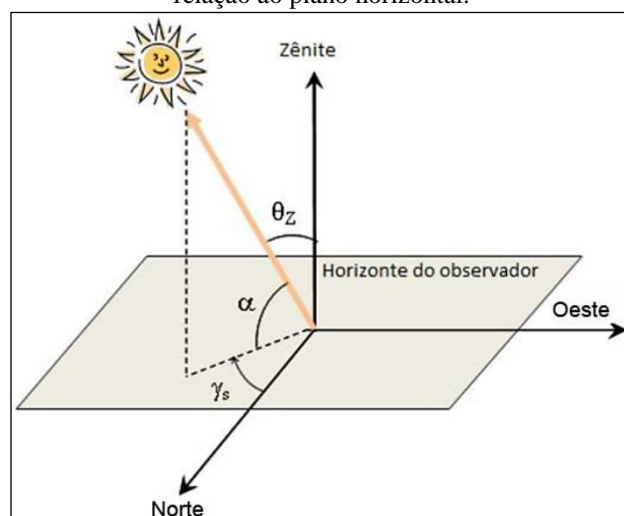
Em que n é o dia Juliano. O dia Juliano é o número do dia conforme medido sequencialmente de 1 de janeiro (1º dia juliano) a 31 de dezembro (365º dia juliano).

Os Equinócios são os pontos que indicam o dia e noite do ano que exatamente são iguais em qualquer região do globo terrestre. No Solstício de Junho (Inverno) δ possui um valor máximo positivo $\delta = +23,45^\circ$, correspondendo ao dia mais curto e a noite mais longa do ano. No solstício de Dezembro (Verão) a declinação solar alcança um valor máximo negativo $\delta = -23,45^\circ$, o que corresponde ao dia mais longo e a noite mais curta do ano [3].

1.2.3 Ângulos de incidência da radiação solar

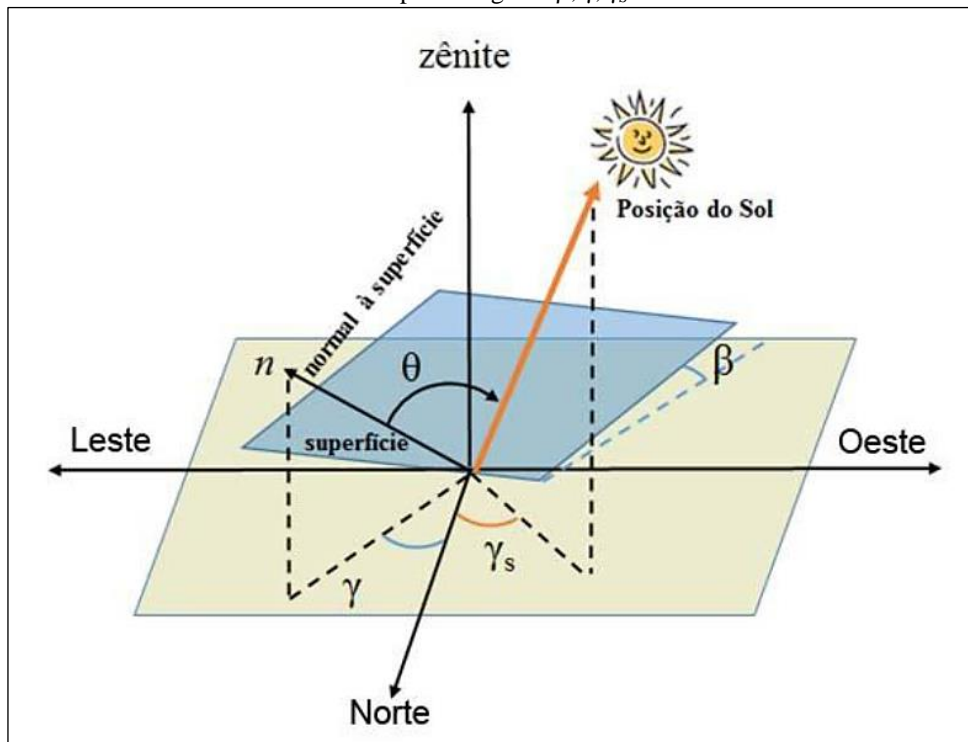
As relações geométricas entre os raios solares, que variam de acordo com o movimento aparente do Sol e a superfície terrestre, são descritas através de vários ângulos (Figura 1.6 e Figura 1.7) definidos a seguir [2]:

Figura 1.6 – Ilustração dos ângulos α e γ_s , representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal.



Fonte – [2]

Figura 1.7 – Ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano ângulos β , γ , γ_s e θ .



Fonte – [2]

- Ângulo Zenital (θ_z): É o ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (Zênite).
- Altura ou Elevação Solar (α): ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador).
- Ângulo Azimutal do Sol (γ_s): é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador), sendo por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste).

$$-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$$

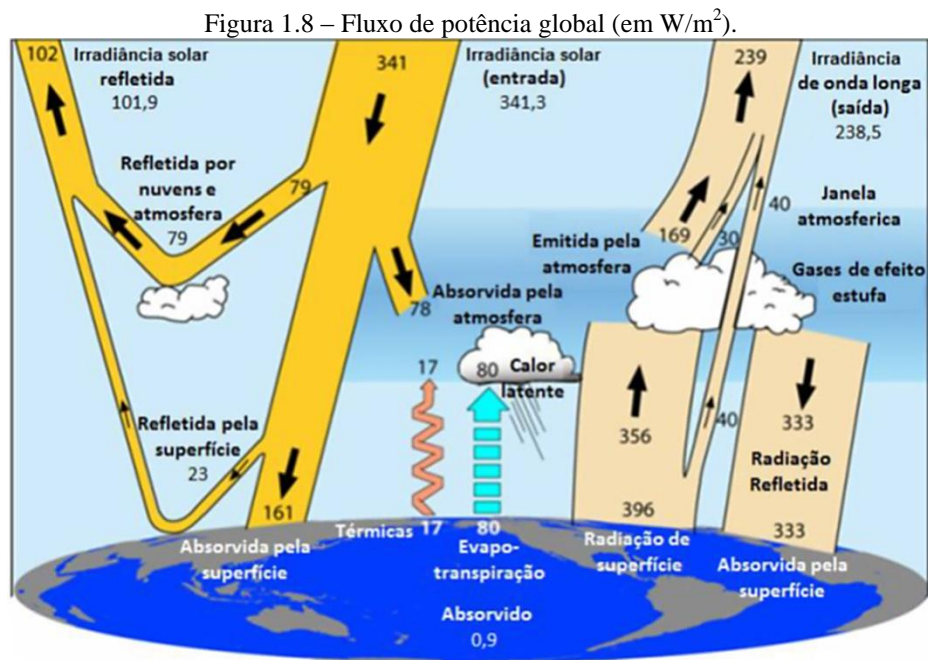
- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul.
- Inclinação da superfície de captação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal [0° 90°].
- Ângulo de incidência (θ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação.

O estudo dos ângulos de incidência solar no plano horizontal e também no plano inclinado se faz de extrema importância, pois de acordo com a localização a escolha de

ângulos para a implantação de um sistema fotovoltaico, pode influenciar muito no desempenho do mesmo. Se estes ângulos não forem determinados corretamente os equipamentos empregados no sistema não serão usados em sua total capacidade de funcionamento.

1.2.4 Atenuação da radiação solar pela atmosfera

Considerando que o raio médio da Terra é 6.371 km, e considerando o valor da irradiância¹ de 1.367 W/m^2 incidindo sobre a área projetada da Terra, conclui-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra (Figura 1.8), no topo da atmosfera, é de aproximadamente 174 mil TW (terawatts), desse total cerca de 54 % da irradiância solar que incide no topo da atmosfera, é refletida (7 %) e absorvida (47 %) pela superfície terrestre (os 46 % restantes são absorvidos ou refletidos diretamente pela atmosfera). Ou seja, da potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, cerca de 94 mil TW chegam efetivamente à superfície terrestre. O consumo mundial de energia primária no ano de 2011 foi cerca de 143 mil TWh, então, no intervalo de duas horas a quantidade de energia solar recebida na superfície terrestre é superior ao consumo energético anual da humanidade [2].



Fonte: [2]

¹ O termo radiação solar é usado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de fluxo de potência, quando é especificamente denominado de irradiância solar, ou em termos de energia por unidade de área, denominado, então, de irradiação solar.

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera sofre uma série de atenuações antes de atingir a superfície terrestre. A radiação solar incidente sobre os coletores solares é decomposta em duas componentes. A primeira é a radiação solar direta, definida como a fração da radiação solar que atravessa a atmosfera sem sofrer alteração na sua direção original. A segunda componente corresponde à radiação difusa, ou seja, a componente da radiação solar que é espalhada e refletida pelos elementos constituintes da atmosfera. Se a superfície estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.) o coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de “albedo” [8]. A quantidade resultante da soma das parcelas direta, difusa e devida ao albedo (quando a superfície é inclinada) é denominada de radiação global.

1.2.5 Medição da radiação solar

Os instrumentos solarimétricos medem a potência incidente por unidade de superfície, integrada sobre os diversos comprimentos de onda. As medições padrões são a radiação global e a componente difusa no plano horizontal e a radiação direta. Habitualmente são utilizados instrumentos cujo sensor de radiação é uma termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, normalmente pintadas de preto e branco e igualmente iluminadas [9].

Fotocélulas de silício monocristalino ou diodos são utilizados no presente e com bastante frequência como sensores para medições piranométricas. Seu custo é de 10 a 20% dos custos dos instrumentos que usam termopilhas. Sua maior limitação é a não uniformidade da resposta espectral e a região relativamente limitada de comprimentos de onda à qual a fotocélula é sensível (400 a 1.100 nm, com o máximo em torno dos 900 nm). Como cerca de 99% do espectro solar estende-se entre 270 a 4700 nm, o intervalo de sensibilidade desses sensores só compreende 66% da radiação.

As fotocélulas e termopilhas realizam medidas essencialmente diferentes. A fotocélula conta o número de fótons com energia maior que a diferença existente entre duas bandas de energia do material com as quais esses fótons interagem (banda de energia proibida do silício). A energia em excesso dos fótons é simplesmente dissipada em forma de calor. Uma termopilha mede potência e, portanto, o momento de primeira ordem da distribuição espectral. Esta diferença dá origem a características espectrais qualitativamente diferentes que complicam a análise da inter-relação entre ambos os tipos de sensores.

Se o espectro solar tivesse sempre a mesma distribuição, bastaria uma calibração desses sensores, que não seriam, portanto, afetados pela sua resposta espectral. No entanto, a distribuição espectral modifica-se com a massa de ar e cobertura de nuvens. Essa mudança é muito importante para a componente direta normal da radiação e extremamente grande para a radiação difusa ao ponto de, neste caso, a medição poder ser afetada de erros da ordem de 40%.

1.2.5.1 Instrumentos solarimétricos

A radiação global I_h que atinge um plano horizontal localizado na superfície terrestre é a soma de duas componentes: a radiação direta e a radiação difusa e é dada pela Equação 1.2 [4].

$$I_h = I_{bn} \cos \alpha + I_d \quad (1.2)$$

Onde I_{bn} é o fluxo de radiação direta, normal aos raios solares; α o ângulo formado pelos raios com o plano horizontal e I_d a radiação difusa que incide sobre o plano horizontal. Conforme já foi mencionado quando o plano está inclinado de um ângulo β com relação ao plano horizontal, parte da radiação refletida no solo adjacente incide na sua superfície. Esta radiação constitui uma terceira componente, denominada albedo.

Os instrumentos que são descritos a seguir servem para medição da radiação global ou uma de sua componente. A medição do albedo, quando necessária, é realizada pelos mesmos instrumentos de medição de radiação total, sendo estes, porém, voltados para o solo.

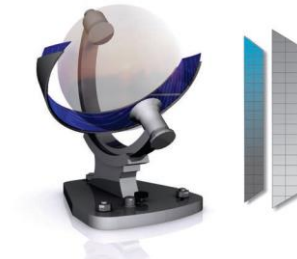
- Heliógrafo

Este instrumento tem por objetivo medir a duração da insolação, ou seja, o período de tempo em que a radiação solar direta supera um dado valor de referência. O heliógrafo opera a partir da focalização da radiação solar sobre uma carta que, como resultado da exposição, é enegrecida. O comprimento desta região mede o chamado número de horas de brilho do Sol.

Diversas correlações desenvolvidas permitem o cálculo da radiação total diária, a partir das horas de brilho solar. Existe um limiar de radiação solar, acima do qual ocorre o enegrecimento por queima da carta de papel do heliógrafo. Este limiar apresenta uma variabilidade, dependendo da localização geográfica, do clima e do tipo da carta utilizada. Em

geral, o valor do limiar está entre 100 e 200 W/m^2 . Entretanto, uma recomendação da Organização Meteorológica Mundial – OMM estabelece que o valor do limiar deva ser de 120 W/m^2 [10]. A Figura 1.9 mostra um heliógrafo do tipo Campbell-Stokes recomendado pela OMM.

Figura 1.9 – Heliógrafo Cambell-Stokes e cartas de registro.



Fonte – [9]

- Actinógrafo

O actinógrafo é utilizado para medição da radiação solar direta ou sua componente difusa, possuindo o sensor e o registrador na mesma unidade. Ele consiste, essencialmente, em um receptor com três tiras bimetálicas, a central de cor preta e as laterais brancas. As tiras brancas estão fixadas e a preta está livre em uma extremidade, e irão se curvar, quando iluminadas, em consequência dos diferentes coeficientes de dilatação dos metais que as compõem. Na tira preta, este encurvamento gera um movimento no extremo livre, que é transmitido mecanicamente a uma pena que irá registrar sobre uma carta de papel, montada sobre um tambor acionado por mecanismo de relojoaria.

O uso do actnógrafo não é bastante difundido devido à faixa de erro do equipamento, que pode variar de 15 a 20%. Mesmo com uma calibração mensal, esses erros não são inferiores aos 5 a 10%, sendo considerado um instrumento de terceira classe. Um actinógrafo bimetálico tipo Robitzsch-Fuess é mostrado a seguir, na Figura 1.10.

Figura 1.10 – Actinógrafo bimetálico do tipo Robitzsch-Fuess.



Fonte – [9]

- Piranômetro fotovoltaico

Estes solarímetros possuem como elemento sensor uma célula fotovoltaica, em geral de silício monocristalino. As fotocélulas têm a propriedade de produzir uma corrente elétrica quando iluminada, sendo esta corrente, na condição de curto-circuito, proporcional à intensidade da radiação incidente.

Tais piranômetros têm recebido diversas críticas, particularmente quanto a sua resposta espectral, ou seja, a seletividade do espectro solar parcial. Este fenômeno é inerente ao sensor e, em consequência, incorrigível.

De qualquer forma, seu baixo custo e facilidade de uso os fazem particularmente úteis como instrumentos secundários. Entretanto, sua utilização é recomendada para integrais diárias de radiação solar total sobre o plano horizontal ou para observar pequenas flutuações da radiação, devido a sua grande sensibilidade temporal de resposta quase instantânea de frações de segundos. A Figura 1.11 mostra um exemplo de piranômetro fotovoltaico.

Figura 1.11 – Piranômetro Fotovoltaico.



Fonte – [9]

- Piranômetro termoelétrico

O elemento sensível desses solarímetros é, em essência, uma pilha termoelétrica, constituída por pares termoelétricos (termopares) em série. Tais termopares geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre suas juntas, as quais se encontram em contato térmico com placas metálicas que se aquecem de forma distinta, quando iluminadas. Portanto, a diferença de potencial medida na saída do instrumento pode ser relacionada com o nível de radiação incidente.

Entre os piranômetros termoelétricos existem essencialmente dois tipos em uso, sendo eles:

a) Piranômetros com o detector pintado de branco e preto (Figura 1.12), isto é, o receptor apresenta alternativamente superfícies brancas e pretas, dispostas em coroas circulares concêntricas ou com outros formatos, tais como estrela ou quadriculados. Nestes instrumentos, as juntas quentes das termopilhas estão em contato com as superfícies negras, altamente absorventes, e as frias em contato com as superfícies brancas, de grande refletividade.

b) Piranômetros com a superfície receptora totalmente enegrecida (Figura 1.13) em contato térmico com as juntas quentes e as frias, associadas a um bloco de metal de grande condutividade térmica, colocadas no interior do instrumento, resguardadas da radiação solar e tendo, aproximadamente, a temperatura do ar.

Figura 1.12 – Piranômetro do tipo Black & White Eppley 8-48.



Fonte – [9]

Figura 1.13 – Piranômetro Campbell Scientific CMP11-L.



Fonte – [11]

- Pireliômetro

O pireliômetro é o instrumento utilizado para medir a radiação direta. Ele se caracteriza por possuir uma pequena abertura de forma a “ver” apenas o disco solar e a região vizinha, denominada circunsolar. O ângulo de aceitação é da ordem de 6° e o instrumento segue o movimento do Sol, que é permanentemente focalizado na região do sensor.

Os pireliômetros são instrumentos de precisão e, quando adequadamente utilizados nas medições, possuem erro na faixa de 0,5%. Na atualidade, os mais difundidos são os de termopilhas. A Figura 1.14 mostra um modelo de pireliômetro produzido pela Campbell Scientific.

Figura 1.14 – Pireliômetro Campbell Scientific CHP1-L.

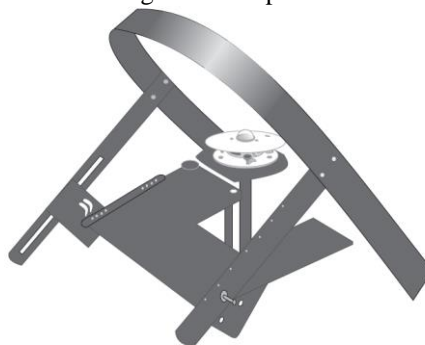


Fonte – [12]

1.2.5.2 Medição da radiação solar difusa

As medições de radiação difusa são realizadas com piranômetros ou mesmo actinógrafos, cujos sensores encontram-se sombreados por uma banda ou disco, de forma a não incidir radiação solar direta. O mais tradicional é o uso da banda de sombra em forma de aro ou semiarco, colocada em paralelo com a barra de ajuste do próprio equipamento. Desta forma, o sensor estará protegido durante todo o dia, Figura. 1.15 [13].

Figura 1.15 – Esquema de montagem de um piranômetro com banda de sombra,



Fonte – [13]

O custo da banda de sombra é relativamente baixo e sua montagem é simples. Porém, devido ao fato da banda também bloquear parte da própria radiação difusa, é necessário que se faça uma correção das leituras. Esta correção oscila, em geral, entre 5 e 25%, apresentando uma grande variabilidade, dependendo das dimensões geométricas da banda; latitude; época

do ano; turbidez atmosférica e grau de nebulosidade; albedo das superfícies vizinhas e refletividade da superfície interna da banda [13].

1.3 Energia solar fotovoltaica

A conversão de energia solar em energia elétrica foi verificada pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839 onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto a luz. Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica [14]. Neste ano a utilização de fotocélulas foi de papel decisivo para os programas espaciais. Com este impulso, houve um avanço significativo na tecnologia fotovoltaica onde aprimorou-se o processo de fabricação e a eficiência das células. Com a crise mundial de energia de 1973/74, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais, mas que fosse intensamente estudado e utilizado no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia.

Um dos fatores que impossibilitava a utilização da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas. Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas, o preço tem reduzido ao longo dos anos. No final de 2013, para venda em maior escala, o preço do módulo fotovoltaico de c-Si encontrava-se em cerca de 0,60 €/Wp na Europa, de 0,65 U\$/Wp nos EUA e menos de 3 R\$/Wp no Brasil [2].

1.3.1 Efeito fotovoltaico

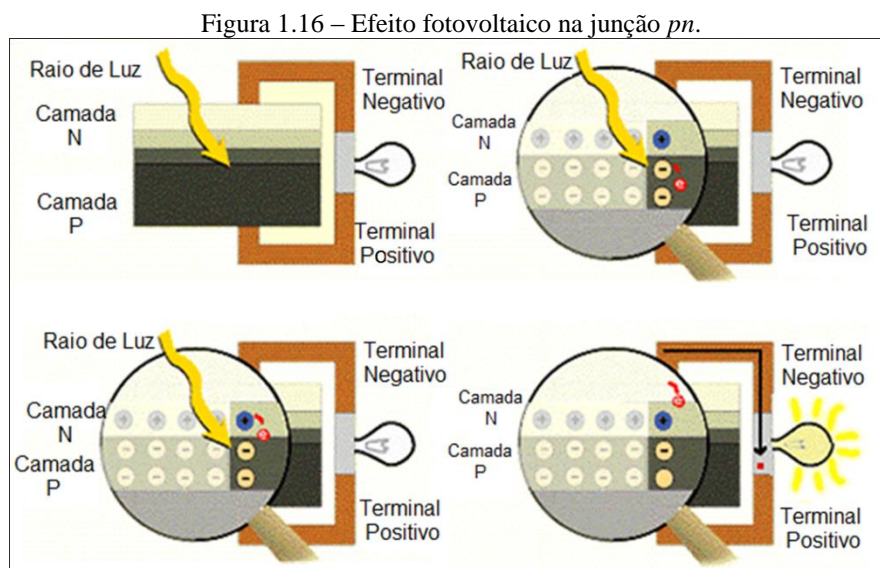
O efeito fotovoltaico é a transformação da energia contida na radiação solar em energia elétrica. Tal transformação ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação solar, transformando-a em eletricidade. A energia absorvida por esses materiais quebra as ligações químicas entre as moléculas presente em sua estrutura. Com isso, cargas elétricas são liberadas e podem ser utilizadas para a realização de trabalho [15].

Um dos semicondutores mais utilizado é o silício [14]. Seus átomos caracterizam-se por possuírem quatro elétrons de ligação que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por

exemplo, haverá um elétron em excesso que ficará “sobrando”, fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se *dopante n* ou *impureza n*. Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se, portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante *p* [7].

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama junção *pn*. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado *n* passam ao lado *p* onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado *p*, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado *n*, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado *n* para o lado *p*; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado *n*.

Se uma junção *pn* for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá a geração de pares elétron – lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção, a Figura 1.16 mostra como ocorre a geração de eletricidade através da radiação solar.



Fonte – [14]

Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons e, por consequência, uma corrente elétrica. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas, as quais são associadas de acordo com a tensão e corrente necessária, formando assim, os módulos fotovoltaicos ou atualmente chamados de geradores fotovoltaicos.

1.3.2 Tipos de células fotovoltaicas

Atualmente existem várias tecnologias fotovoltaicas baseadas em diferentes elementos, dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se o silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou simplesmente a-Si); o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre (gálio) e índio (CuInSe₂ ou CIS e Cu(InGa)Se₂ ou CIGS). Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, Ga, In, Cd), ou ambos, inviabilizando inicialmente o uso mais intensivo destas tecnologias [16].

O c-Si (mono ou policristalino) é a tecnologia mais tradicional e a única das mencionadas que faz o uso de lâminas cristalinas, relativamente espessas, o que aumenta os custos de produção. O restante das tecnologias é baseado em películas delgadas (filmes finos) de material semicondutor, aspecto que reduz os custos desta tecnologia.

A tecnologia baseada em c-Si, dentre as utilizadas para aplicações terrestres é a que apresenta maior eficiência, em torno de 15% para módulos fotovoltaicos comercialmente disponíveis [2]. As tecnologias de filmes finos, sendo inerentemente menos eficientes e também por estarem ainda na infância de seu desenvolvimento, têm um rendimento ao redor de 8% para painéis comerciais, o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos painéis de c-Si [17]. A Figura. 1.17 mostra uma célula c-Si monocristalina e a Figura. 1.18 apresenta um módulo fotovoltaico de silício policristalino.

Figura 1.17 – Silício monocristalino



Fonte – [18]

Figura 1.18 – Silício policristalino



Fonte – [18]

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino, por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso, contudo, a eficiência cai um pouco em comparação às células de silício monocristalino.

1.3.3 Tipos de sistema fotovoltaico

Um sistema de geração fotovoltaica é uma fonte de energia que, através da utilização de células fotovoltaicas, converte diretamente a energia luminosa proveniente do sol em eletricidade.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em duas grandes categorias: os sistemas isolados ou autônomos, e os sistemas conectados à rede. Em ambos os casos, os mesmos podem operar com apenas a fonte fotovoltaica ou combinada com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de sistemas híbridos.

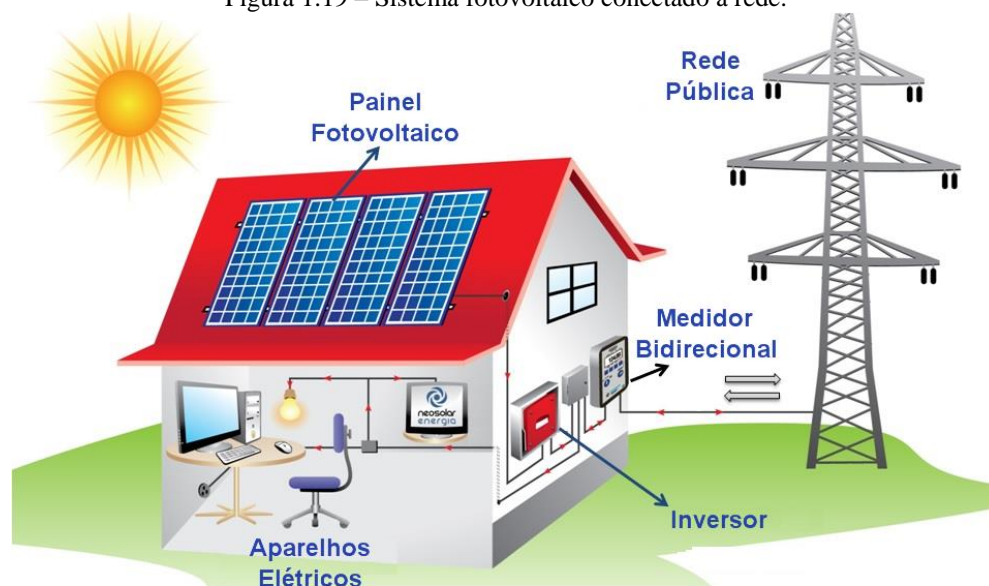
1.3.3.1 Sistema fotovoltaico conectado à rede (*On – Grid*)

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede – SFCRs são caracterizados por estarem integrados à rede elétrica que abastece a população. Diferente dos sistemas isolados que atendem a um propósito específico e local, estes sistemas são capazes de abastecer a rede elétrica com energia que pode ser utilizada por qualquer consumidor da rede.

O sistema *on – grid* depende da rede para funcionar, portanto caso ocorra a queda da rede o mesmo deverá imediatamente ser desligado. Isto é necessário, pois no caso de uma manutenção o trecho de onde o gerador fotovoltaico está conectado não pode estar eletrificado.

Devido ao fato de não necessitarem de sistemas de armazenamento (controladores de carga e baterias), a rede elétrica age como uma carga, absorvendo a energia elétrica gerada. A eficiência do sistema está intimamente ligada à eficiência dos inversores: quanto mais eficiente o inversor, maior será o potencial aproveitado e injetado na rede de distribuição. A Figura 1.19 ilustra um exemplo de SFCR.

Figura 1.19 – Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte – [19]

1.3.3.2 Sistema fotovoltaico isolado ou autônomo (*off – Grid*)

A existência dos Sistemas Fotovoltaicos Isolados – SFI é explicada pela localização de muitas áreas remotas. Por isso o fornecimento de energia pela rede elétrica convencional torna-se inviável, dadas às dificuldades de acesso e os custos elevados para construção de subestações e de longos circuitos de transmissão e distribuição, que somente atenderão uma pequena demanda pontual, ou algumas poucas unidades consumidoras [18]. Os sistemas isolados, como o próprio nome diz, não estão conectados a rede elétrica de distribuição convencional.

Estes sistemas utilizam alguma forma de armazenamento para que se possa utilizar a energia elétrica fora do período de geração dos painéis. Este armazenamento é geralmente obtido através de baterias, as quais são associadas a um controlador de carga que tem por objetivos garantir o correto nível de energia na bateria, evitando uma possível sobrecarga ou sobredescarga.

Em caso de alimentação de equipamentos em corrente alternada, faz-se necessário adicionar ao SFI um inversor. Este dispositivo tem a função de transformar potência em corrente contínua (c.c.) em potência em corrente alternada (c.a.). Na Figura 1.20 é mostrado um exemplo de Sistema Fotovoltaico Isolado e seus componentes.

Figura 1.20 – Sistema fotovoltaico isolado.



Fonte – [19]

1.3.4 Componentes de um sistema fotovoltaico

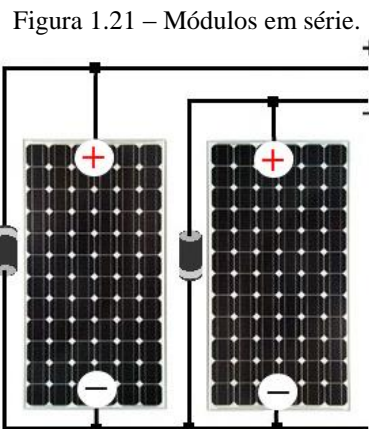
Um sistema fotovoltaico é composto por um ou mais módulos fotovoltaicos e por um conjunto de equipamentos complementares, como baterias, controladores de carga, inversores e outros equipamentos de proteção. A utilização desses componentes varia de acordo com a aplicação e com o tipo de sistema a ser instalado.

1.3.4.1 Módulo fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica possui baixa tensão e corrente de saída. Para obter uma tensão e corrente de saída adequada para utilização, faz-se o agrupamento de várias células formando um módulo fotovoltaico. Que por sua vez para garantir os níveis de tensão e corrente necessários a um determinado sistema fotovoltaico, associam-se os módulos em série para determinar o nível de tensão e em paralelo para encontrar a corrente necessária para a aplicação.

1.3.4.1.1 Associação em série

Na ligação em série (Figura. 1.21) a corrente que circula por um módulo é a mesma que circula pelos demais módulos associados, já a tensão nos extremos da associação é dada pela soma das tensões de cada módulo, conforme as Equações 1.3 e 1.4 [18]. É importante ressaltar que na associação de módulos fotovoltaicos devem ser utilizados módulos do mesmo tipo, de forma a minimizar as perdas de potência no sistema.



Fonte – Adaptado de[18]

$$V_T = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (1.3)$$

$$I_T = I_1 = I_2 = \dots I_n \quad (1.4)$$

Onde:

V_T – Tensão total no gerador fotovoltaico.

V_1 – Tensão no módulo 1.

V_2 – Tensão no módulo 2.

V_n – Tensão no módulo n.

I_T – Corrente total do gerador fotovoltaico.

I_1 – Corrente no módulo 1.

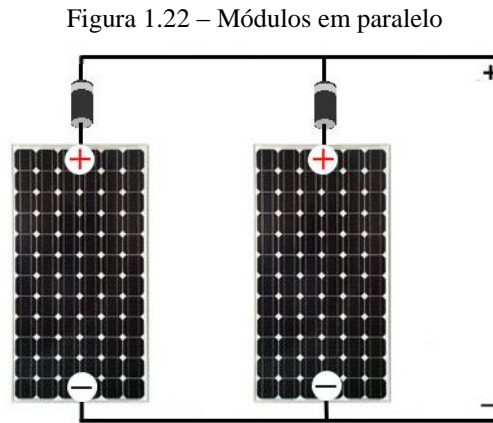
I_2 – Corrente no módulo 2.

I_n – Corrente no módulo n.

1.3.4.1.2 Associação em paralelo

Na ligação em paralelo os módulos fotovoltaicos encontram-se dispostos conforme a Figura 1.22. Nesse sistema a corrente da associação é igual à soma das correntes que circulam

por cada um dos módulos associados e a tensão é a mesma sobre todos os módulos. A corrente e a tensão no arranjo em paralelo podem ser dadas pelas Equações 1.5 e 1.6 [18].



Fonte – Adaptado de [18]

$$V_T = V_1 = V_2 = \dots V_n \quad (1.5)$$

$$I_T = I_1 + I_2 + \dots I_n \quad (1.6)$$

Onde:

V_T – Tensão total no gerador fotovoltaico.

V_1 – Tensão no módulo 1.

V_2 – Tensão no módulo 2.

V_n – Tensão no módulo n.

I_T – Corrente total do gerador fotovoltaico.

I_1 – Corrente no módulo 1.

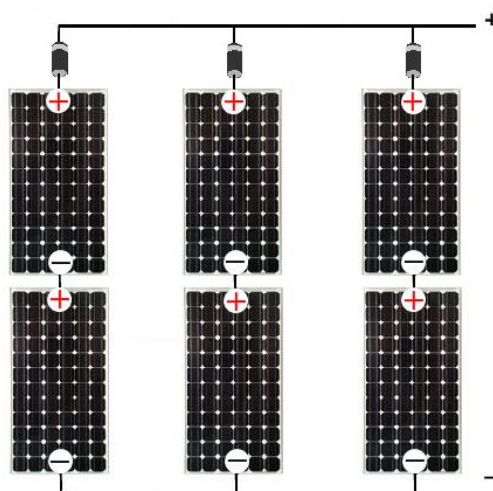
I_2 – Corrente no módulo 2.

I_n – Corrente no módulo n.

1.3.4.1.3 Associação mista

Na maioria dos sistemas fotovoltaicos há a necessidade de realizar a correção tanto da tensão como da corrente fornecida pelo gerador fotovoltaico. Estas correções podem ser feitas através da associação mista, arranjo que possui módulo tanto em série como em paralelo. Um exemplo de associação mista pode ser visto na Figura 1.23.

Figura 1.23 – Módulos em série-paralelo.



Fonte – Adaptado de [18]

1.3.4.2 Controlador de carga

Os controladores de carga são dispositivos eletrônicos operantes em corrente contínua que devem ser utilizados nos sistemas de geração fotovoltaica isolado, evitando sobrecargas ou descargas excessivas da bateria.

Alguns modelos de controladores mais sofisticados dispõem do recurso de Seguimento do Ponto de Potência Máxima – SPPM. Através deste aparato, a produção de energia do painel fotovoltaico é melhor aproveitada, aumentando a eficiência do sistema.

1.3.4.3 Bateria

A função prioritária das baterias num sistema de geração fotovoltaico é acumular a energia que é produzida durante as horas de incidência solar a fim de poder ser utilizada à noite ou durante períodos prolongados de mau tempo.

Ela também tem a função de prover uma intensidade de corrente superior àquela que o dispositivo fotovoltaico pode entregar às cargas. É o caso de um motor, que no momento da partida pode exigir uma corrente de 4 a 6 vezes sua corrente nominal durante uns poucos segundos [20].

As baterias podem ser classificadas em duas categorias: primárias e secundárias. As baterias primárias não podem ser recarregadas, ou seja, uma vez esgotados os reagentes que produzem energia elétrica, as mesmas devem ser descartadas. Os sistemas fotovoltaicos utilizam baterias secundárias, dentre os mais comuns, as de chumbo-ácido e as níquel-cádmio.

As baterias de chumbo-ácido aplicam-se amplamente nos sistemas de geração fotovoltaicos. Elas são as mais usadas devido a sua variedade de tamanhos, baixo custo e características de desempenho bem estabelecidas. Dentro da categoria chumbo-ácido, as de chumbo-antimônio, chumbo-selênio e chumbo-cálcio são as mais comuns.

As baterias de níquel-cádmio (Ni-Cads) possuem inúmeras vantagens relativamente às baterias de chumbo ácido o que as faz atrativas para utilização em sistemas fotovoltaicos isolados. Algumas dessas vantagens são: o seu longo tempo de vida, pequena manutenção, sobrevivência a excessivas sobrecargas, excelente capacidade de retenção a baixas temperaturas e a não necessidade de ter uma tensão de regulação de carga. As desvantagens mais críticas das baterias de níquel-cádmio são o seu elevado custo e sua aplicação ser muito específica em comparação com as baterias de ácido de chumbo.

1.3.4.4 Inversor

O inversor é o equipamento responsável por converter a corrente contínua (c.c), gerada pelo painel fotovoltaico, em corrente alternada (c.a) que alimentará as cargas em um sistema fotovoltaico.

Existem basicamente dois tipos de inversores atualmente no mercado: os que produzem onda senoidal modificada e os que produzem onda senoidal pura. A diferença entre eles é sutil, porém significativa quanto à forma de operar certas cargas. O inversor de onda senoidal modificada pode suprir de forma satisfatória a maioria dos equipamentos e eletrodomésticos de uma residência. Tem um custo menor, porém, pode apresentar problemas com alguns tipos de equipamentos de precisão como impressora a laser, relógios digitais e carregadores de bateria para equipamentos sem fio. O inversor de onda senoidal pura é projetado para fornecer energia de qualidade igual ou superior à fornecida pela concessionária. Uma forma de dimensionamento de um inversor e também dos demais equipamentos descritos anteriormente será mostrado no capítulo 4, onde será mostrado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado.

2 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

2.1 Histórico

A aquisição de dados sempre foi uma preocupação das sociedades organizadas, pois de posse de dados concretos o processo da tomada de decisão torna-se menos perceptível a erros. Hoje sabe-se que o fluxo de informações é muito grande e se tem o auxílio de várias tecnologias tanto para coletar, bem como para armazenar e processar esses dados com o intuito de utilizá-los em diferentes objetivos.

Contudo, no passado os registros de informações geográficas eram armazenados apenas em mapas e documentos em papel. Com o advento da informática a coleta, armazenamento e manipulação de dados foram otimizados garantindo assim uma maior precisão nos mapas e cruzamentos de informações [21]. Neste contexto surge o conceito de geoprocessamento.

O termo geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Esta tecnologia vem influenciando de maneira crescente as áreas da cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional [22].

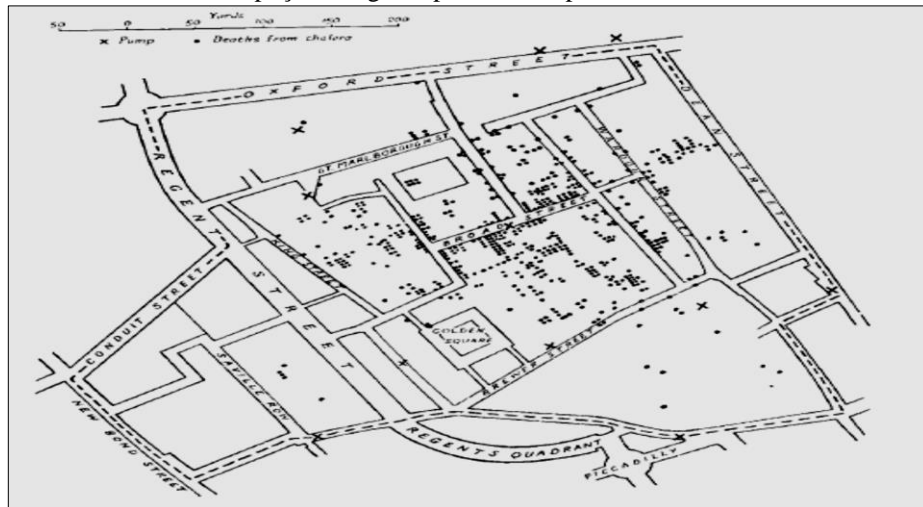
O geoprocessamento possui ferramentas denominadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem análises complexas em banco de dados georreferenciados e que ainda automatizam a produção de documentos cartográficos.

O primeiro exemplo de análise espacial corresponde à experiência do epidemiologista inglês John Snow (1813 - 1858). Para identificar o foco responsável pelo surto de cólera que afetou Londres em 1854, Snow cartografou as residências dos doentes e as sobrepôs aos poços de captação de água da cidade (Figura 2.1) [23].

Esse caso forneceu evidência empírica para a hipótese (comprovada posteriormente) de que a cólera é transmitida por ingestão de água contaminada. Essa é uma situação típica em que a relação espacial entre os dados muito dificilmente seria inferida pela simples listagem dos casos de cólera e dos poços [24].

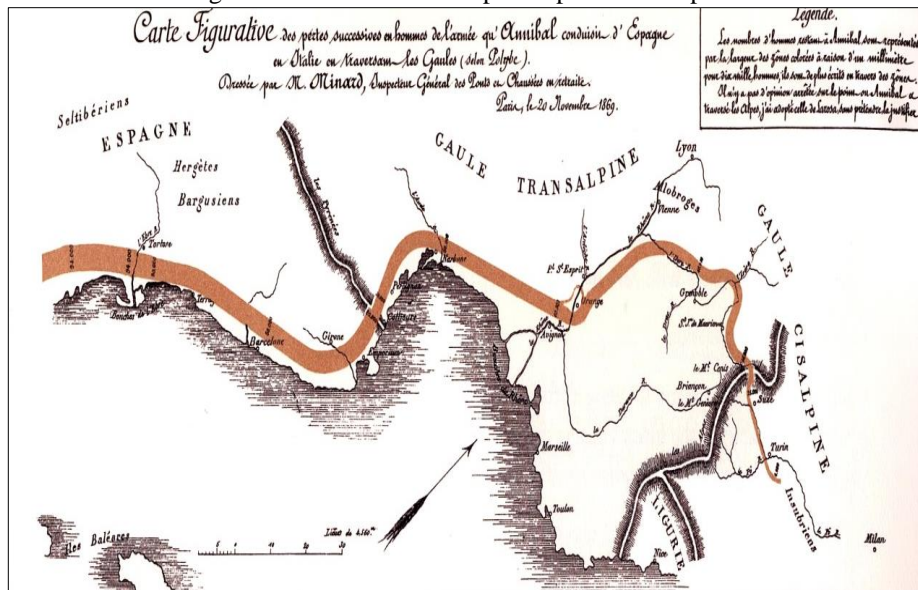
Outro exemplo é o mapa de Charles Minard de 1861 (Figura 2.2) que representa a campanha de Napoleão na Rússia e exhibe um conjunto de elementos gráficos associado ao modo como as tropas se deslocavam [23].

Figura 2.1 – Mapa de Londres com óbitos por cólera identificados por pontos e poços de água representados por cruzes.



Fonte – [25]

Figura 2.2 – Invasão Russa por Napoleão Bonaparte.



Fonte – [26]

Esses dois modelos são importantes marcos na história dos SIG, pois refletem a existência de uma base cartográfica de qualidade que permitia operações de sobreposição de dados.

As primeiras tentativas de automatizar o processamento de informações geográficas ocorreram na Inglaterra e nos Estados Unidos da América – EUA, durante os anos 50 [22]. Devido à precariedade dos recursos computacionais na época e as especificidades das aplicações, esses sistemas ainda não podiam ser classificados como sistema de informação.

Os primeiros Sistemas de Informação Geográfica surgiram na década de 60, no Canadá, como parte de um programa governamental para criar um inventário de recursos naturais. A usabilidade destes sistemas não era trivial e a capacidade de armazenamento era bastante limitada, pois não existiam soluções comerciais disponíveis ao usuário.

Já por volta dos anos 70, foram desenvolvidos novos e mais acessíveis recursos de hardware, o que tornou viável o desenvolvimento de SIGs comerciais. Foi então que a expressão *Geographic Information System* – GIS foi criada. Nessa época, surgem no mercado, os primeiros sistemas de CAD – *Computer Aided Design*, ou projeto assistido por computador, que aperfeiçoaram em muito as condições para o desenvolvimento de desenhos e plantas para engenharia, e serviram de alicerce para os primeiros sistemas de cartografia automatizada.

Ainda nos anos 70 foi desenvolvido alguns embasamentos matemáticos direcionados para a cartografia, abrangendo questões de geometria computacional. No entanto, devido aos altos valores e ao fato destes protosistemas ainda utilizarem unicamente computadores de grande porte, somente grandes empresas tinham acesso a essa tecnologia [21].

A década de 80 representa o momento quando a tecnologia de sistemas de informação geográfica inicia um período de acelerado crescimento que dura até os dias de hoje. Os SIGs, assim como outras tecnologias dependentes de recursos eletrônicos, massificaram-se com o avanço da micro informática e do estabelecimento de centros de estudo sobre o tema.

No decorrer dos anos 80, com a grande popularização e barateamento das estações de trabalho gráficas, além do surgimento e evolução dos computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados relacionais, ocorreu uma grande difusão do uso de SIG [22]. Na década atual são inúmeras as aplicações de SIG e varias organizações utilizam dessa ferramenta, devido à diminuição do custo de hardware e software e a facilidade de acesso à informação geográfica.

Os Sistemas de Informação Geográfica são classificados em três gerações. A primeira geração, CAD, tinha como característica o suporte computacional ao desenho de mapas e precário acesso a banco de dados. A segunda geração, fundamentada em banco de dados geográfico, caracteriza-se pela utilização do ambiente cliente-servidor, juntamente com banco de dados relacionais e recursos suplementares de processamento de imagens. A terceira geração apresenta como característica o gerenciamento de grandes bancos de dados geográficos e acesso por meio de redes locais e remotas [27]. Um resumo destas diferentes fases dos SIGs é apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Cronologia da tecnologia dos SIG.

	1ª Geração	2ª Geração	3ª Geração
Tecnologia	CAD, Cartografia	Imagens	Sistemas distribuídos
Uso Principal	Desenho de mapas	Análise espacial	Centro de dados
Ambiente	Projetos isolados	Cliente-servidor	Multi-servidores
Sistemas	Pacotes separados	Sistema integrado	Interoperabilidade

Fonte – [21]

2.2 O que é um sistema de informação geográfica?

O estudo do espaço geográfico e dos aspectos ambientais pressupõe uma série de conhecimentos e informações que podem ser trabalhadas de maneira mais fácil e rápida com as novas tecnologias [28]. Nesse contexto, as geotecnologias tendem a se destacar devido à sua funcionalidade.

As geotecnologias são novas tecnologias ligadas às geociências e correlatas, as quais trazem avanços significativos no desenvolvimento de pesquisa, em ações de planejamento, em processos de gestão, manejo e em tantos outros aspectos relacionados à estrutura do espaço geográfico [28]. Dentre essas tecnologias tem-se o geoprocessamento, a qual engloba os Sistemas de Informação Geográfica.

Um SIG é uma ferramenta para trabalhar com informação georreferenciada. Definição esta que abrange um grande número de tecnologias e de outros elementos não tecnológicos, como por exemplo, o fator humano [29].

Os SIGs são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la [27].

De forma geral o conceito de SIG pode ser entendido como uma ferramenta pertencente à área do geoprocessamento, que trabalha com informações georreferenciadas, ou seja, informações que possuem coordenadas geográficas e, portanto podem ser localizadas em qualquer parte do globo terrestre. Um dos principais objetivos da utilização de um SIG é utilizá-lo como ferramenta para auxiliar na tomada de decisão. Os SIGs integram software, métodos, dados, hardware e recursos humanos, conforme visto na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Componentes de um SIG.



Fonte – [30].

2.2.1 Dados

Os dados são necessários para fazer com que o resto dos componentes em um SIG possa funcionar realmente, pois sem os dados as outras partes de um sistema de informação geográfica não têm funcionalidade.

É imprescindível conhecer as formas de gerenciamento e armazenamento de dados geográficos em plataformas digitais, pois na maioria das vezes a quantidade de informação é muito grande, o que pode vir dificultar os trabalhos no SIG [29].

2.2.2 Metodologias

Um SIG sempre incorpora uma série de metodologias que permitem as análises de dados espaciais e, conseqüentemente, a obtenção dos resultados. Estas metodologias representam processos que podem ser simples ou bastante complexos e que podem resultar da aplicação em um ou mais campo de atuação [29]. Sendo que podem ir desde simples consultas ou medições até elaborados modelos que objetivam resultados complexos.

2.2.3 Hardware

São os recursos necessários para aquisição, análise e manipulação dos dados. Dentre estes equipamentos têm-se os instrumentos de medição das variáveis de interesse, que de acordo com o tipo de variável a ser trabalhada, exige uma determinada opção de tecnologia

disponível no mercado. Para a análise e manipulação destas informações coletadas, utiliza-se um computador que precisa de uma boa capacidade de processamento, pois dependendo da aplicação SIG, o banco de dados pode ser bastante extenso.

2.2.4 Recursos humanos

Por mais que boa parte das operações em SIG seja feita por equipamentos e computadores, ainda assim se faz necessária a presença do fator humano, pois é ele quem vai gerenciar o sistema, interpretar os resultados e apresentar uma decisão conforme o objetivo da aplicação SIG em desenvolvimento.

2.2.5 Software

O software SIG representa o alicerce dos mecanismos de processamento e compreende uma coleção integrada de programas de computador que implementa funções de armazenamento, processamento e visualização. As três principais partes de um software SIG são a interface com o usuário, as ferramentas e o gerenciamento de dados [31].

Essas três partes podem estar localizadas em apenas um computador ou espalhadas por diversas máquinas. Existem quatro tipos principais de configurações de arquiteturas do sistema computacional utilizados na implementação de um SIG: desktop, cliente-servidor, desktop central e servidor central.

Há soluções tanto comerciais, como gratuitas disponíveis aos usuários. Como exemplos dos principais produtos comerciais, tem-se o ArcGIS, o AutoCAD Map, o Bentley Map e o GeoMedia. Como exemplos das principais soluções gratuitas, tem-se o Grass GIS, o Quantum GIS, o gvSIG, o SagaGIS.

2.3 Fundamentos cartográficos e geodésicos

A característica principal da informação georreferenciada é que ela tem uma localização no espaço, particularmente no espaço terrestre, esta localização dá-se através de coordenadas que a definem de forma adequada, o que implica na necessidade de estabelecer um sistema que possa expressar estas coordenadas [29].

O estabelecimento de um sistema tais referência que possa expressar a localização de um determinado ponto, não é uma tarefa simples e requer previamente conhecimentos que

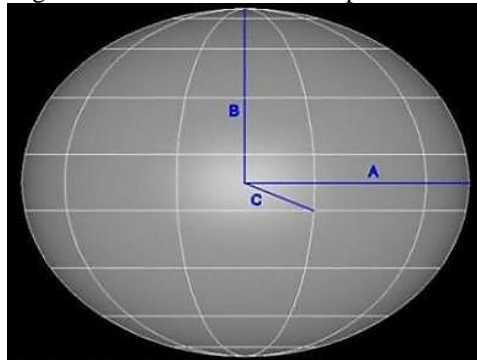
vão desde ideias físicas até complexos modelos matemáticos e geométricos. A geodesia é a ciência encarregada de prover modelos que venham responder o objetivo básico de como representar a forma da Terra, para que se possa representar e localizar pontos em qualquer parte da superfície.

Um dos objetivos principais da geodésia é estabelecer um sistema de referência que possa definir um conjunto de pontos cujas coordenadas sejam conhecidas com elevada precisão para que posteriormente, com base nestes pontos, seja determinada a localização de qualquer ponto no sistema de referência definido [29].

2.3.1 Elipsóide de referência e geóide

Desde a antiguidade haviam numerosas hipóteses sobre a forma da Terra, as quais vão desde supor que a mesma seria plana em vez de admitir evidências de que esta possui a forma esférica. Contudo, a Terra não é uma esfera perfeita, já que sua própria rotação teria modificado sua forma e teria provocado um achatamento nos polos [29], como mostra a Figura 2.4. Em que A representa o semieixo maior ou equatorial, B o semieixo menor ou polar e C o grau de achatamento.

Figura 2.4 – Forma esférica do planeta terra.



Fonte – [32].

Por tanto, a melhor forma de representar a superfície da Terra é imaginando que a mesma possui a forma de um elipsóide, pois o erro é menor na hora de elaborar mapas de zonas não muito extensas [29]. Devido à dimensão do planeta Terra, surgiram vários elipsóides locais, o que provocou a necessidade de definir elipsóides genéricos que fossem aceitos em várias zonas. Atualmente o elipsóide bastante utilizado é o WGS – 84, pois ele é utilizado pelo sistema GPS (*global positioning system*). A Tabela 2.2 mostra os principais elipsóides de referência atualmente.

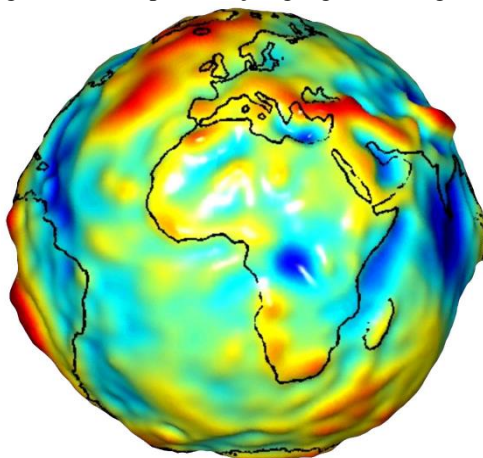
Tabela 2.2 – Principais elipsóides e seus parâmetros.

Elipsóide	Semieixo maior	Semieixo menor	Achatamento
Australian National	6378160,000	6356774,719	298,250000
Bessel 1841	6377397,155	6356078,963	299,152813
Clarke 1866	6378206,400	6356583,800	294,978698
Clarke 1880	6378249,145	6356514,870	293,465000
Everest 1956	6377301,243	6356100,228	300,801700
Fischer 1968	6378150,000	6356768,337	298,300000
GRS 1980	6378137,000	6356752,314	298,257222
SGS 85	6378136,000	6356751,302	298,257000
South American 1969	6378160,000	6356774,719	298,250000
WGS 72	6378135,000	6356750,520	298,260000
WGS 84	6378137,000	6356752,314	298,257224

Fonte – [29].

O geóide é a outra superfície de referência definida como a superfície tridimensional, cujos pontos da atração gravitacional são constantes. Trata-se de uma superfície equipotencial que resulta supor que os oceanos fiquem em repouso a um nível médio (o nível na realidade é variável devido as marés, correntes e outros fenômenos) e prolongar estes por baixo da superfície terrestre [29], Figura 2.5. A particularidade do geóide reside em que em todos seus pontos, a direção da gravidade é perpendicular à superfície.

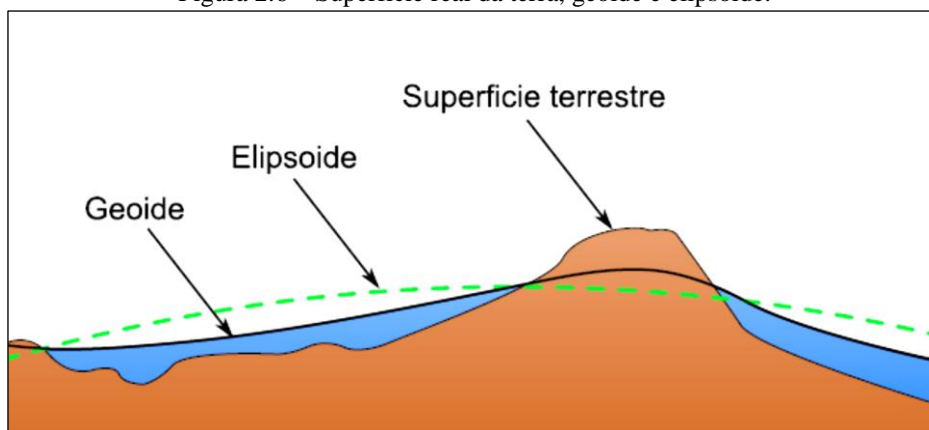
Figura 2.5 – Representação geográfica do geóide.



Fonte – [29]

Como pode ser observado na Figura 2.5, o geóide não é uma superfície regular e os elipsóides são baseados nos geóides, e esta diferença chega a ± 100 metros. Estas diferenças são conhecidas como alturas geodais. A Figura 2.6 mostra a diferença entre as três superfícies fundamentais na geodésia: a superfície real da terra, geóide e elipsóide.

Figura 2.6 – Superfície real da terra, geóide e elipsóide.



Fonte – [28]

2.3.2 Datum geodésico

Quando se trabalha com elipsóide genérico, este situa-se de tal modo que tanto a posição de seu centro de gravidade como o seu plano equatorial coincidem com os terrestres, porém quando o elipsóide é local não existe essa propriedade.

Por tanto, surge o conceito de *datum*, que é um conjunto formado por uma superfície de referência (o elipsóide) e um ponto que esteja ligado ao geóide. Esse ponto é chamado de ponto astronômico fundamental ou simplesmente de ponto fundamental e nele o elipsóide é tangente ao geóide [29].

2.3.3 Sistemas de coordenadas

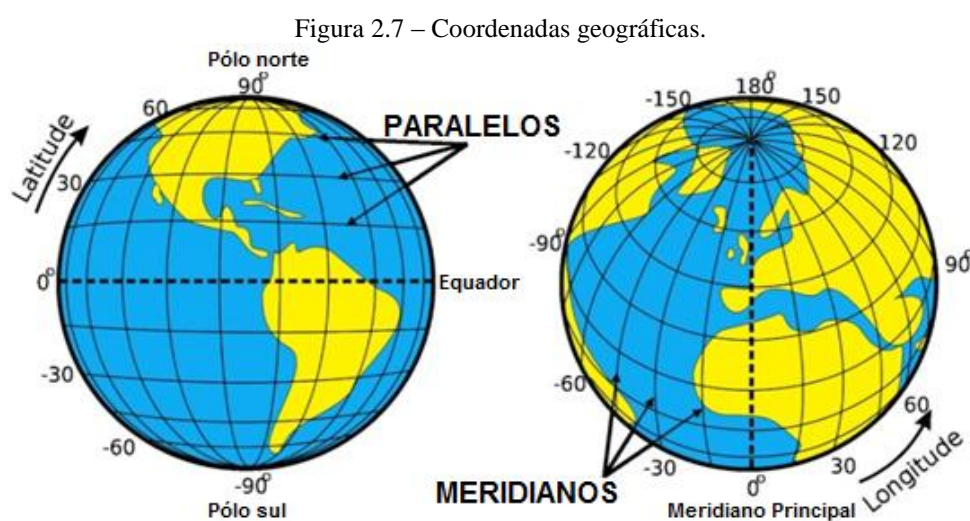
A superfície de referência utilizada para expressar a forma do planeta Terra é uma elipsóide, por tanto, recorreu-se aos conceitos da geometria esférica para definir o sistema de referência de cada lugar na superfície terrestre. Deles se derivam os conceitos latitude e longitude, utilizados para estabelecer as coordenadas geográficas de um ponto.

2.3.4 Coordenada geográfica

O sistema de coordenadas geográficas é um sistema de coordenadas esféricas mediante o qual um ponto localiza-se com dois valores angulares: a latitude e a longitude, o que pode ser visto na Figura 2.7.

A latitude é a distância angular entre o plano do equador e um ponto na superfície terrestre, unido perpendicularmente ao centro do planeta, com variação entre 0° a 90° nas direções norte e sul. As linhas formadas por pontos da mesma latitude são denominadas de paralelos e formam círculos concêntricos ao equador.

A longitude é o ângulo formado entre o ponto considerado e o meridiano de origem (normalmente, Greenwich = 0°), com variação entre 0° e 180° , nas direções leste e oeste desse meridiano. As linhas formadas por pontos de igual longitude são denominadas de meridianos e convergem para os pólos.



Fonte – [33].

2.4 Importância de um SIG

Os SIGs mostram-se como uma classe de sistema de informação bastante importante, pois são sistemas que controlam não apenas eventos, atividades e coisas, mas também onde esses eventos, atividades e coisas acontecem ou existem [31].

Saber o local onde algo ocorre pode vir a ser de extrema importância, caso seja necessário ir ou enviar alguém até lá para adquirir ou levar uma determinada informação,

além de ser a informação básica necessária ao monitoramento mais apurado de uma determinada operação.

Nesse sentido, praticamente todas as atividades e decisões humanas envolvem um componente geográfico, e este componente é de extrema importância. Outra característica que justifica a importância dos SIGs está ligada ao uso destes sistemas de informação para trabalhar com situações que necessitem de escolhas complexas e difíceis, chegando a ser em grande parte única.

2.5 Bancos de dados geográficos

A utilização de um SIG exige a existência de um banco de dados georreferenciado, ou seja, de dados portadores de registros referenciados a um sistema de coordenadas conhecido [28].

De todos os componentes de um SIG, o correspondente aos dados é o pilar fundamental que sustenta os restantes. Os dados são o combustível que alimenta o restante dos componentes e que sem eles um SIG perde o completamente o sentido e a utilidade. São os componentes mais interrelacionados e estão conectados de forma inseparável a todos os outros componentes de um SIG.

Esse tipo de informação se distingue das demais justamente devido a esta característica. Os dados geográficos relacionam um determinado tipo de informação com uma localização específica no globo terrestre.

Os dados são necessários para a visualização, análise e para dar sentido a tecnologia SIG. No que se refere ao fator humano dentro de um SIG, é uma grande medida gerenciar esses dados e tirar deles o maior proveito possível, buscando e extraindo o valor que estes podem ter em um determinado contexto de trabalho.

Portanto, os bancos de dados geográficos são fundamentais em Sistema de Informação Geográfica, e todo esforço dedicado a seu estudo e ao seu melhor gerenciamento será sempre positivo dentro de qualquer trabalho com SIG [29].

2.5.1 Modelos de dados geográficos

Existem dois modelos fundamentais, a saber: o modelo vetorial e o modelo matricial ou também denominado de *raster*. No modelo vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas [22], já o modelo *raster*

representa a discretização, célula a célula, de fenômenos ou entidades espaciais como uma superfície contínua [34].

2.5.1.1 Dados vetoriais

O modelo vetorial é adequado para representar objetos espacialmente discretos, ou seja, todas as entidades espaciais que possam ser claramente delimitadas. Como exemplo podem ser citadas limites administrativos, tipos de solos, estradas, rios, fontes etc. [34].

Dados vetoriais podem assumir três formas, com complexidade crescente:

- Pontos – Uma única coordenada (x, y) representa um local geográfico discreto;
- Linhas – Múltiplas coordenadas $(x_1 y_1, x_2 y_2, x_3 y_4, \dots x_n y_n)$ juntas e ordenadas, como representando o desenho de uma linha do ponto $(x_1 y_1)$ ao ponto $(x_2 y_2)$ e assim por diante. Estas partes entre cada ponto são consideradas segmentos de linha. Elas têm um comprimento e pode-se dizer que essas linhas têm uma direção, com base na ordem dos pontos. Tecnicamente, uma linha é um único par de coordenadas ligado entre si, enquanto uma sequência de linhas são múltiplas linhas conectadas.
- Polígonos – Quando as linhas são conectadas por mais de dois vértices, e o último vértice esta na mesma posição que o primeiro é chamado de polígono. A principal característica dos polígonos é que existe uma área fixa dentro deles.

2.5.1.2 Dados matriciais

No modelo matricial a área de estudo é dividida em pequenas células regularmente distribuídas na forma de quadrados mínimos. Esse modelo serve para a representação de fenômenos espaciais com ocorrência contínua, fenômenos que podem assumir outro valor no espaço. Exemplos: a distribuição de substâncias tóxicas, altitude do terreno sobre o nível do mar, valor de pH do solo etc. [34].

A forma mais facilmente reconhecida de dados matriciais são imagens digitais de satélites ou fotografias aéreas. Relevos sombreados ou modelos digitais de elevação também são representados como dados matriciais. Qualquer tipo de feição de mapa pode ser representado como dados *raster*, mas existem algumas limitações.

Um dado *raster* é uma grade regular composta de células, ou no caso de imagens, de pixels. Essa estrutura tem um número fixo de linhas e colunas. Cada célula tem um valor

numérico e certa dimensão geográfica (por exemplo, 30x30 metros de tamanho). Múltiplos *raster* sobrepostos são usados para representar imagens usando mais de um valor de cor (ou seja, um *raster* para cada conjunto de valores de vermelho, verde e azul são combinados para criar uma imagem colorida).

Imagens de satélite também representam dados em múltiplas "bandas". Cada banda é essencialmente um *raster* separado e espacialmente sobreposto, onde cada banda guarda valores de certos comprimentos de onda da luz. Um *raster* com células menores pode dar mais detalhes, mas ocupará mais espaço em arquivo. O segredo é encontrar o equilíbrio ideal entre o tamanho da célula pensando no armazenamento e levando também em consideração a análise e mapeamento necessários.

2.5.2 Banco de dados geográficos *on-line*

Com o aperfeiçoamento dos SIGs, houve a necessidade de melhoria nos modos de aquisição e manipulação dos bancos de dados geográficos. Uma forma interessante de distribuição dos dados é através da rede mundial de computadores, contudo nem sempre é possível tornar essas informações disponíveis sem cobrar um valor monetário por isso, devido ao alto custo para aquisição e tratamento desses dados, entretanto, já existem várias bases de dados geográficos que podem ser acessadas por qualquer pessoa através da internet de forma gratuita, como por exemplo, a base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, que trazem várias informações importantes acerca dos municípios brasileiros, como a área abrangente, o número de habitantes, densidade demográfica, Produto Interno Bruto – PIB, dentre outros.

2.6 Emprego de um SIG

As aplicações SIG podem ser as mais variadas possíveis e incluem mapeamento de base topográfica, modelagem socioeconômica e ambiental, modelagem global e ensino. Em termos gerais, as aplicações de SIG podem ser classificadas como: tradicionais; em desenvolvimento e novas [31].

As aplicações mais antigas incluem áreas militares, de governos, ensino e serviços de água e energia. Nos últimos 20 anos houve um amplo desenvolvimento no comércio, como serviços bancários, financeiros, transporte, logística, imobiliário e análise de mercado, já na última década teve o aumento de aplicações pessoais e de consumidores usando serviços

baseados na localização e novas aplicações preocupadas com desastres, gerenciamento de emergências, segurança, inteligência e contraterrorismo [31].

Uma das aplicações mais usuais atualmente é a previsão do tempo, pois é uma tarefa bastante complexa que envolve robustos modelos matemáticos e sofisticados sistemas de gerenciamento de dados.

Outra aplicação bastante conhecida é a consulta de mapas *on-line* ou *off-line* para se determinar a localização de certo lugar, rotas de ônibus, condição do trânsito, etc, assim como para auxiliar na navegação por GPS, uma importante ferramenta para quem reside em grandes centros urbanos.

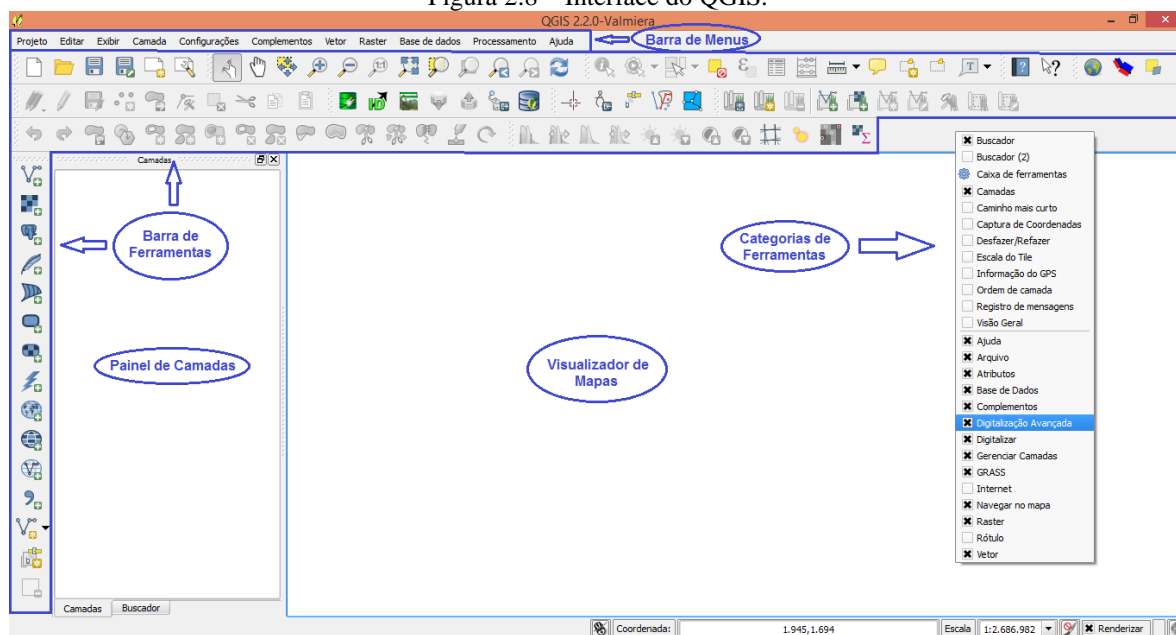
No caso particular, para este trabalho o SIG será empregado para a quantificação da geração de energia elétrica utilizando a fonte renovável solar, através do mapeamento dos vários municípios da Ilha do Marajó utilizando dados fornecidos pelo INPE.

2.7 Quantum GIS

Os SIGs são um tipo especial de sistema de informação utilizados para tratar, sintetizar, pesquisar, editar e visualizar informações, geralmente armazenadas em bases de dados computacionais. São ferramentas que permitem trabalhar com informação espacial (geográfica), integrando e sobrepondo vários tipos de informações. Neste trabalho utiliza-se o SIG Quantum GIS ou QGIS.

O Quantum GIS (QGIS) é um SIG de código aberto, que teve o início do seu desenvolvimento a partir de maio de 2002. É uma boa ferramenta para quem já está familiarizado na área de SIG ou para quem está começando a elaborar seus primeiros mapas [35]. O Quantum GIS é um dos mais populares softwares SIG da atualidade [30], possui uma interface gráfica amigável que pode ser customizada completamente de acordo com as necessidades do usuário. A Figura 2.8 mostra a tela inicial do programa, na versão 2.2 em sua configuração padrão.

Figura 2.8 – Interface do QGIS.



Fonte – Baseado em [36]

O programa possui quatro áreas principais (Figura 2.8): a Barra de Menu, Visualizador de Mapas, Painel de Camadas e a Barra de Ferramentas, as quais pode ser personalizada ativando ou desativando as categorias com um clique com o botão direito em cima da barra de ferramentas.

2.7.1 Instalação

A instalação do QGIS é muito simples. Pacotes de instalação estão disponíveis para o MS Windows e Mac OS X. Para muitas distribuições GNU/Linux estão disponíveis binários (rpm e deb) e repositórios que podem ser adicionados ao seu gerenciador de instalação. As últimas informações sobre a instalação do QGIS podem ser encontradas em <http://qgis.org/en/site/forusers/download.html>.

Uma opção bem interessante no QGIS é a possibilidade de instalação usando uma mídia externa. O QGIS permite definir uma opção – configpath, que substitui o caminho padrão (por exemplo com o /.qgis no Linux) para a configuração de usuário e faz com que o QSettings use esse diretório também. Isto permite que os usuários realizem uma instalação do QGIS usando um “flash drive” com todos os complementos e configurações, por exemplo.

2.7.2 Iniciando o QGIS

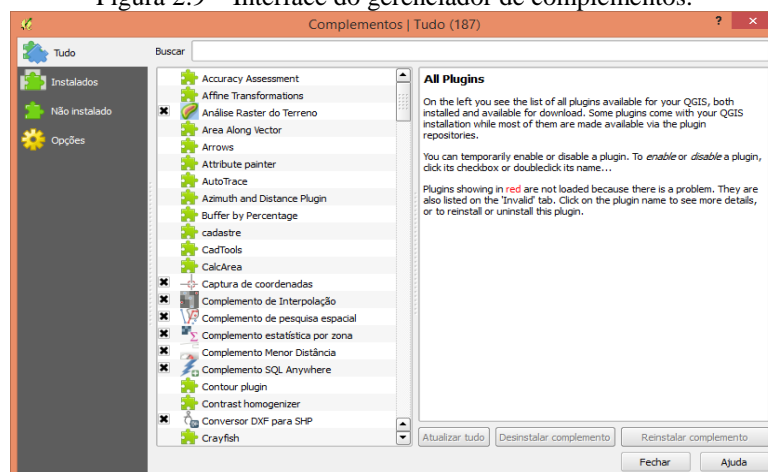
Em vários sistemas operacionais é possível iniciar o QGIS com um duplo click no ícone criado no momento da instalação. Uma outra forma de iniciar o software, é com um duplo click em arquivo de projeto do QGIS, que possui extensão *.qgs.

2.7.3 Instalar e remover complementos

O QGIS oferece muitas funcionalidades SIG comuns, fornecidas por feições nativas e complementos, como por exemplo, sobrepor dados vetoriais e *raster* em diferentes formatos e projeções, sem conversão para um formato interno comum; compor mapas e explorar interativamente dados espaciais com uma interface gráfica amigável; criar, editar, gerenciar e exportar mapas vetoriais em diversos formatos. Para isso, faz-se necessário realizar algumas configurações antes de iniciar um projeto no QGIS.

O QGIS apresenta uma série de complementos, também chamados de *plug-ins* que disponibilizam ao usuário uma série de funcionalidades. Estas ferramentas adicionais são instaladas através do gerenciador de complementos, que se encontra no Menu **complementos** e é mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Interface do gerenciador de complementos.

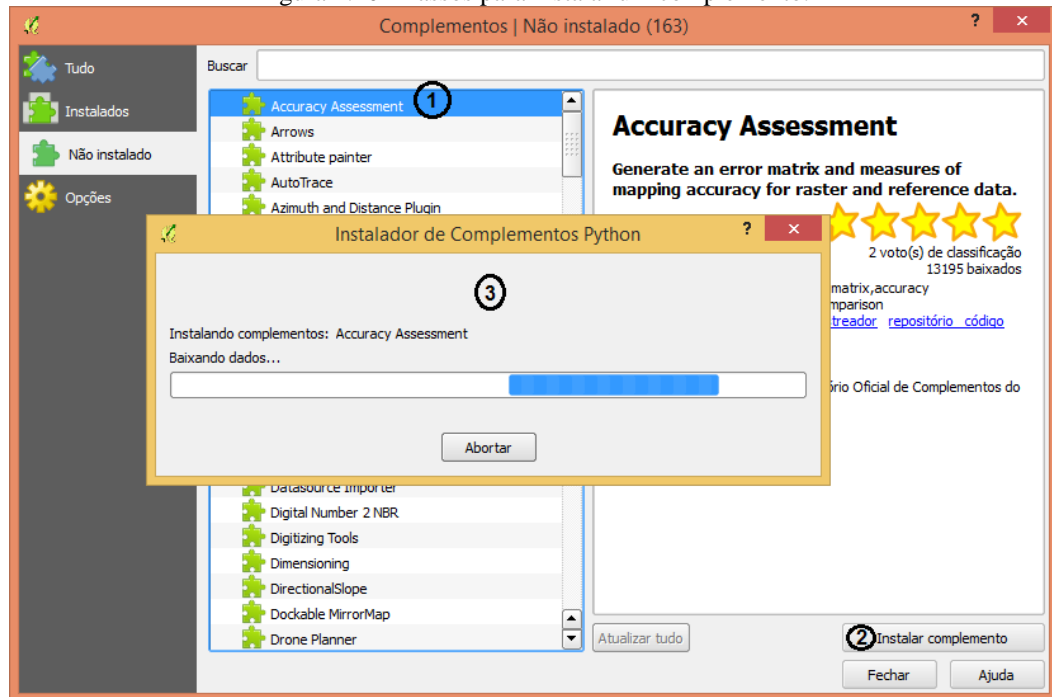


Fonte – [36]

Para instalar um complemento, primeiramente é necessário selecionar o *plug-in* desejado, em seguida pressionar o botão **instalar complemento**, que o *plug-in* será mostrado na barra de ferramentas. Para remover um *plug-in* o processo é semelhante, seleciona-se o

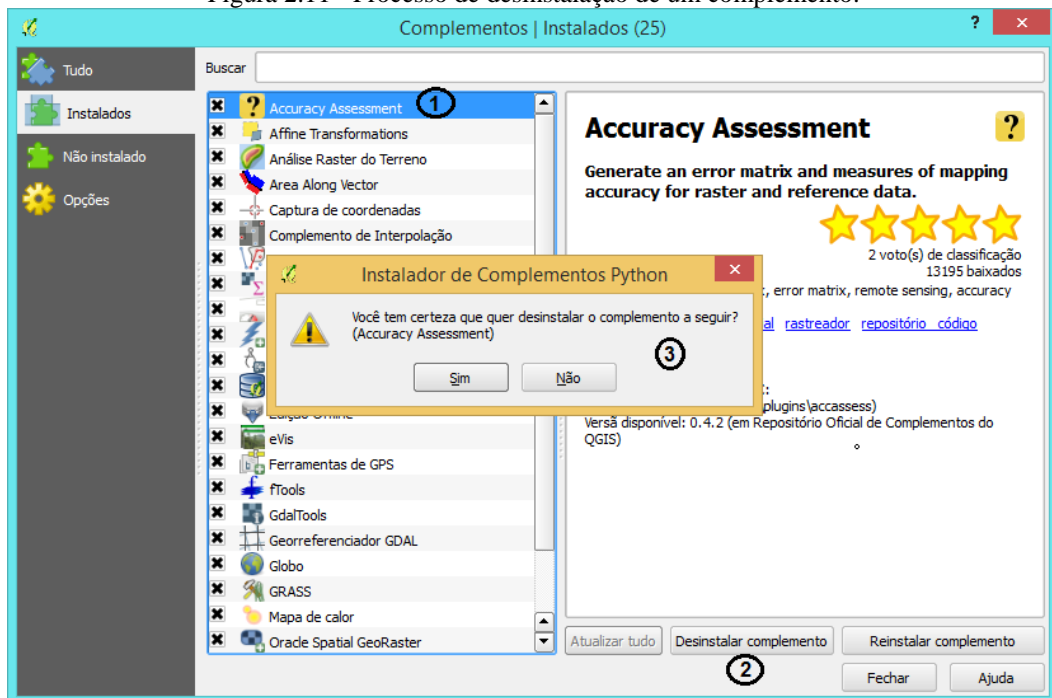
complemento efetua-se um clique no botão **desinstalar complemento** e confirma a desinstalação. Estes processos são apresentados nas Figuras 2.10 e 2.11.

Figura 2.10 - Passos para instalar um complemento.



Fonte – [36]

Figura 2.11 - Processo de desinstalação de um complemento.



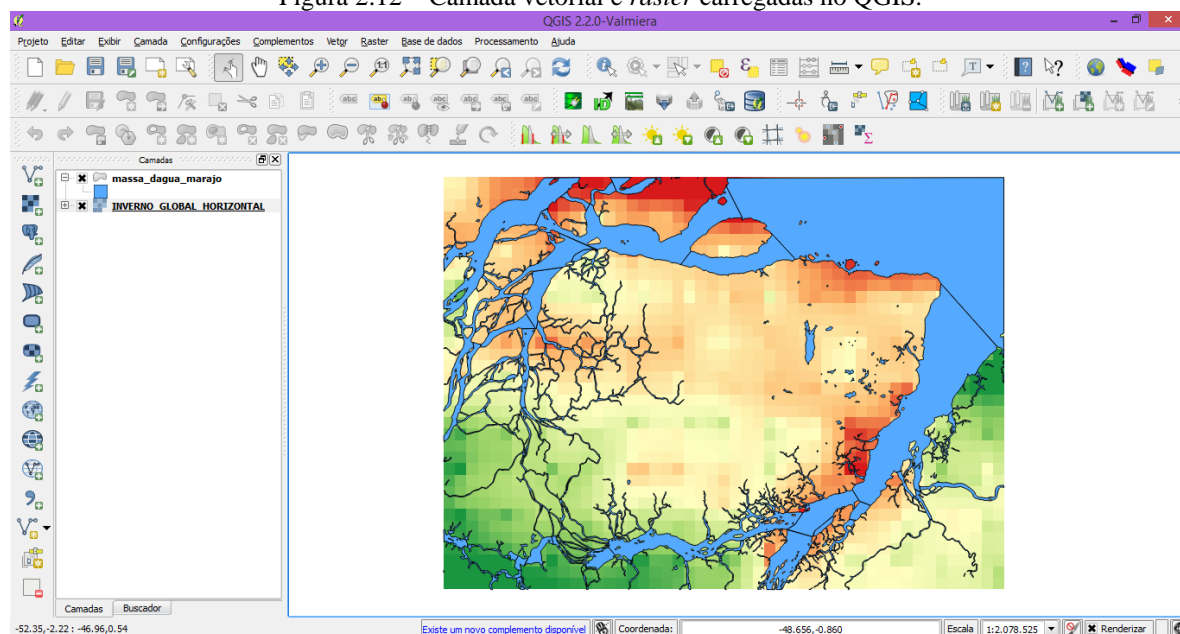
Fonte – [36]

2.7.4 Criar um novo projeto no QGIS

Para criar um novo projeto no QGIS primeiro, é necessário adicionar alguns arquivos que compõem a base de dados referente ao projeto. Estes arquivos na maioria das vezes encontram-se no formato vetorial ou *raster* e o programa reconhece cada arquivo como uma nova camada.

Para adicionar uma nova camada existem dois caminhos: através do Menu **camadas** ou pela barra de ferramentas deixando ativado a opção **gerenciar camadas**. Estas opções possuem ícones específicos para carregar uma camada vetorial ou *raster*. Em seguida basta especificar um sistema de coordenadas para ter a camada adicionada ao visualizador de mapas do QGIS, conforme a Figura 2.12.

Figura 2.12 – Camada vetorial e *raster* carregadas no QGIS.



Fonte – [36]

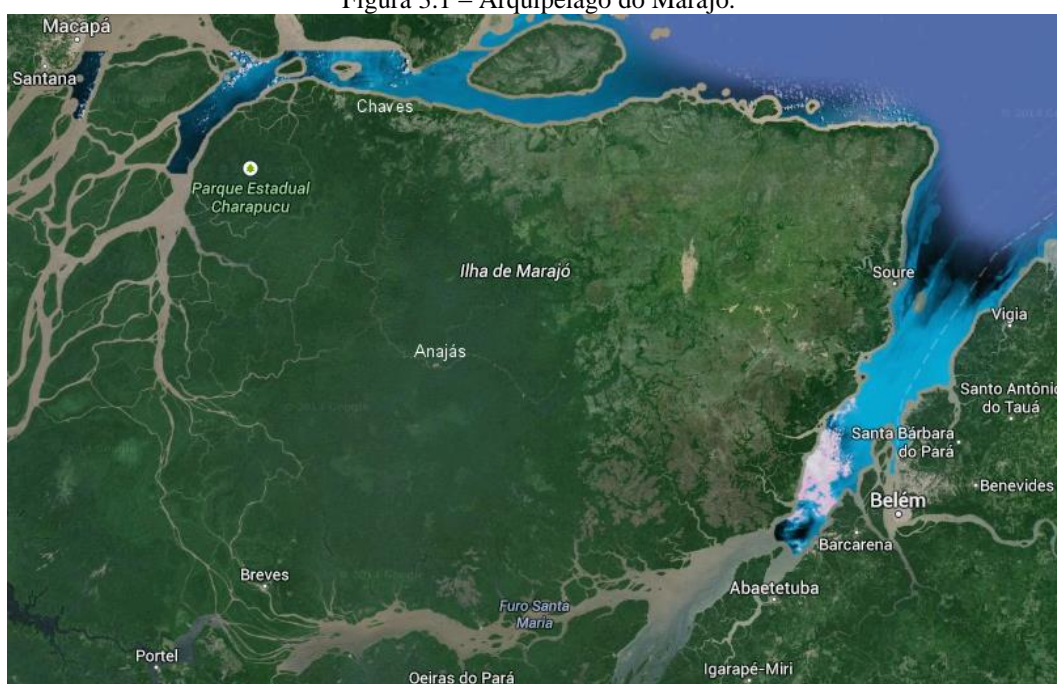
Através deste SIG, foram realizados vários procedimentos para a obtenção de vários mapas temáticos, cujo objetivo é mostrar o potencial de irradiação solar incidente nos municípios da Ilha do Marajó que posteriormente serão a base para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para uma região isolada do Arquipélago. O carregamento de camadas e outras operações neste SIG serão melhor detalhadas no próximo capítulo.

3 METODOLOGIA

3.1 Local da pesquisa

Localizado no estado do Pará, o arquipélago do Marajó, Figura 3.1, abrange 16 municípios, sendo eles: Afuá, Anajás, Bagre, Breves, Cachoeira do Arari, Chaves, Currálinho, Gurupá, Melgaço, Muaná, Ponta de Pedras, Portel, Salvaterra, Santa Cruz do Arari, São Sebastião da Boa Vista e Soure [37].

Figura 3.1 – Arquipélago do Marajó.



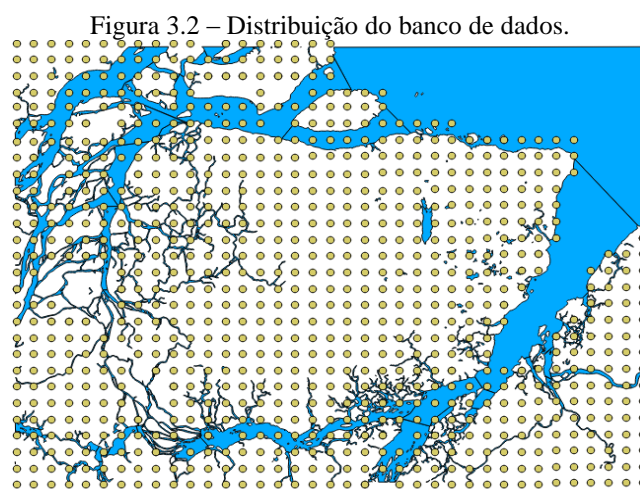
Fonte – [38]

Desses 16 municípios, somente Portel, Breves, Currálinho e Melgaço contam com a energia elétrica vinda direto de Tucuruí. Contudo, apenas as sedes dos municípios fazem uso desta energia, o que dificulta o desenvolvimento da região como um todo. Os municípios que não são atendidos pela Usina Hidroelétrica de Tucuruí contam com eletricidade produzida por termoelétricas.

Uma alternativa para amenizar o problema na eletrificação seria a implantação de sistemas de geração fotovoltaica, ou seja, sistemas que utilizam a luz do Sol para a geração de energia elétrica. Para tanto, é imprescindível saber a disponibilidade do recurso solar na Ilha. Este estudo será mostrado através de mapas temáticos elaborados através de um SIG, e sua sequência de execução é apresentada a seguir.

3.2 Banco de dados geográficos

O banco de dados foi conseguido através da tese de doutorado do Professor Dr. Trajano De Souza Viana [39], e de parceria com o INPE o qual forneceu tanto as bases cartográficas, mapa base para se trabalhar no SIG, como as médias das estimativas do total diário de irradiação solar, para o período de julho de 1995 a dezembro de 2005, em vários pontos da ilha, espaçados de 10 km em 10 km, conforme Figura 3.2.



Fonte – Autoria Própria.

Essa base de dados foi desenvolvida dentro do escopo do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), que teve início em 2001 sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente – DMA do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC do INPE. O referido projeto tinha como foco principal, promover o levantamento de uma base de dados confiável e de alta qualidade visando auxiliar no planejamento e desenvolvimento de políticas públicas de incentivo a projetos nacionais de energia solar e eólica; e atrair o capital de investimentos da iniciativa privada para a área de energias renováveis.

Os produtos voltados para a energia solar, aplicados ao Brasil, foram desenvolvidos através de parceria entre a DMA/CPTEC/INPE e o Laboratório de Energia Solar – LABSOLAR da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, fazendo uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR e de uma base georreferenciada de dados ambientais e socioeconômicos disponibilizados por diversos parceiros nacionais e internacionais e de distribuição gratuita.

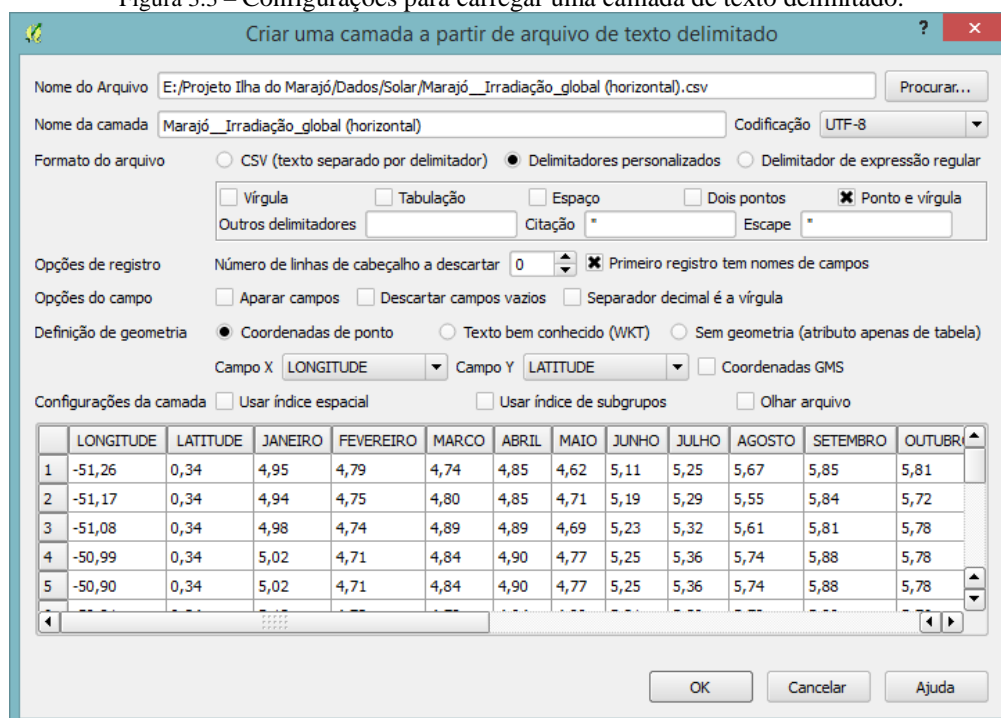
Devido ao formato em que se encontravam os dados, foi necessário realizar uma conversão na estrutura dos mesmos para que o software QUANTUM GIS – QGIS pudesse fazer a leitura correta. Então, através do menu “**salvar como**” do Microsoft Excel 2010, a planilha foi exportada para um arquivo de texto delimitado com a extensão *.CSV.

3.3 Operações no QGIS

3.3.1 Carregar o banco de dados e bases cartográficas

O banco de dados foi carregado para área de trabalho do software através do botão “**adicionar camada de texto delimitado**”. Nesta nova janela indica-se o local onde está o arquivo que contém os dados através do botão “**Procurar**”. Ao carregar o arquivo foi feita as configurações conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Configurações para carregar uma camada de texto delimitado.

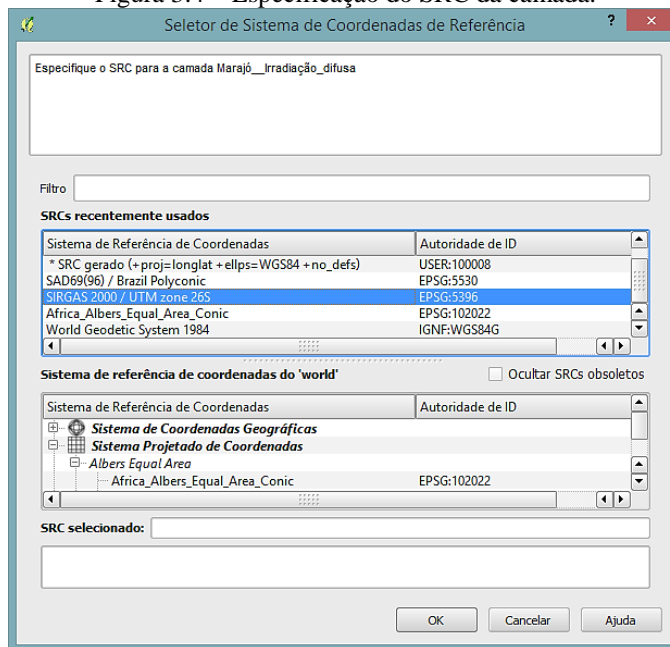


Fonte – [36].

Ao pressionar o comando “**ok**” surge uma nova janela flutuante (Figura 3.4), pedindo para indicar o Sistema de Referência de Coordenada – SRC, uma informação muito importante para que diferentes camadas não fiquem posicionadas de forma diferente uma da outra na área de trabalho do QGIS. O SRC especificado foi o Sistema de Referência

Geocêntrico para as Américas – SIRGAS 2000, pois de acordo com [28], é o SRC que vem e vai ser adotado para as Américas até 2015.

Figura 3.4 – Especificação do SRC da camada.

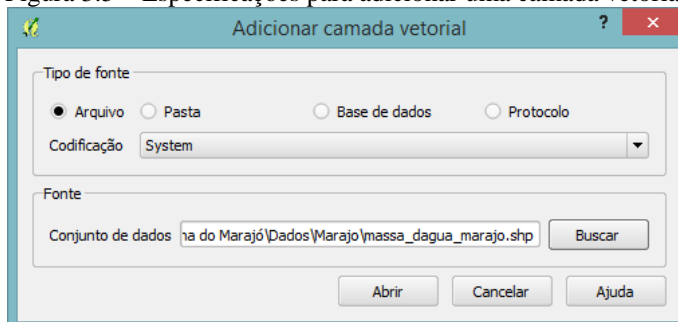


Fonte – [36]

Para mostrar as delimitações da Ilha e dos Municípios, foi necessário carregar quatro arquivos com a extensão *.shp. Os arquivos “**Municípios Marajó**”, “**Massa Dagua Marajó**”, “**Cidades Marajó**” e “**Retângulo Abrangente**” foram carregados através do botão “**adicionar camada vetorial**” mostrado na Figura 3.5. Em seguida especifica-se o novamente o SRC de cada camada conforme a Figura 3.4, citada anteriormente.

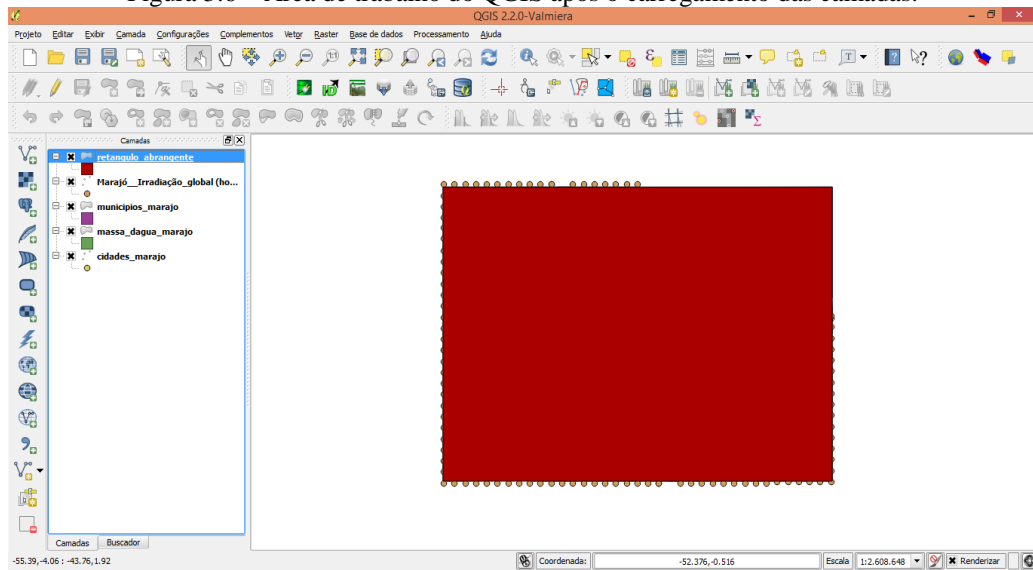
Adicionadas todas as camadas necessárias ao projeto de um novo mapa, verificou-se que havia a necessidade de organizar e configurar as propriedades das mesmas para uma melhor visualização na área de trabalho do software. A Figura. 3.6, mostra como ficou a área de trabalho após o carregamento das camadas.

Figura 3.5 – Especificações para adicionar uma camada vetorial.



Fonte – [36]

Figura 3.6 – Área de trabalho do QGIS após o carregamento das camadas.



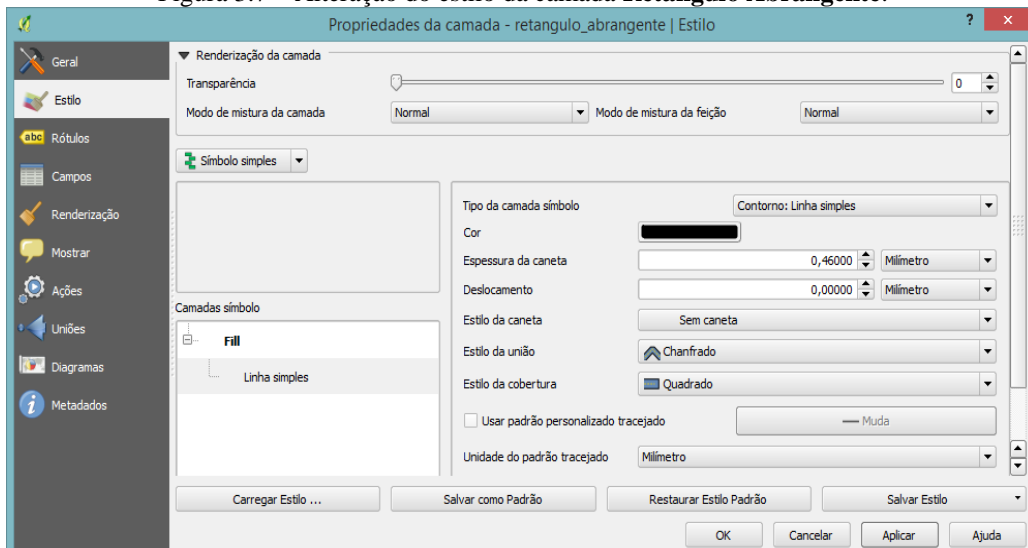
Fonte – [36]

3.3.2 Alterações nas camadas

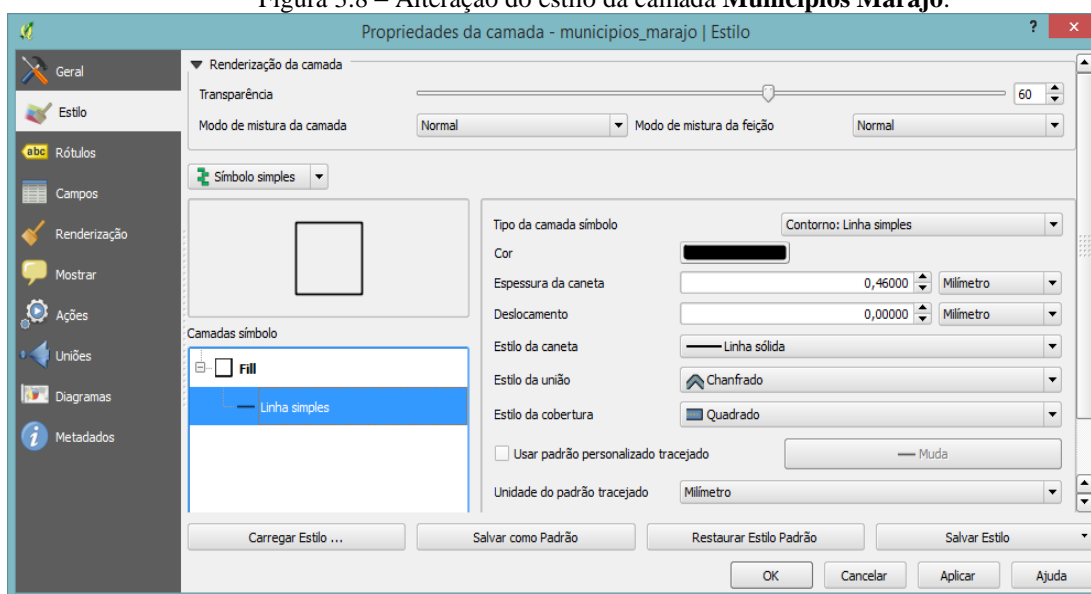
Para alterar a forma de apresentação de uma camada basta efetuar um duplo click em cima da camada desejada para que surja uma nova janela mostrando as propriedades da camada, como cor, opções de contorno, tipo de texto, etc.

Com o objetivo de obter uma melhor visualização na área de visualização de mapas do QGIS, para as camadas “**Retângulo Abrangente**”, “**Município Marajó**” e “**Massa Dagua Marajó**” alterou-se o estilo das camadas conforme a Figura 3.7, Figura 3.8 e Figura 3.9 respectivamente,

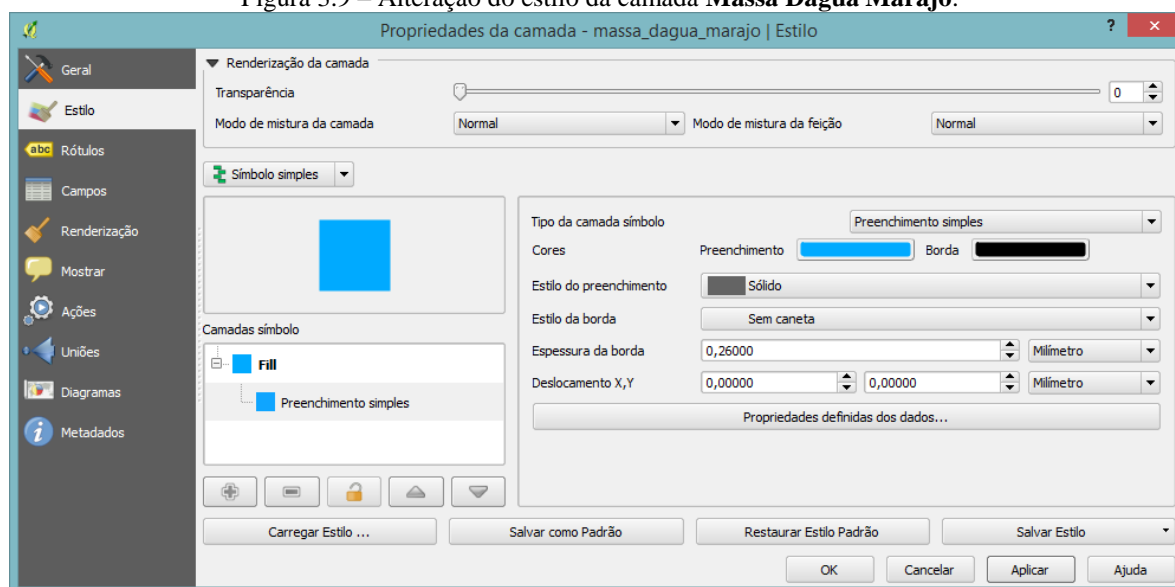
Figura 3.7 – Alteração do estilo da camada **Retângulo Abrangente**.



Fonte – [36].

Figura 3.8 – Alteração do estilo da camada **Municípios Marajó**.

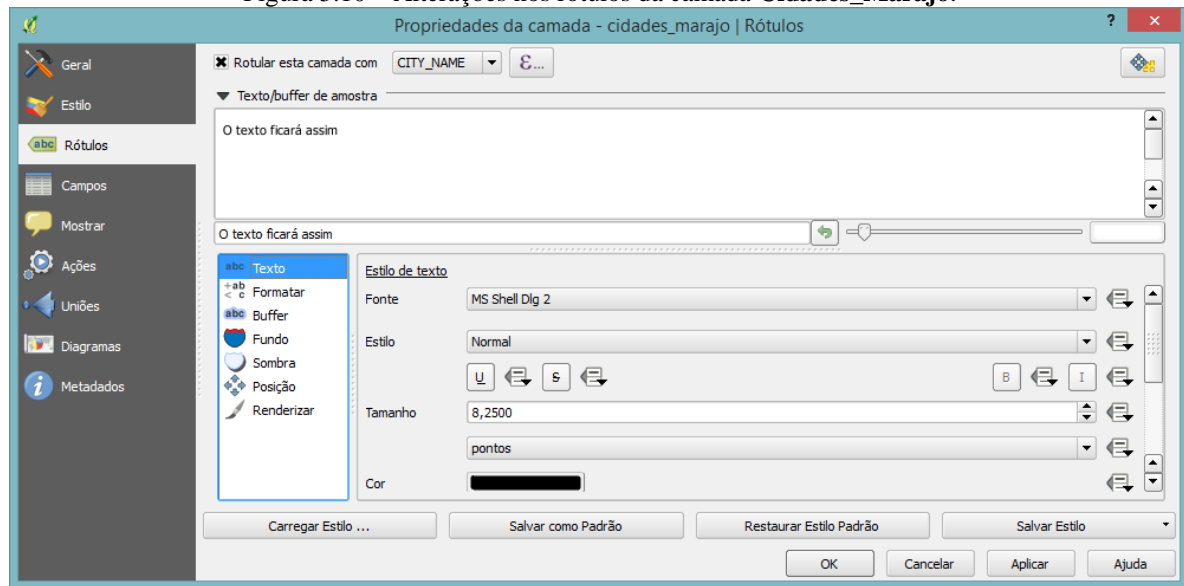
Fonte – [36]

Figura 3.9 – Alteração do estilo da camada **Massa Dagua Marajó**.

Fonte – [36].

Como a camada “**Cidades Marajó**” será utilizada apenas para mostrar os nomes das cidades, as alterações foram feitas na guia “**Rótulos**” deixando selecionado a coluna “**CITY NAME**” e alterando opções como tamanho, posição, cor, e estilo do texto e dos pontos que indicam a localização das cidades no mapa, conforme Figura 3.10.

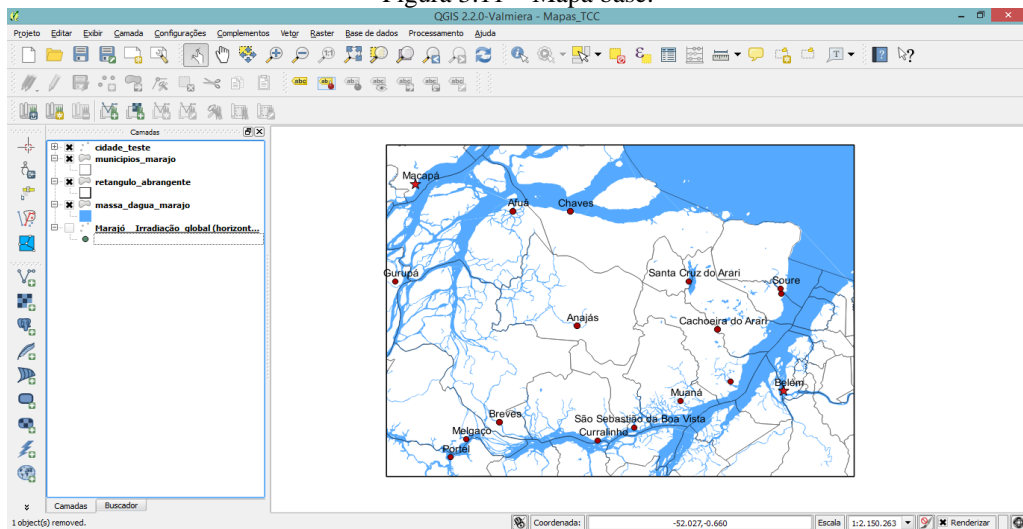
Figura 3.10 – Alterações nos rótulos da camada **Cidades_Marajó**.



Fonte – [36]

Depois destas modificações no projeto a área de trabalho do QGIS (Figura 3.11), já mostra uma base para os mapas que serão gerados posteriormete.

Figura 3.11 – Mapa base.



Fonte – [36]

3.3.3 Interpolação

Para o próximo passo utiliza-se o *plug-in* “**interpolação**”, localizado no menu “**raster**”. Este complemento utiliza uma base de dados para gerar novas camadas matriciais com uma determinada quantidade de linhas e colunas, com o objetivo de distribuir as

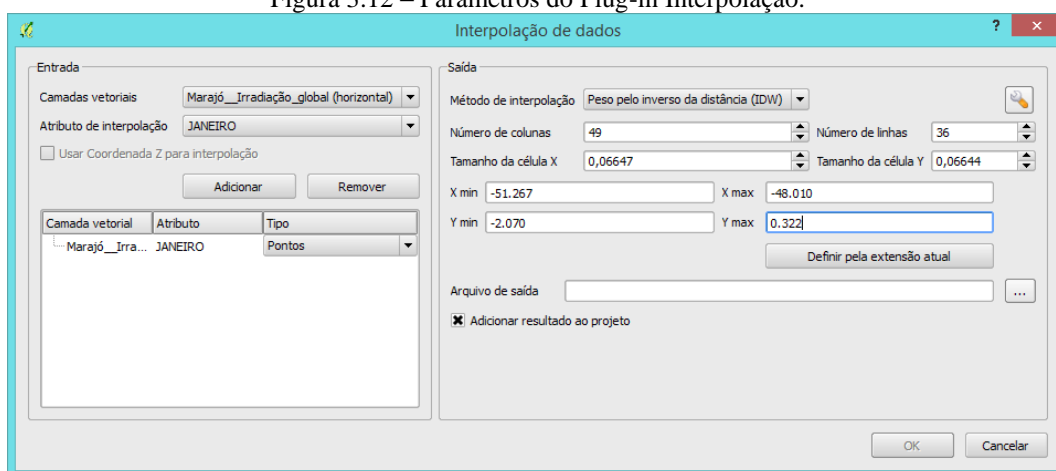
informações de forma uniforme em uma determinada região. A interface do complemento divide-se em duas partes: Entrada e Saída.

Em Entrada foi especificado a base de dados e para qual mês iria se realizar a interpolação dos valores de irradiação solar. Já para Saída o método de interpolação escolhido foi o “**interpolação triangular**”, porque apresentou um menor erro para os dados interpolados, número de colunas 60, número de linha 49, o tamanho da célula X e Y são alterados automaticamente quando se especifica os valores máximos e mínimos, esses valores foram encontrados observando os valores máximos e mínimos das coordenadas geográficas do banco de dados. A Figura 3.12 mostra estas configurações.

Após a confirmação no botão “**ok**”, o programa pede para especificar novamente o SRC, pois esse processo descrito anteriormente cria uma nova camada raster (matricial) com valores interpolados para cada pixel da imagem que será colorida posteriormete.

Esse processo foi repetido para todos os doze meses e também para a média anual e o total anual da irradiação global horizontal, gerando quatorze novas camadas no projeto.

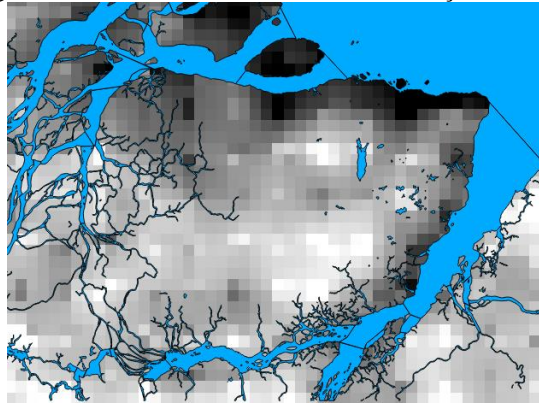
Figura 3.12 – Parâmetros do Plug-in Interpolação.



Fonte – [36]

3.3.4 Colorir as camadas interpoladas

Para o processo para colorir as novas camadas, primeiro desativa todas as novas camadas raster criadas, bem como a camada do banco de dados, para que possa-se visualizar as alterações na camada em que se esta trabalhando. Ao ativar apenas uma camada raster esta é mostrada em tom de cinza, conforme a Figura 3.13.

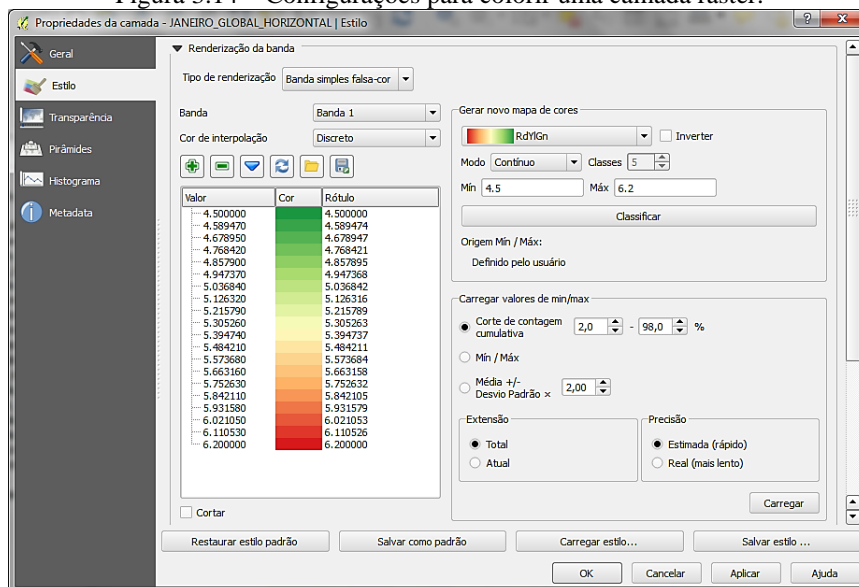
Figura 3.13 – Camada *Raster* antes da alteração no estilo.

Fonte – Autoria própria

Para alterar a cor da camada, efetua-se um duplo click na camada desejada para abrir a janela mostrando as propriedades da mesma. Na guia estilo, em tipo de renderização selecionou-se “**banda simples falsa-cor**”, em cor de interpolação escolheu-se “**discreto**” e no grupo criar novo mapa de cores foi escolhido uma paleta de cor pré definida pelo programa.

Dividiu-se o mapa de cores em 20 clases de igual intervalo, de acordo com os valores máximos e mínimos de irradiação atrelado ao banco de dados, conforme a Figura 3.14.

Figura 3.14 – Configurações para colorir uma camada raster.

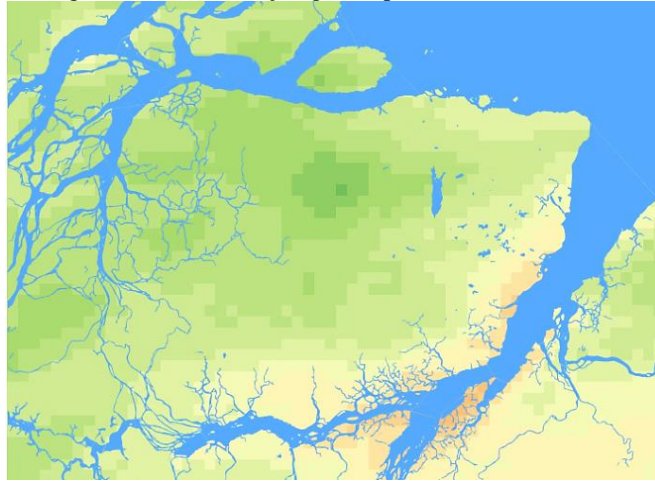


Fonte – [36].

Após classificar e aplicar o novo estilo à camada, obtém-se um mapa (Figura 3.15) mostrando os níveis de irradiação para diferentes localizações da ilha. Repetindo este processo para todas as outras camadas, obtém-se todos os mapas de irradiação global. O

próximo passo é abrir o compositor de impressão para que seja adicionado elementos como, legenda, escala e textos afim de melhor expressar as informações contidas no mapa.

Figura 3.15 – Irradiação global para o mês de Janeiro.

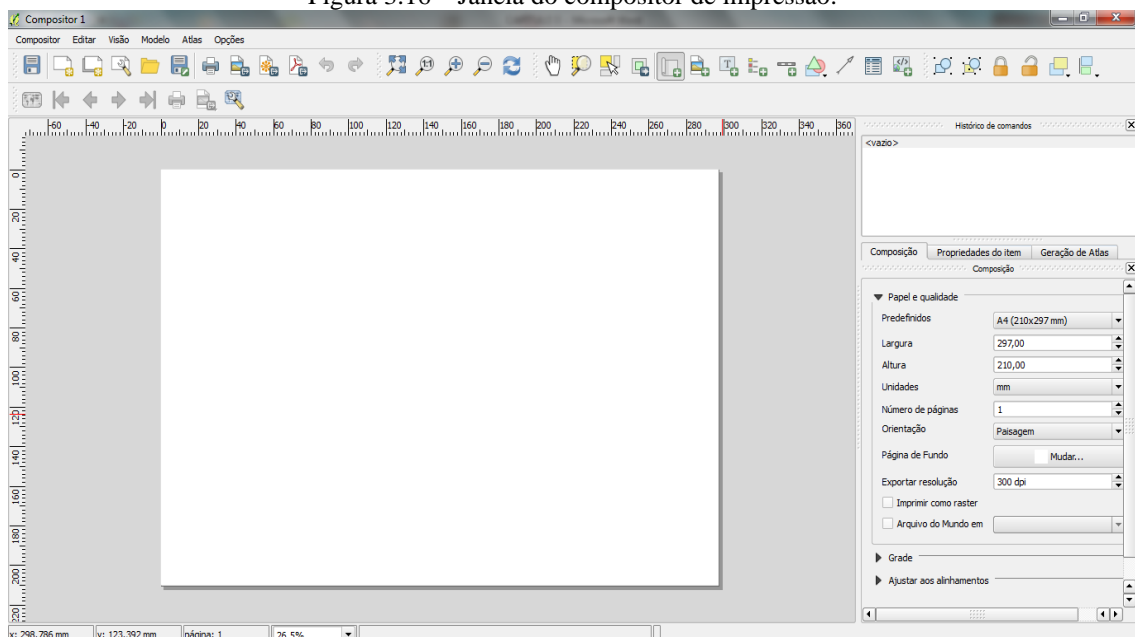


Fonte – Autoria própria.

3.3.5 Compositor de impressão

O compositor de impressão é aberto através do botão “**novo compositor de impressão**” (localizado no grupo arquivos da barra de ferramentas do QGIS), determina-se um nome para o projeto. Já com a janela do compositor de impressão aberta, Figura 3.16, configurou-se o tamanho do papel, unidades, orientação e a qualidade para o arquivo de saída.

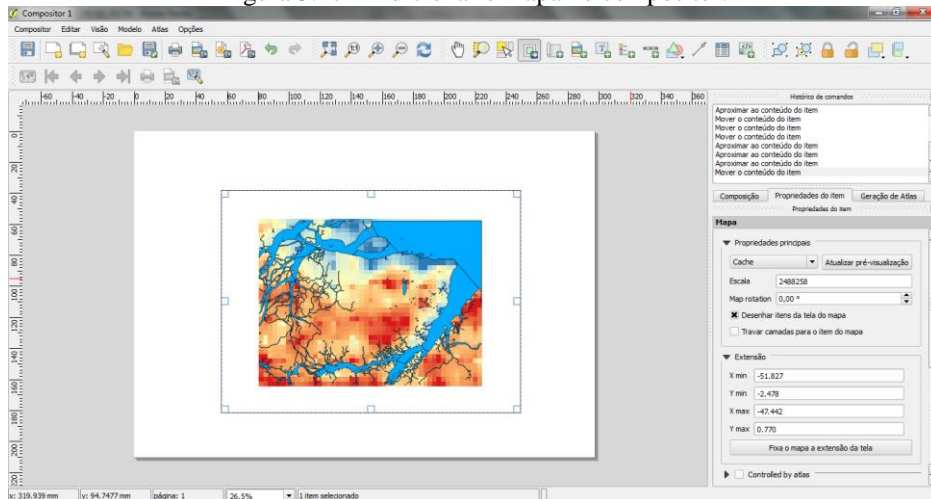
Figura 3.16 – Janela do compositor de impressão.



Fonte – [36]

O compositor mostra o mapa que está ativado na janela do QGIS. Toda alteração feita no mapa do QGIS, será realizado também no mapa do compositor de impressão. O mapa é carregado através do ícone “**adicionar novo mapa**” e desenhando um retângulo na área de desenho do compositor, conforme a Figura 3.17.

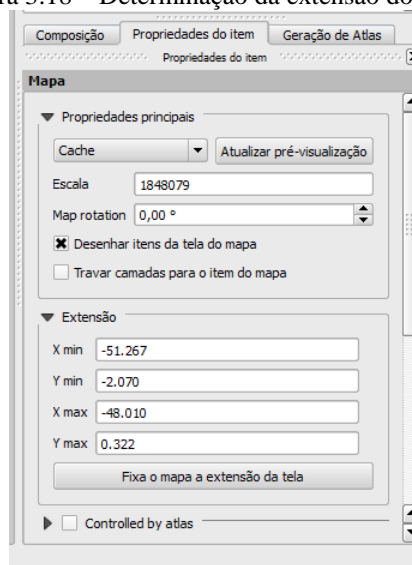
Figura 3.17 – Adicionar o mapa no compositor.



Fonte – [36]

Com o mapa já presente no compositor, verifica-se que o mesmo não ocupou todo o espaço do retângulo desenhado. Para realizar esse ajuste, seleciona-se a ferramenta “**Selecionar/mover item**” e em “**propriedades do item**” no espaço destinado para a extensão do mapa, inseriu-se os valores máximos e mínimos das coordenadas geográfica do banco de dados, de acordo como é mostrado na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Determinação da extensão do mapa.



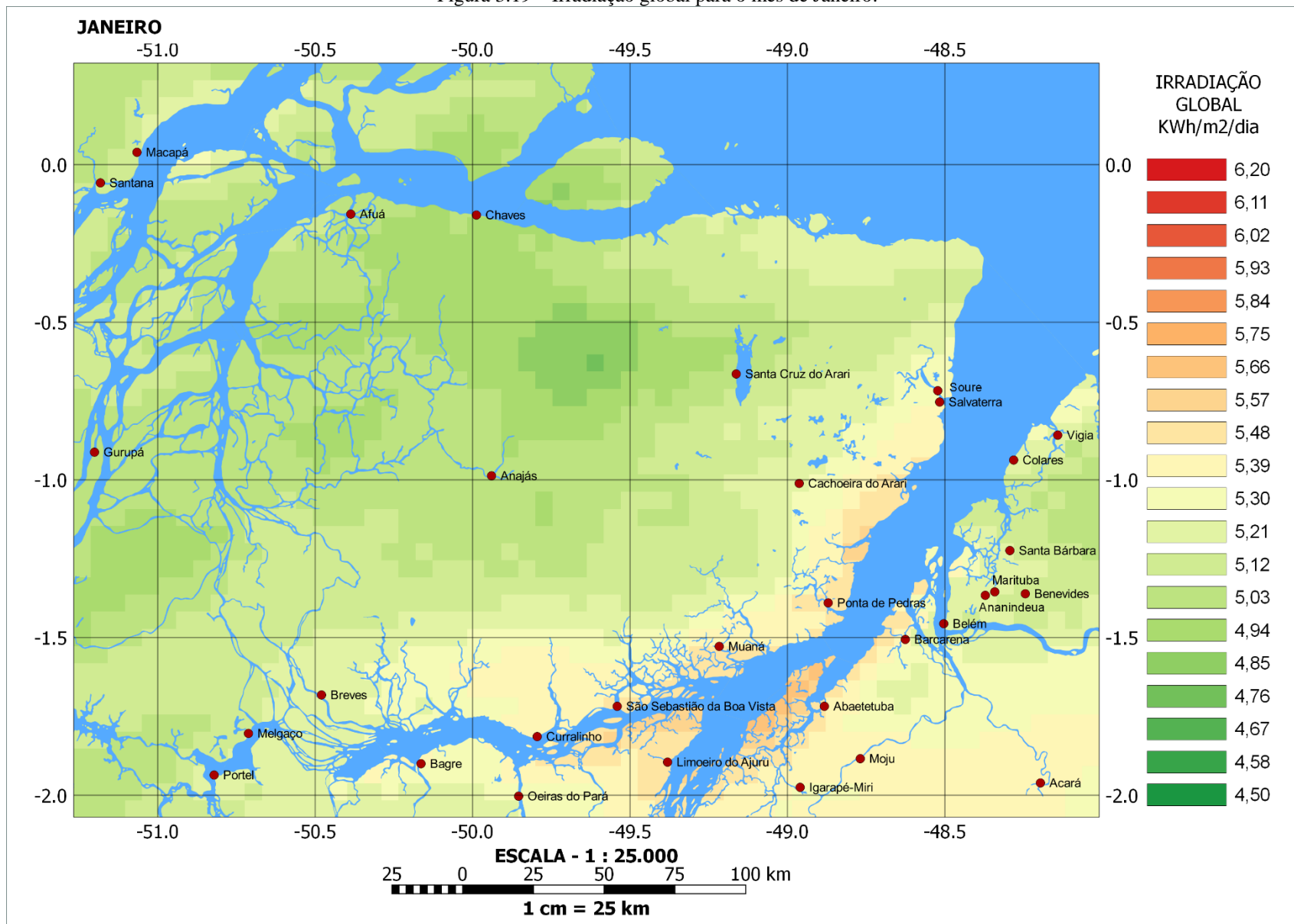
Fonte – [36]

Posteriormente é adicionado texto referente ao mês e ao tipo de irradiação mostrado no mapa; a legenda, para indicar os níveis de irradiação mostrados e a barra de escala, para definir a relação ou proporção existentes entre as distâncias mostradas no mapa e aquelas existentes na superfície real.

3.4 Mapas solarimétricos da Ilha do Marajó

Realizado os passos descritos anteriormente, foram gerados os mapas de irradiação global de janeiro a dezembro, bem como da média anual e do total anual. Nesta seção são mostrados apenas os mapas da irradiação global (Figura 3.19 a 3.33), pois são estes que servirão de base para a proposta de um sistema fotovoltaico isolado, descrito no próximo capítulo. Contudo, os mapas das irradiações difusa e direta são apresentados nos apêndices A e B respectivamente.

Figura 3.19 – Irradiação global para o mês de Janeiro.



Fonte – Autoria própria.

Figura 3.20 – Irradiação global para o mês de Fevereiro.

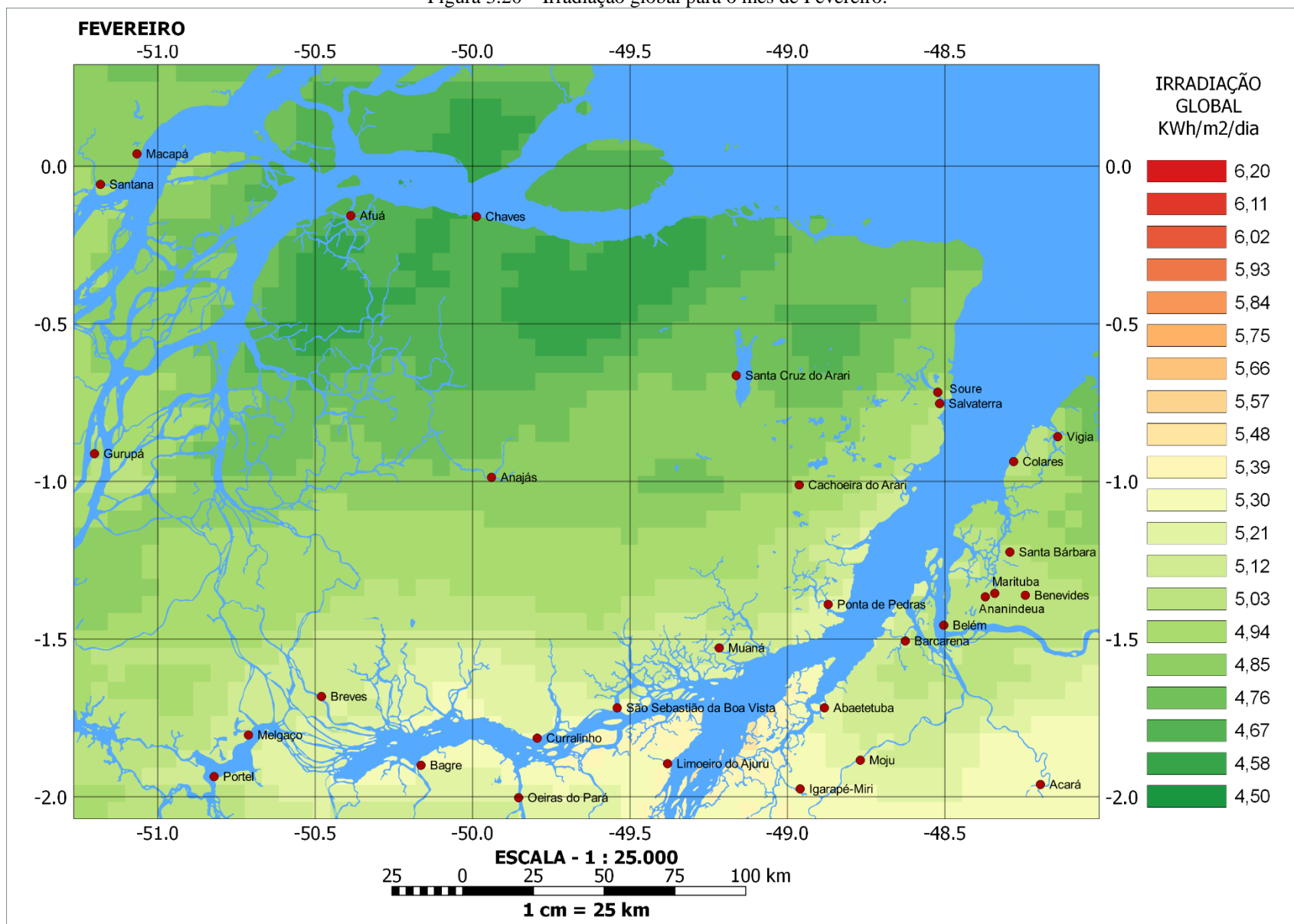


Figura 3.21 – Irradiação global para o mês de Março.

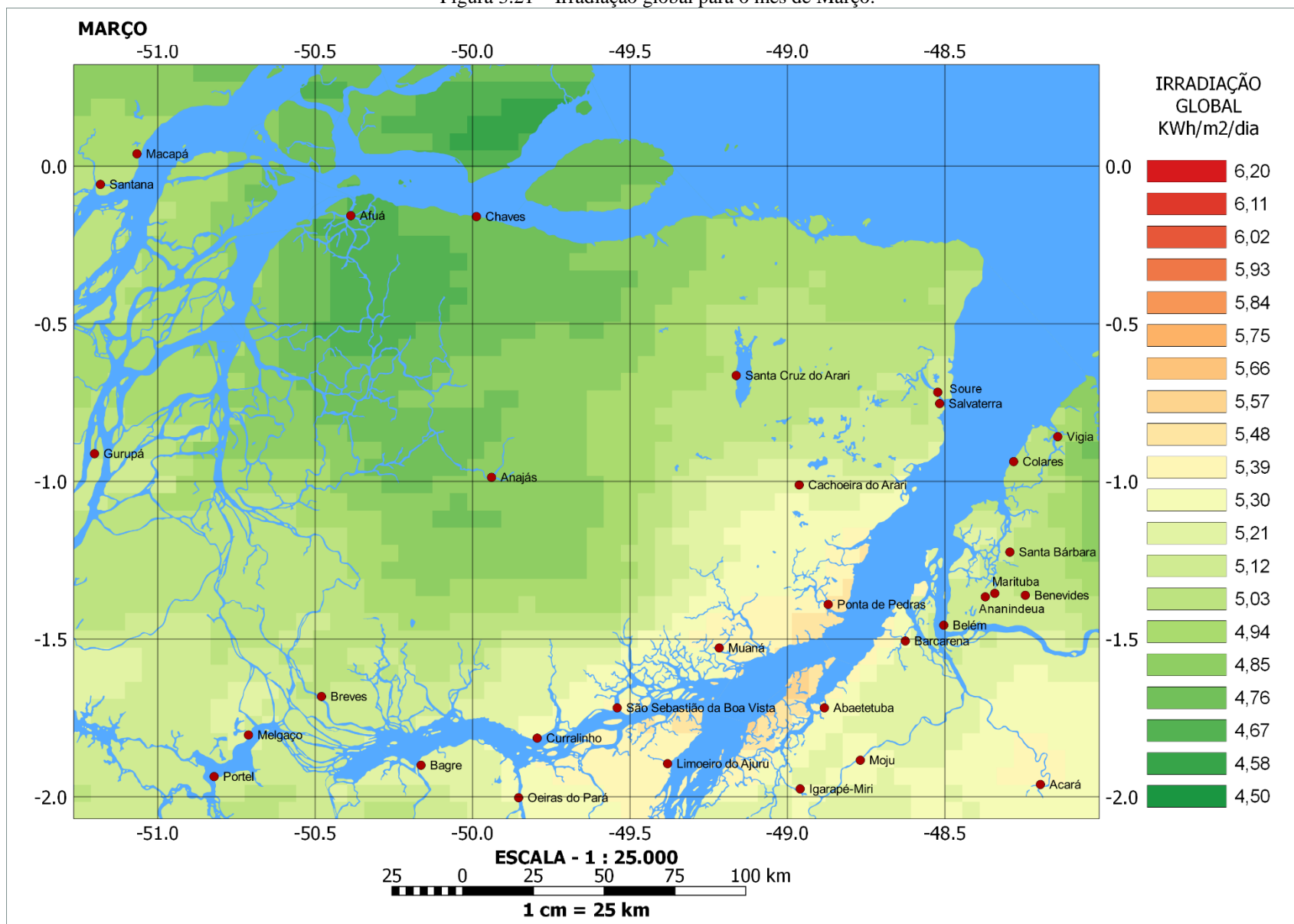


Figura 3.22 – Irradiação global para o mês de Abril.

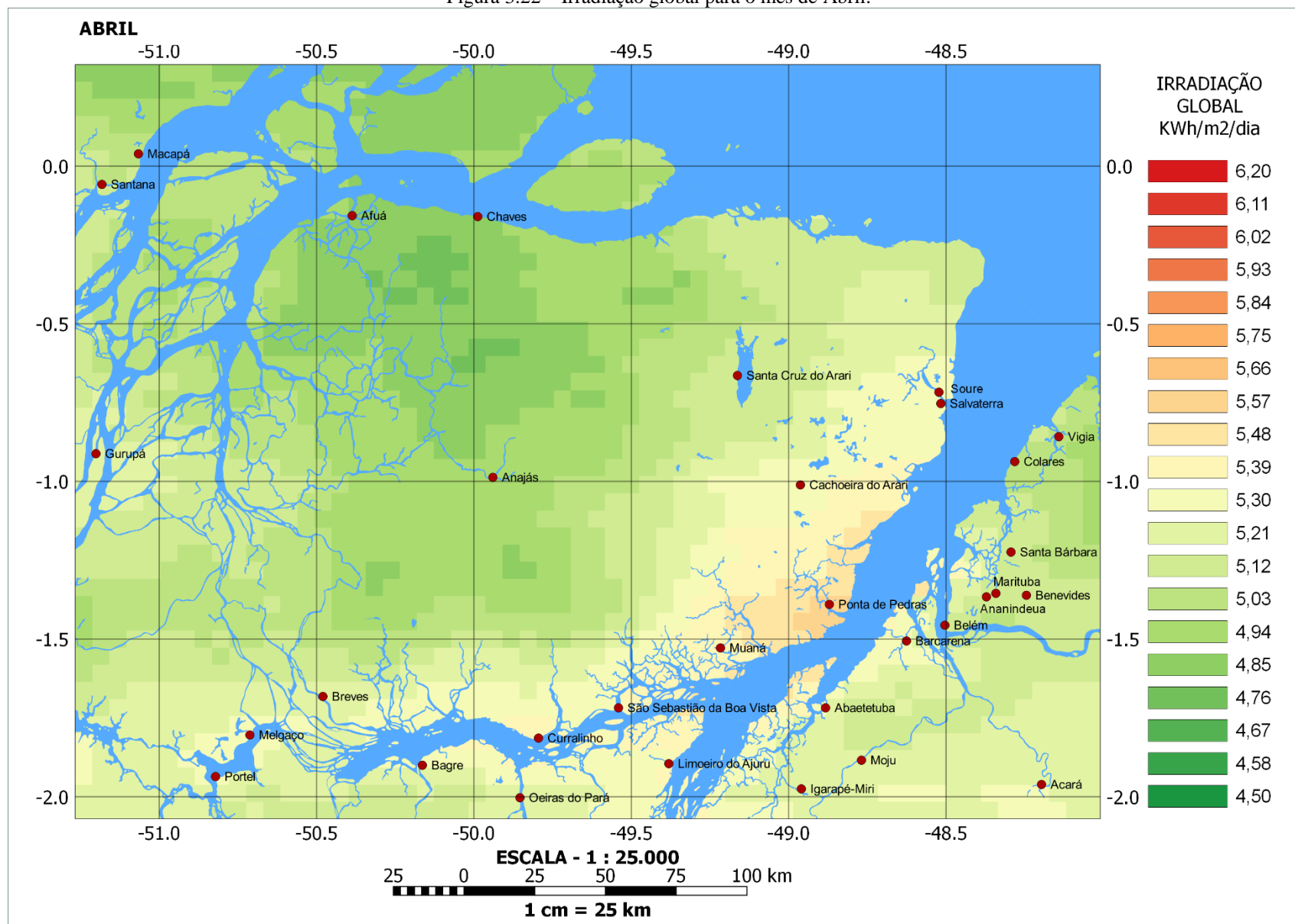


Figura 3.23 – Irradiação global para o mês de Maio.

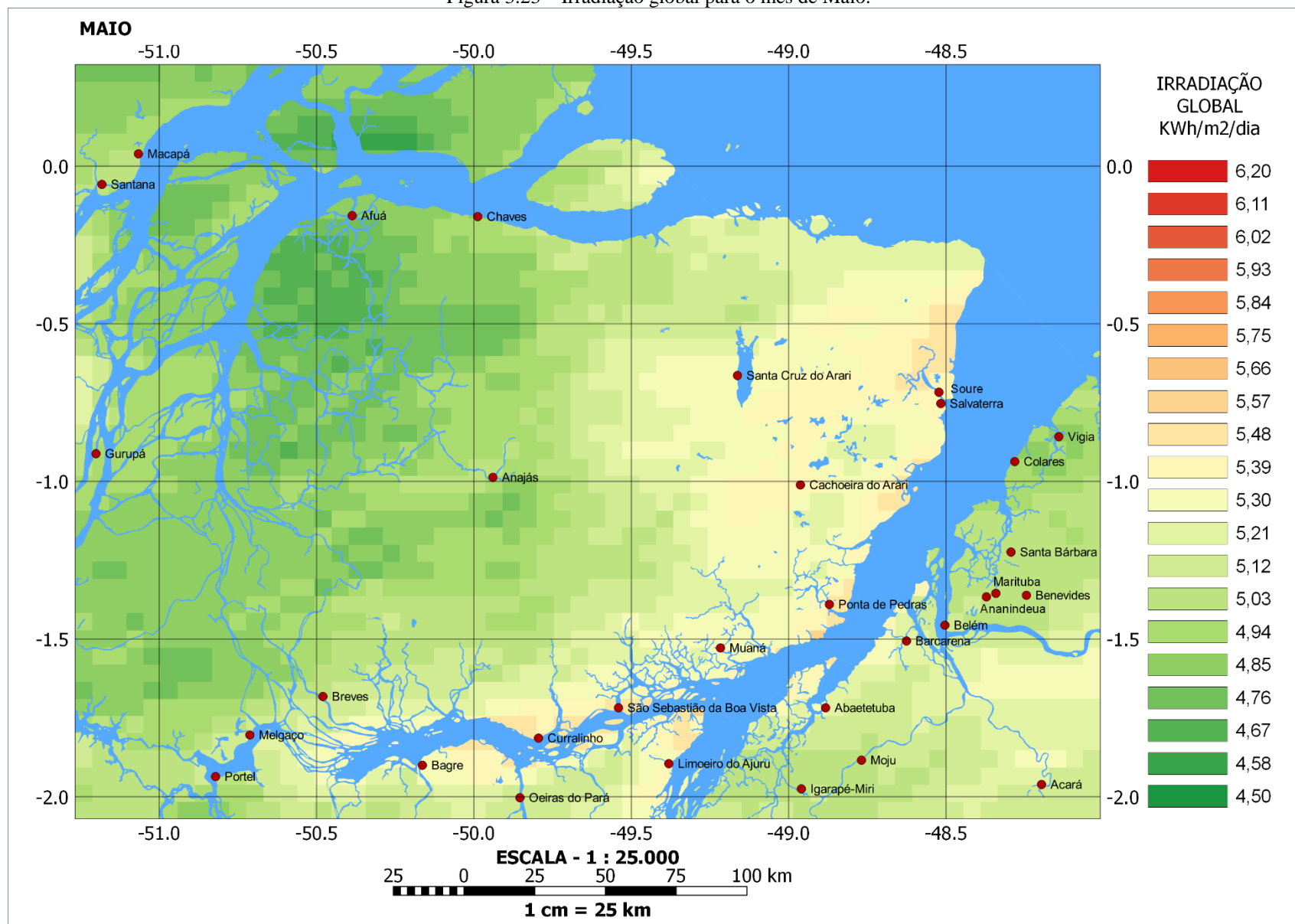


Figura 3.24 – Irradiação global para o mês de Junho.



Figura 3.25 – Irradiação global para o mês de Julho.

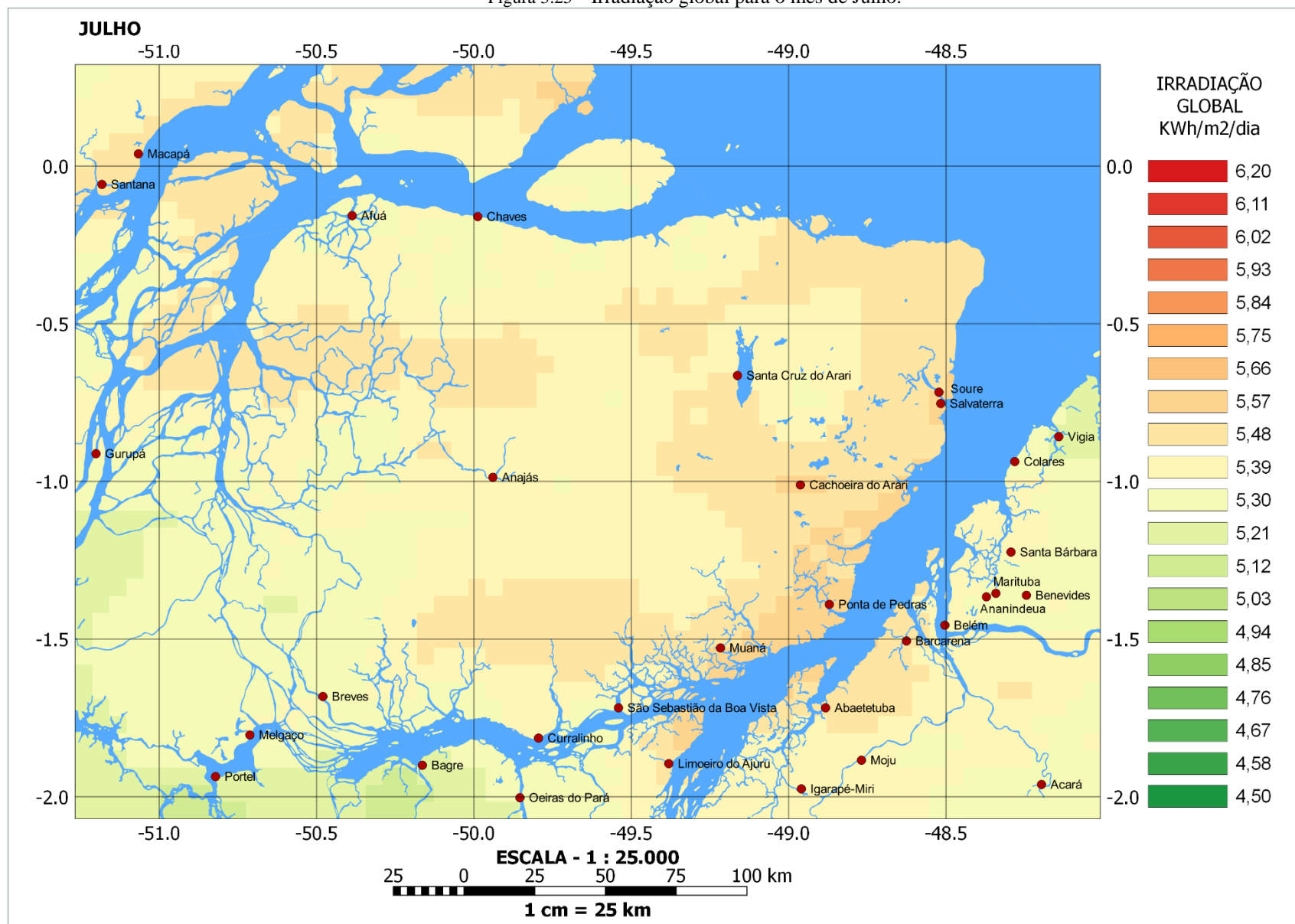


Figura 3.26 – Irradiação global para o mês de Agosto.

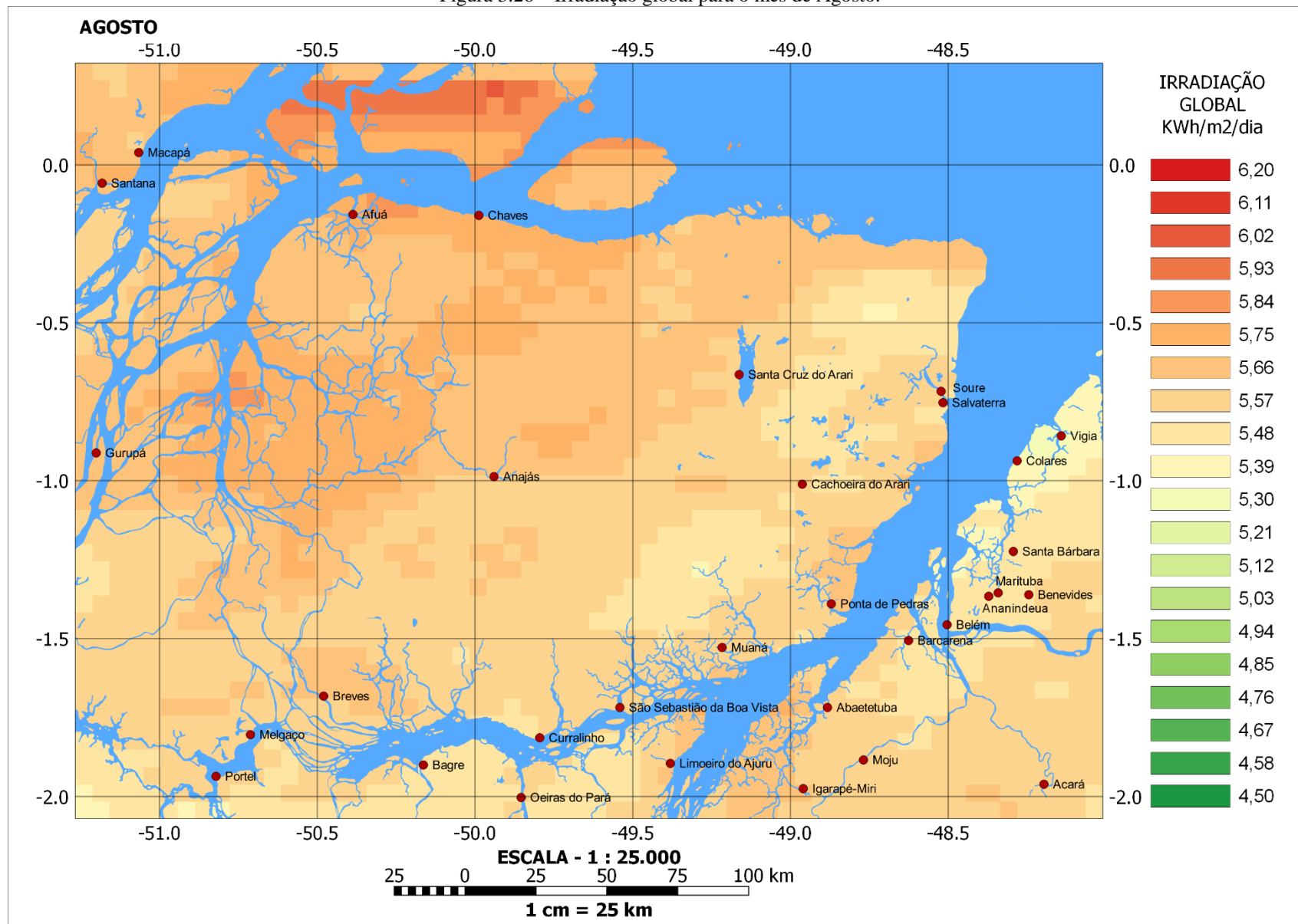


Figura 3.27 – Irradiação global para o mês de Setembro.

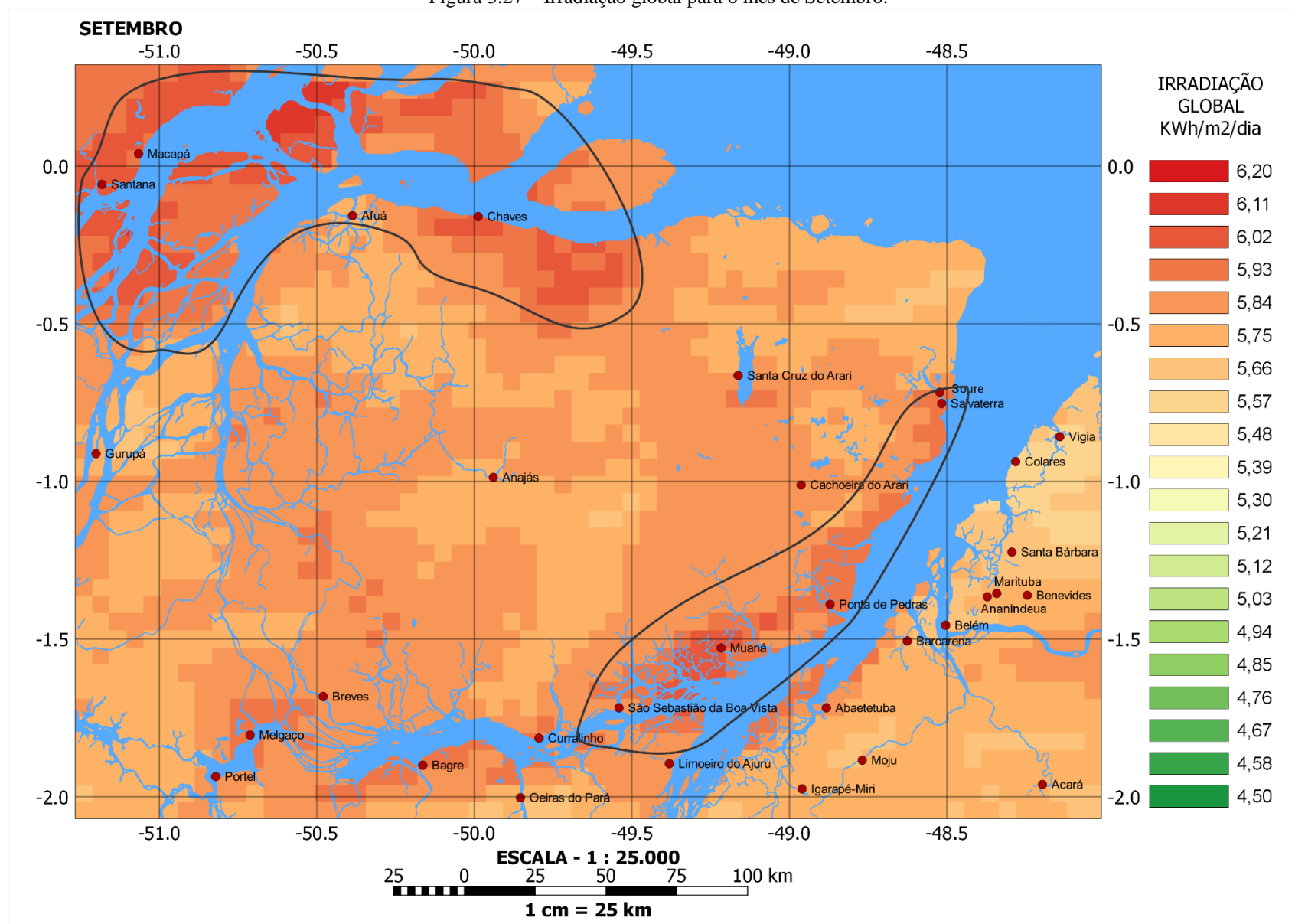


Figura 3.28 – Irradiação global para o mês de Outubro.

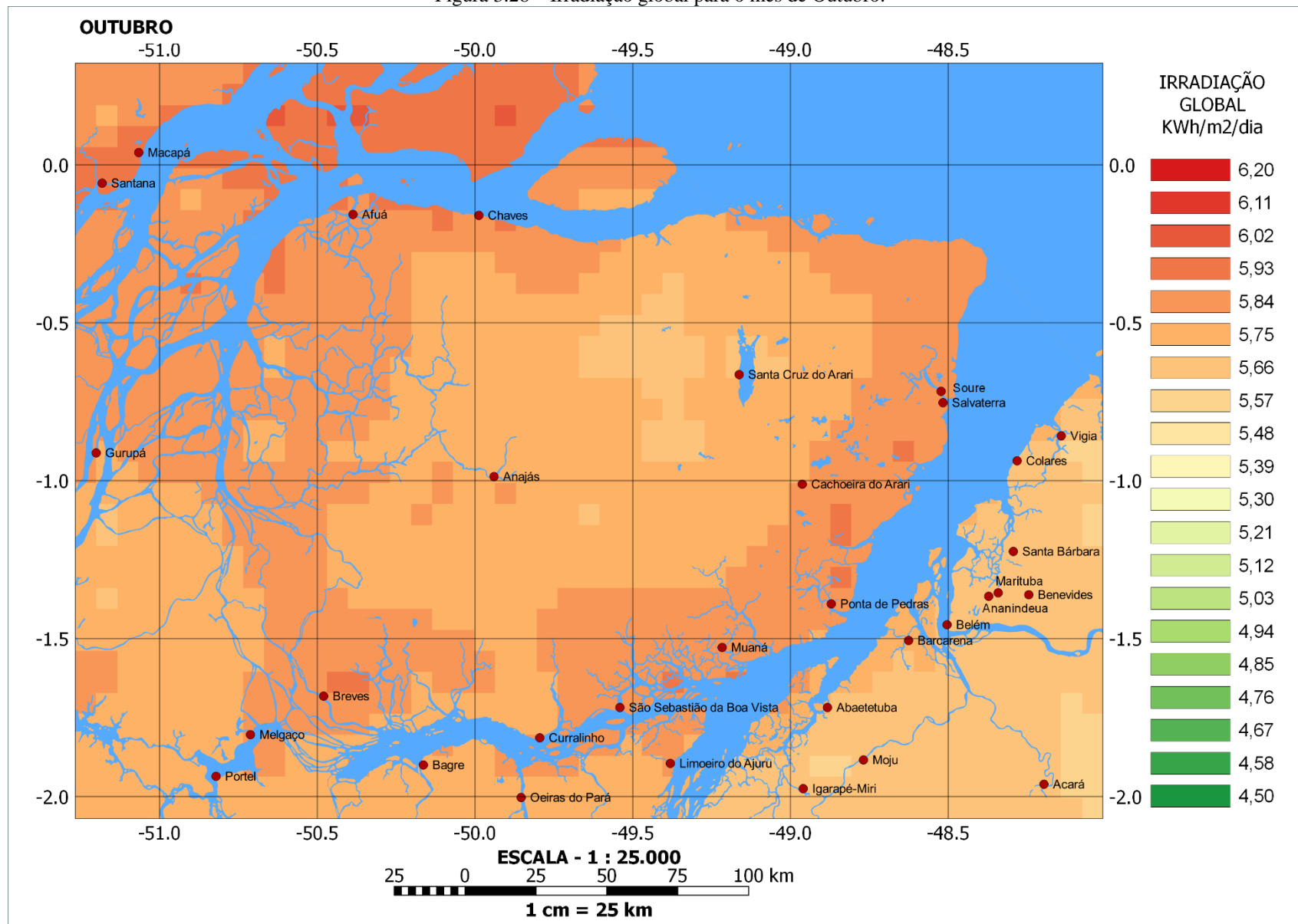
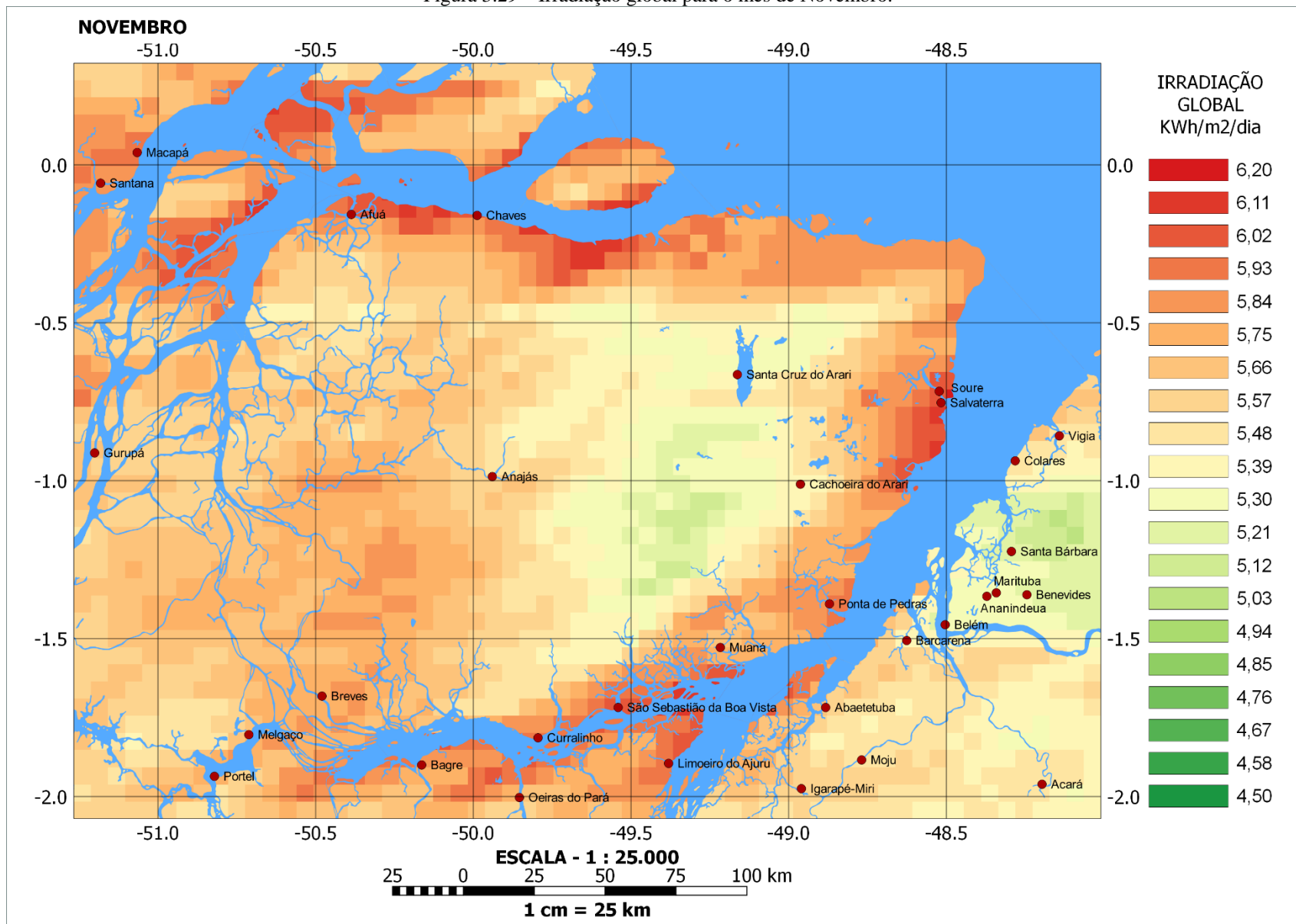


Figura 3.29 – Irradiação global para o mês de Novembro.



Fonte – Autoria própria

Figura 3.30 – Irradiação global para o mês de Dezembro.

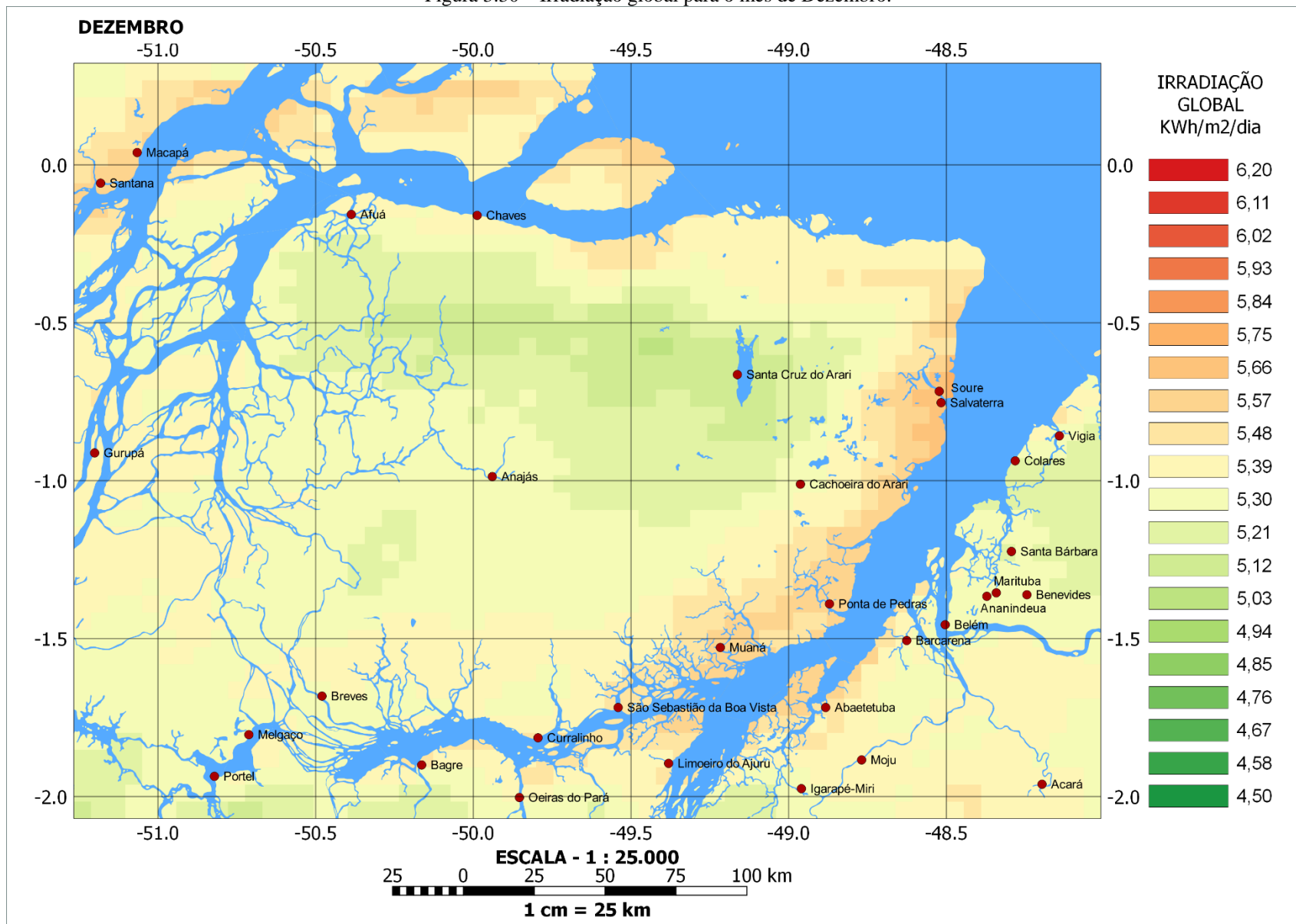


Figura 3.31 – Média anual da irradiação global.

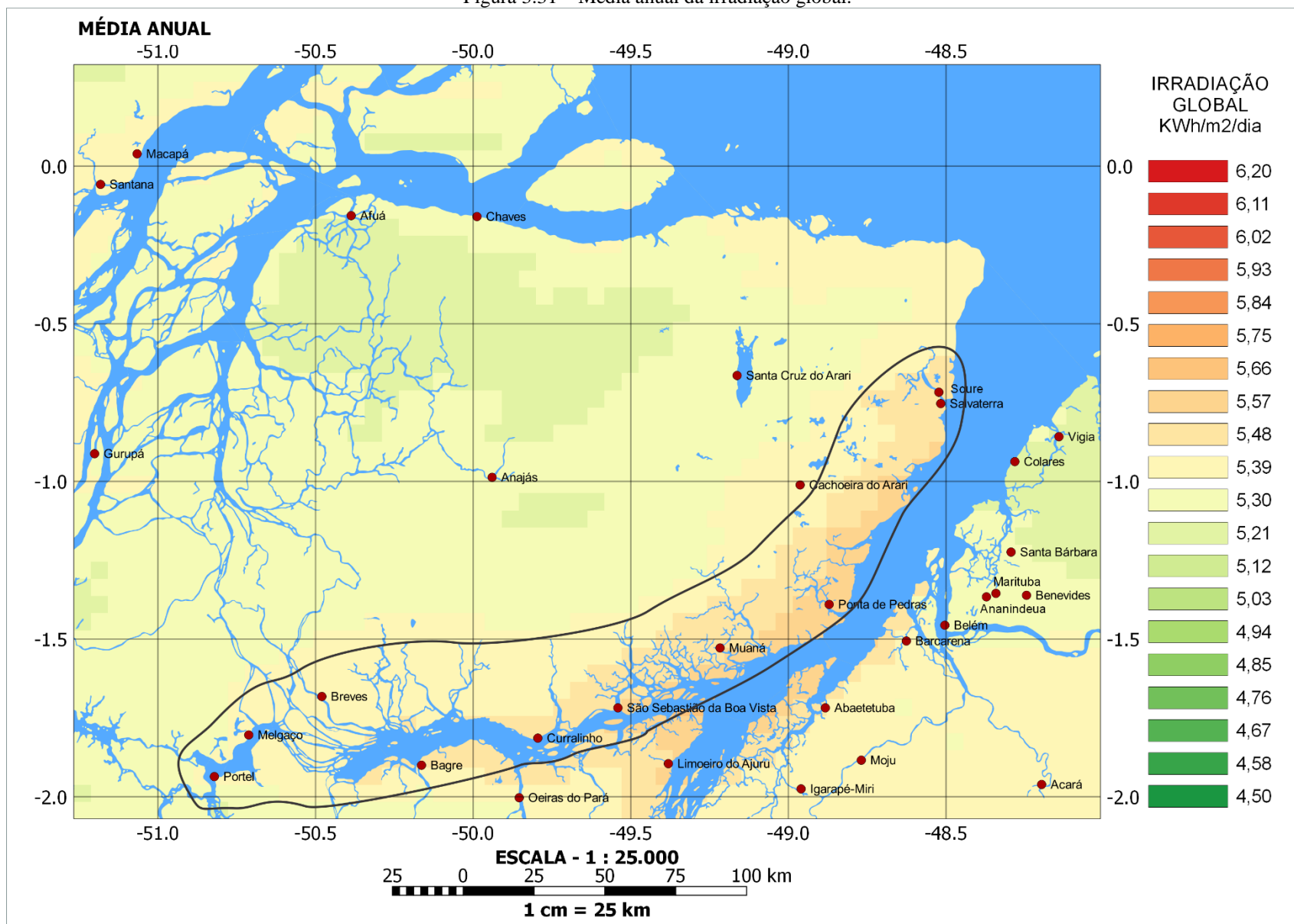
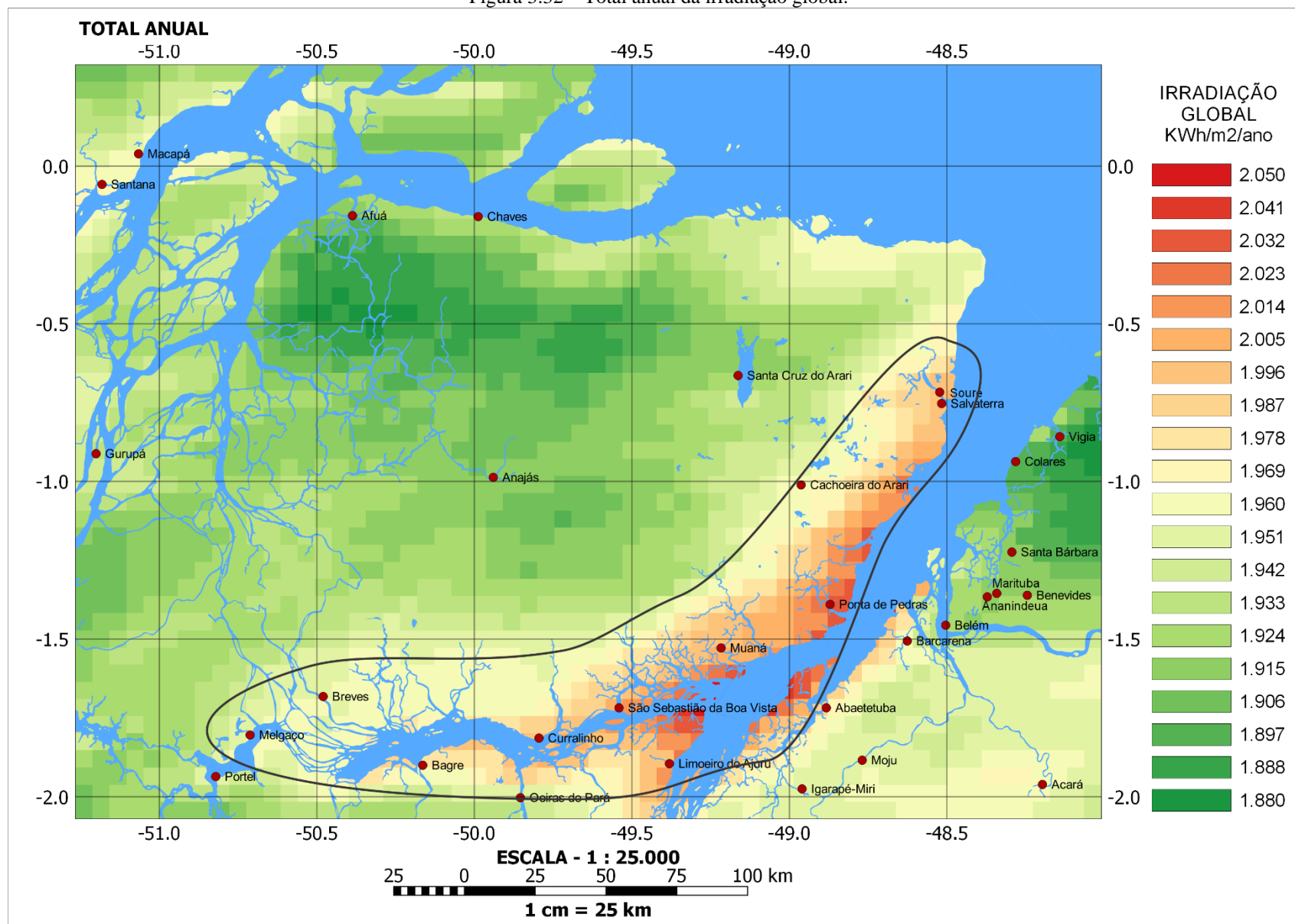


Figura 3.32 – Total anual da irradiação global.



Os mapas (Figura 3.19 a 3.32) mostram que os maiores e menores níveis de irradiação solar, são encontrados durante os meses de setembro e fevereiro, respectivamente. No mês de setembro a média da irradiação solar em toda a ilha supera 5,30 kWh/m²/dia, com destaque para a porção norte da ilha, que chega a apresentar média de 6,2 kWh/m²/dia. Já no mês de fevereiro as médias chegam a alcançar 5,48 kWh/m²/dia, mas uma grande região na parte central da Ilha apresenta médias de 4,50 kWh/m²/dia.

Verifica-se que de janeiro a maio a região que abrange os municípios de Gurupá, Anajás, Afuá e Chaves e uma parte de Breves, possui os níveis mais baixos de irradiação. Enquanto que nesse período as maiores incidências da radiação solar são encontradas na região costeira que abrange os municípios de Portel até Soure.

A média anual (Figura 3.31) mostra que a irradiação varia de 5,13 a 5,66 kWh/m²/dia. Os maiores níveis de irradiação podem ser encontrados na parte litoral da Ilha, enquanto que a região central apresenta níveis de irradiação mais baixos. De maneira geral os níveis de irradiação encontrados na Ilha apresentam boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas.

O mapa da média total anual (Figura 3.32) mostra que a irradiação global diária varia de 1.880 kWh/m²/ano a 2.050 kWh/m²/ano, contudo o maior valor pertence à cidade de Limoeiro do Ajuru, município este que não faz parte do arquipélago do Marajó.

O maior valor da irradiação total e média anual nos municípios da Ilha do Marajó foi de 2.041 kWh/m²/ano (total anual) e 5,6 kWh/m²/dia (média anual) foi obtido no município de Muaná. Os menores valores de irradiação global foram de 1.880 kWh/m²/ano (total anual) e 5,13 kWh/m²/dia (média anual) pertencente ao município de Afuá.

Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região da Ilha do Marajó são superiores aos da maioria dos países da união europeia, como Alemanha (900 a 1.250 kWh/m²/ano), França (900 a 1.650 kWh/m²/ano) e Espanha (1.200 a 1.850 kWh/m²/ano), onde projetos para aproveitamento do recurso solar são amplamente difundidos [40].

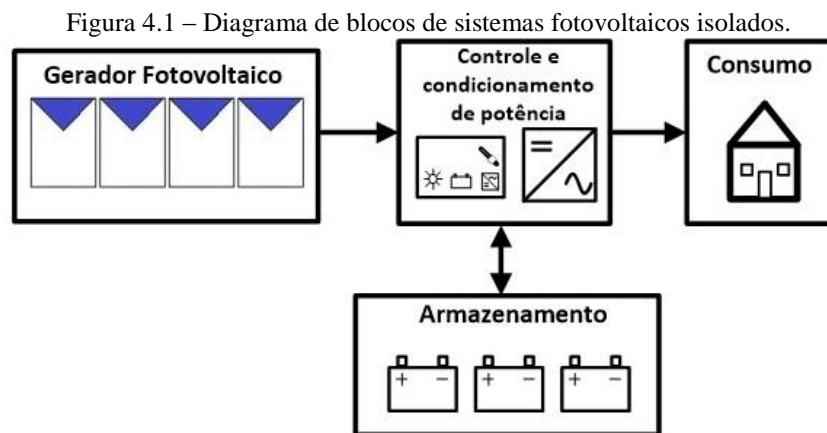
Conforme o mapa da média anual e total anual, os locais com maiores potenciais para aproveitamento do recurso solar estão na parte litoral, que abrange o município de Portel, Melgaço, Breves, Currálinho, São Sebastião da Boa Vista, Muaná, Ponta de Pedras, Cachoeira do Ararí, Salvaterra e Soure.

4 PROJETO BÁSICO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO – SFI

Neste capítulo é apresentado um caso prático para melhor exemplificar a metodologia de dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado. Para tanto, é considerada uma residência fictícia típica da região das ilhas do Marajó, possuindo um quarto, um banheiro, sala e cozinha. Para isto, é necessário seguir algumas etapas conforme descritas nos itens a seguir.

4.1 Etapas para o dimensionamento do sistema

Como pode ser visto na Figura 4.1, os blocos básicos de um SFI são: geração, equipamentos de controle e condicionamento de potência e armazenamento de energia. Partindo dos dados meteorológicos e da estimativa da demanda a ser atendida é possível dimensionar ou especificar cada um desses blocos, além dos demais componentes necessários à operação segura e confiável de cada componente em particular.



Fonte – [2]

As principais etapas do projeto são as seguintes [2]:

- Levantamento do recurso solar disponível na região da aplicação;
- Definição do local de instalação;
- Levantamento de demanda e consumo de energia elétrica;
- Dimensionamento do gerador fotovoltaico;
- Dimensionamento do banco de baterias;
- Dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de potência.

4.1.1 Levantamento do recurso solar disponível na região da aplicação

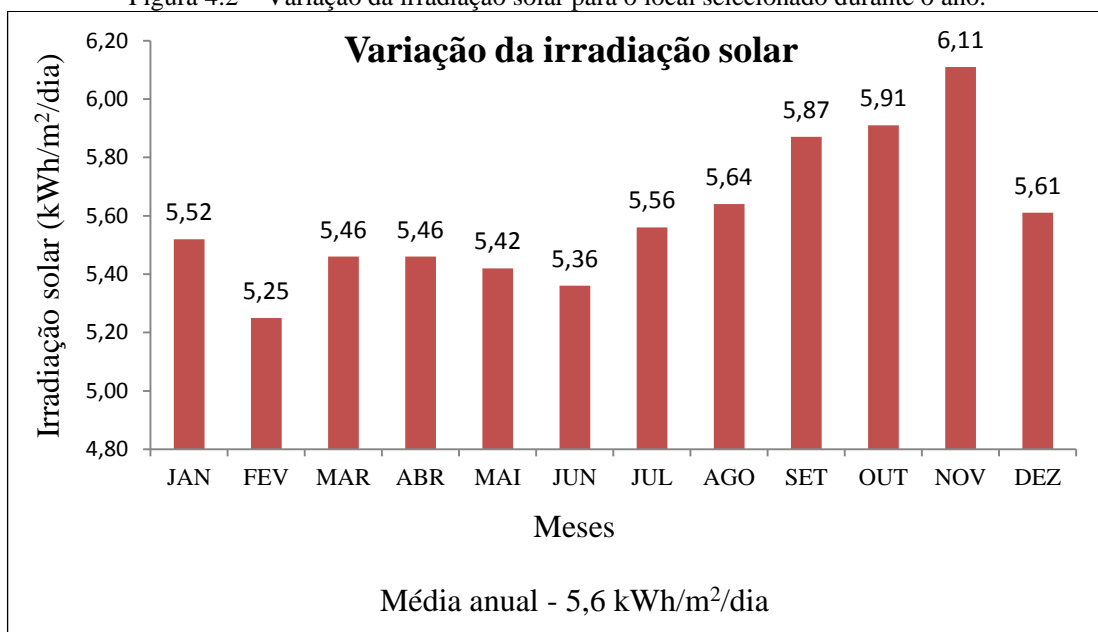
Os valores de irradiação solar foram estimados através de mapas solarimétricos, conforme descrito no capítulo 3. Na análise do mapa se visualizou a média e o total anual da irradiação global. Verificou-se que o melhor local para instalação seria no litoral do município de Muaná, mais especificamente no local que possui as seguintes coordenadas geográficas: Latitude (1,62 ao sul) e Longitude (49,19 a oeste).

Neste local a média anual dos níveis de irradiação foi de 5,6 kWh/m²/dia. Este valor de irradiação indica que o número de Horas de Sol Pleno – HSP, dado pela Equação 4.1 [41], é de 5,6 h/dia, ou seja, o valor de 5,6 kWh/m² de radiação diária é produzido durante 5,6 horas com uma potência incidente constante e igual a 1.000 W/m².

$$\text{HSP} = \frac{\text{Irradiação}(\text{kWh}/\text{m}^2/\text{dia})}{1\text{kW}/\text{m}^2} \quad (4.1)$$

A Figura 4.2 mostra a variação da irradiação durante os doze meses do ano para a localidade determinada. Esta informação é muito importante, pois assim foi possível verificar que o mês de Fevereiro apresentou a menor média de irradiação solar (5,25 kWh/m²/dia), e é este valor que será levado em consideração para o dimensionamento do sistema, pois será considerado como o pior caso. Para o mês de Fevereiro o número HSP foi de 5,25 h/dia.

Figura 4.2 – Variação da irradiação solar para o local selecionado durante o ano.



Fonte – Autoria própria.

4.1.2 Definição do local de instalação

O local foi definido a partir da análise dos mapas solarimétricos do Capítulo 3, supondo que neste local exista uma residência que não seja atendida pela rede elétrica do município, devido à distância da sua sede. A Figura 4.3 mostra o local para qual o sistema será projetado.

Figura 4.3 – Local de proposta do Sistema Fotovoltaico Isolado.



Fonte – [41]

Para garantir um bom rendimento, os módulos fotovoltaicos devem ser instalados em uma área com máxima insolação possível, ou seja, livre de sombreamento de árvores ou até mesmo da própria residência, ademais devem possuir uma inclinação igual a da latitude do local, que nesse caso é 1,62 ao sul. Porém, como a latitude é menor que 10 graus, é indicado que seja colocado a 10 graus para evitar acúmulo de poeira, fezes de passarinho etc, e até mesmo porque a própria chuva pode fazer a limpeza dos módulos [18]. A face dos módulos deve estar voltada para o norte geográfico, pois o local de instalação encontra-se no hemisfério Sul.

4.1.3 Levantamento da demanda e do consumo energético

Para o levantamento da demanda energética é considerado que na residência exista um refrigerador horizontal de uma porta, um televisor 32 polegadas, um rádio AM/FM e cinco lâmpadas fluorescente compactas, uma para cada compartimento e uma para frente da residência. A potência média e o número de horas de utilização de cada equipamento citado

anteriormente baseiam-se em [2]. A Tabela 4.1 apresenta valores médios de potência, utilização, horas de uso por dia e dias de uso mensalmente. De posse desses valores é possível calcular o consumo diário e mensal para cada equipamento. Para obter o consumo diário multiplica-se a potência do equipamento pelo número de utilização e o consumo mensal é calculado multiplicando-se o consumo diário pelo número de dias de uso do equipamento.

Tabela 4.1 – Consumo estimado de energia elétrica da residência.

Equipamento	Potência Média (W)	Utilização Média (h/dia)	Dias estimados de uso (dias/mês)	Consumo diário (Wh/dia)	Consumo Médio Mensal (kWh/mês)
TV LCD 32 polegadas	95	5	30	475	14,25
Rádio	5	10	30	50	1,50
Lâmpada Sala	11	5	30	55	1,65
Lâmpada Quarto	11	5	30	55	1,65
Lâmpada Cozinha	11	5	30	55	1,65
Lâmpada Banheiro	11	5	30	55	1,65
Lâmpada frente da casa	11	12	30	132	3,96
Refrigerador ²	35	8	30	280	8,40
TOTAL	190			1.157	34,71

Fonte – Baseado em [2].

4.1.4 Dimensionamento do gerador fotovoltaico

Para o dimensionamento do gerador fotovoltaico, é adotado o método do mês crítico, também chamado de intuitivo. Tal método consiste na realização do dimensionamento do SFI considerando o mês que apresenta a menor média de irradiação durante o ano. Supõe-se que se o sistema funcionar adequadamente nesse mês, isso ocorrerá também nos demais meses do ano, assim sendo, o sistema produzirá mais energia nos outros meses nos quais as condições forem mais favoráveis.

² O consumo do refrigerador é baseado no funcionamento do compressor. Por mais que o refrigerador seja ligado 24 horas por dia, o compressor funcionará em média apenas 8 horas por dia.

Para calcular a energia ativa necessária diariamente (L) leva-se em conta o tipo de carga do sistema em corrente alternada, em corrente contínua se houver, e a eficiência dos elementos que participam do processo de armazenamento e condicionamento de potência. O valor de L pode ser determinado conforme a Equação 4.2 [2].

$$L = \left(\frac{L_{cc}}{\eta_{bat}} \right) + \left(\frac{L_{ca}}{\eta_{bat}\eta_{inv}} \right) \quad (4.2)$$

Onde:

L_{cc} (Wh/dia) – quantidade de energia consumida diariamente em corrente contínua em determinado mês;

L_{ca} (Wh/dia) – quantidade de energia consumida diariamente em corrente alternada no mesmo mês;

η_{bat} (%) – eficiência global da bateria;

η_{inv} (%) – eficiência do inversor.

O valor sugerido para a eficiência global das baterias é de 86% [2] e a eficiência do inversor pode ser encontrada no próprio manual do equipamento, fornecido pelo fabricante.

Com base no valor da energia ativa necessária diariamente (L), calcula-se a potência mínima necessária para o gerador fotovoltaico, que por sua vez, deve ser obtida conforme mostra a Equação 4.3 [2].

$$P_m = \frac{L}{HSP \times Red_1 \times Red_2} \quad (4.3)$$

Onde:

P_m (W_p) – potência do gerador fotovoltaico;

L (Wh/dia) – quantidade de energia consumida diariamente;

HSP (h/dia) – horas de sol pleno;

Red_1 (%) – fator de redução da potência dos módulos fotovoltaicos;

Red_2 (%) – fator de redução da potência devido às perdas no sistema.

O valor de Red_1 engloba os efeitos de: i) um eventual acúmulo de sujeira na superfície do módulo ao longo do tempo de uso; ii) degradação física permanente ao longo do tempo; iii) tolerância de fabricação para menos, em relação ao valor nominal; iv) perdas devido à temperatura. A este fator, Red_1 , atribui-se por padrão o valor de 0,75. O valor de Red_2 inclui

as perdas na fiação, no controlador de cargas, diodos etc. A este valor se recomenda como padrão o valor de 0,9 [2].

Para determinar o número de módulo a compor o gerador se realizam associações tanto em série quanto em paralelo. A associação em série oferece a possibilidade de escolher o nível de tensão e a associação em paralelo o nível de corrente que o gerador deve fornecer ao sistema.

O número de módulos em série pode ser encontrado pela Equação 4.4 [2], levando em consideração que o sistema utilizará um controlador de carga convencional, sem Seguimento de Ponto de Potência Máxima – SPPM.

$$N^{\circ} \text{ módulo em série} = \frac{1,2 \times V_{sist}}{V_{mpTmax}} \quad (4.4)$$

Onde:

V_{sist} = Tensão de operação do sistema;

V_{mpTmax} = Tensão de máxima potência do módulo.

O coeficiente 1,2 na Equação 4.4 considera que um módulo fotovoltaico tem que carregar uma bateria até uma tensão 20% acima da nominal e considera, ainda, alguma perda ôhmica. Caso o valor encontrado com a Equação 4.4 não seja número inteiro e a parte decimal maior que 0,5 (por exemplo 4,6) o número de módulos em série deve ser arredondado para maior, por outro lado, se a parte decimal for menor que 0,5 (por exemplo 4,2) o número de módulos deve ser igual a parte inteira do número encontrada.

Para determinar a corrente (I_m) que o gerador fotovoltaico deve oferecer, considera-se a potência mínima P_m calculada com a Equação 4.3, e a tensão de operação do sistema, desta forma a corrente necessária ao sistema é dada pela Equação 4.5 [2].

$$I_m = \frac{P_m}{V_{sist}} \quad (4.5)$$

Onde:

I_m (Acc) – Corrente do gerador fotovoltaico;

P_m (Wp) – Potência do gerador fotovoltaico;

V_{sist} (Vcc) – Tensão nominal do sistema.

O valor mínimo de corrente I_m determinado pela Equação 4.5 é o valor mínimo da corrente no ponto de máxima potência, que o gerador fotovoltaico deve fornecer. Determinado este valor de corrente, calcula-se o número de módulo em paralelo conforme a Equação 4.6 [2].

$$N^{\circ} \text{ de módulos em paralelo} = \frac{I_m}{I_{mp}} \quad (4.6)$$

Na Equação 4.6, I_{mp} representa a corrente de cada módulo no ponto de máxima potência, nas condições padrão de ensaio e este o valor de I_{mp} é fornecido pelo próprio fabricante do módulo fotovoltaico. O mesmo critério de arredondamento utilizado para determinar o número de módulos em série pode ser utilizado para determinar o número de módulos em paralelo.

4.1.5 Dimensionamento do banco de baterias

De posse da energia corrigida solicitada pelas cargas a cada mês, resultante da Equação 4.2, utiliza-se o valor de L para o cálculo da capacidade do banco de baterias segundo as Equações 4.7 a 4.9 [2].

$$N = -0,48 X HSP + 4,58 \quad (4.7)$$

$$CB_{C20}(Wh) = \frac{L \cdot N}{P_d} \quad (4.8)$$

$$CBI_{C20}(Ah) = \frac{CB_{C20}}{V_{sist}} \quad (4.9)$$

Onde N é o número de dias de autonomia; CB_{C20} é a capacidade do banco de baterias em Wh para o regime de descarga³ em 20 horas (C20), CBI_{C20} é a respectiva capacidade em Ah; P_d a máxima profundidade de descarga da bateria considerando o período de autonomia.

No que se refere à máxima profundidade de descarga, ressalta-se que esta depende também da radiação solar da região, do tipo de bateria, do modo como a descarga é realizada etc. Para todas as baterias, é comum a característica de que, quanto maior a profundidade de descarga, menor sua vida útil.

³ Regime de Descarga é condição de descarga de uma bateria, definido por uma corrente necessária para que seja atingida a tensão final de descarga, em tempo e condições especificados. Uma bateria com regime de descarga C20 indica que a mesma será descarregada em 20 horas.

Após o cálculo da capacidade do sistema de acumulação, a determinação do número de baterias em paralelo realiza-se pela Equação 4.10 (PINHO *et. al*, 2014).

$$N^{\circ} \text{ baterias paralelos} = \frac{CBI_{C20}}{CBI_{C20bat}} \quad (4.10)$$

Onde CBI_{C20bat} representa a capacidade da bateria selecionada em Ah, no mesmo regime de descarga do valor calculado para CBI_{C20} . O mesmo critério utilizado para arredondar para maior o número de módulos em paralelo e em série pode ser utilizado para a quantidade de baterias em paralelo.

O número de baterias a serem conectadas em série depende da tensão nominal do sistema e é dado pela Equação 4.11 [2].

$$N^{\circ} \text{ baterias série} = \frac{V_{sist}}{V_{bat}} \quad (4.11)$$

Onde V_{sist} é a tensão nominal de operação do sistema e V_{bat} é a tensão nominal de operação da bateria.

4.1.6 Dimensionamento do controlador de cargas

O dimensionamento do controlador de carga deve levar em conta os limites máximos do controlador com relação à tensão c.c. do sistema e aos níveis de corrente elétrica, tanto na entrada (painel fotovoltaico) quanto na saída (baterias).

Para determinar a corrente máxima (I_c) que pode passar pelo controlador é considerada a corrente de curto circuito do painel fotovoltaico acrescida de um fator mínimo de segurança de 25%, assumindo que o painel pode receber uma irradiância de até 1.250 W/m². A corrente máxima I_c é dada pela Equação 4.12 [2].

$$I_c = 1,25 \cdot N^{\circ} \text{ módulos paralelos} \cdot I_{sc} \quad (4.12)$$

Onde I_{sc} é a corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico.

4.1.7 Dimensionamento do inversor

Para a escolha do inversor, verifica-se a potência máxima das cargas instaladas, selecionando um inversor com potência igual ou superior à potência máxima das cargas. Outro fator importante a ser considerado é tensão c.c. do sistema (tensão do banco de baterias) e a tensão de saída c.a. além da forma de onda que deve ser senoidal, conforme especifica a Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL através da Resolução Normativa N° 493/2012 [42], quem tem por objetivo regulamentar a instalação de sistemas fotovoltaicos isolados.

4.1.8 Determinação da tensão de operação do sistema

Visando uma possível redução nos custos de implantação e considerando a maior oferta de equipamentos necessários à implantação de um SFI, foi realizada uma comparação entre um sistema de 12 V e 24 V. Para isto, os cálculos levaram em consideração o módulo *Yingli* YL140P-17b, pois conforme [17], os módulos policristalinos apresentam uma melhor relação custo – benefício, a bateria *Freedom* DF2500 e a eficiência do inversor como 90 %. As especificações do módulo e da bateria são apresentadas nas Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente.

Tabela 4.2 – Especificações técnicas do módulo Yingli Solar SW140.

Especificações técnicas	
Dimensões	1.470 x 680 x 25 mm
Garantia do fabricante	10 anos contra defeito
Tipo de célula	Policristalino
Potência máxima	140 Wp
Tolerância	± 5%
Tensão de máxima potência	18,01 V
Corrente de máxima potência	7,77 A
Tensão de circuito aberto	22,28 V
Corrente de curto-circuito	8,30 A
Eficiência	14 %

Fonte – [43]

Tabela 4.3 – Especificações técnicas da bateria Freedom DF2500.

Especificações técnicas	
Dimensões	511 x 213 x 230 mm
Garantia do fabricante	2 anos
Faixa de capacidade	Acima de 100 Ah
Tensão nominal	12 V
Tipo	Estacionária – chumbo – ácido
Capacidade C20	150 Ah
Número Ciclos (com 20% de descarga)	1500

Fonte – [44]

De posse dessas informações foi feita a comparação entre um sistema com tensão nominal de 12 V outro de 24 V, conforme mostra a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Comparação entre SFI de 12 V e 24 V.

Tensão de operação do sistema	12 V	24 V
Carga instalada (Wh/dia)	1.157	1.157
HSP para fevereiro (h)	5,25	5,25
L (Wh/dia)	1.494,83	1.494,83
P_m (W)	421,82	421,82
Nº módulo em série	0,8	1,6
Corrente I_{mp} (A)	35,15	17,58
Nº módulo em paralelo	4,52	2,26
CB_{C20} (Wh)	14948,32	14948,32
CBI_{C20} (Ah)	1245,69	622,85
Nº bateria em paralelo	8,30	4,15
Nº bateria em série	1	2
Corrente I_c (A)	51,88	20,75

Fonte – Autoria própria.

Da Tabela 4.4, verifica-se que para um sistema fotovoltaico com tensão nominal de 12 volts seriam necessários 5 módulos fotovoltaicos e 8 baterias ligadas em paralelo, não sendo necessário módulos e baterias em série. Enquanto que para um sistema de 24 volts, utilizaria 4

módulos, 2 *strings*⁴ (com 2 módulos) em paralelo e o número de baterias seria 6, 3 *strings* (com 2 baterias) em paralelo.

Outra característica relevante é a corrente I_c que no sistema de 12 V apresenta o valor de 51,88 A e para 24 V um valor de 20,75 A. O valor elevado de corrente implica em um maior custo do controlador de carga e de cabos elétricos, pois quanto maior a corrente maior será a bitola dos condutores elétricos e maior deverá ser capacidade do controlador de carga em suportar tal corrente. Por isso, optou-se por adotar 24 V para a tensão nominal de operação do sistema.

Verificado a tensão de operação e a corrente I_c do sistema, foi possível determinar o controlador de carga e o inversor. As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram as especificações do controlador de carga e do inversor, respectivamente e a Tabela 4.7 indica a quantidade dos equipamentos a serem utilizados no Sistema Fotovoltaico Isolado.

Tabela 4-5 – Especificações técnicas do controlador de carga Epsolar Landstar LS2024.

Especificações Técnicas	
Corrente nominal do gerado fotovoltaico	20 A
Corrente nominal da carga	20 A
Tensão do sistema	24 V
Medidor digital	Não
Terra positivo	Sim
Sensor remoto de temperatura	Sim

Fonte – [45]

Tabela 4-6 – Especificações técnicas do inversor Xantrex PROwatt 250W.

Especificações Técnicas	
Tensão CA de saída nominal	115 Vac \pm 10%
Tensão de entrada CC	24 Vc.c.
Potência de saída máxima	250 W
Potência de surto (pico)	500 W
Frequência de saída	60 Hz
Eficiência	90 %

Fonte – [46]

⁴ *String* – Associação em série de 2 ou mais módulos (gerador fotovoltaico) ou baterias (banco de baterias).

Tabela 4-7 – Equipamentos necessários ao sistema.

Equipamento	Característica	Quantidade
Módulo Fotovoltaico	140 Wp	4
Bateria	150 Ah (C ₂₀)	6
Controlador de carga	20 A / 24 V	1
Inversor	250 W / 24 – 127 V	1

Fonte – Autoria própria.

4.1.9 Dimensionamento dos condutores elétricos

Conforme a ABNT NBR 5410 [47], os condutores elétricos podem ser dimensionados levando em consideração a resistividade (ρ) do material, a distância total do condutor, a corrente que passa pelo condutor e a queda de tensão tolerada no cabeamento. Da Tabela 4.4 obtém – se o valor da corrente que poderá passar pelo condutor como sendo $I_c = 20,75$ A.

Considerando que os módulos fiquem instalados a 3,5 metros (ida e volta = 7 metros) da residência e uma queda de tensão de 3%, através da Tabela 4.8 verifica-se que os condutores elétricos do trecho c.c do sistema deve possuir seção mínima de 10 mm^2 .

Para o trecho c.a, saída do inversor até o quadro de luz e força, a bitola dos condutores deverá ser determinada conforme a Norma NT.31.001 da Centrais Elétricas do Pará – CELPA [48]. Conforme especificações na Tabela 4.9, verificou-se que a seção mínima para os condutores elétricos é de 6 mm^2 , os disjuntores devem ser de 30 ou 32 A, o diâmetro nominal do eletroduto deve ser de 1 polegada, condutor de aterramento de 6 mm^2 e eletroduto de aterramento deve possuir 1/2 (meia) polegada de diâmetro.

Tabela 4-8 – Comprimento máximo da fiação (m).

Perda percentual máxima permitida: 3 %										
Tensão Nominal do Sistema (c.c.): 24 V										
Temperatura do condutor considerada: 50 °C										
Resistividade elétrica do cobre: 0,0178 (Ωm)										
Coeficiente de variação da resistividade com a temperatura: 0,004 ($\Omega\text{m}/^\circ\text{C}$)										
		Bitola do cabo (Seção em mm^2)								
		1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
Corrente (A)	0,5	54,2	90,3	144,5	216,7	361,2	577,8	902,9	1.264,04	1.805,78
	1	27,1	45,1	72,2	108,3	180,6	288,9	451,4	632,0	902,9
	2	13,5	22,6	36,1	54,2	90,3	144,5	225,7	316,0	451,4
	3	9,0	15,0	24,1	36,1	60,2	96,3	150,5	210,7	301,0
	4	6,8	11,3	18,1	27,1	45,1	72,2	112,9	158,0	225,7
	5	5,4	9,0	14,4	21,7	36,1	57,8	90,3	126,4	180,6
	6	4,5	7,5	12,0	18,1	30,1	48,2	75,2	105,3	150,5
	8	3,4	5,6	9,0	13,5	22,6	36,1	56,4	79,0	112,9
	10	2,7	4,5	7,2	10,8	18,1	28,9	45,1	63,2	90,3
	12	2,3	3,8	6,0	9,0	15,0	24,1	37,6	52,7	75,2
	14	1,9	3,2	5,2	7,7	12,9	20,6	32,2	45,1	64,5
	16		2,8	4,5	6,8	11,3	18,1	28,2	39,5	56,4
	18		2,5	4,0	6,0	10,0	16,1	25,1	35,1	50,2
	20			3,6	5,4	9,0	14,4	22,6	31,6	45,1
	25			2,9	4,3	7,2	11,6	18,1	25,3	36,1
	30				3,6	6,0	9,6	15,0	21,1	30,1
	35				3,1	5,2	8,3	12,9	18,1	25,8
	40					4,5	7,2	11,3	15,8	22,6
	45					4,0	6,4	10,0	14,0	20,1
	50					3,6	5,8	9,0	12,6	18,1
	55						5,3	8,2	11,5	16,4
	60						4,8	7,5	10,5	15,0
	65						4,4	6,9	9,7	13,9
	70							6,4	9,0	12,9
	75							6,0	8,4	12,0
	80							5,6	7,9	11,3
85							5,3	7,4	10,6	
90								7,0	10,0	
95								6,7	9,5	
100								6,3	9,0	
110								5,7	8,2	
120									7,5	
130									6,9	

Fonte – [2]

Tabela 4-9 – Dimensionamento do ramal de ligação e entrada das instalações em 127/220 V.

MÉTODO DE CÁLCULO	TIPOS DE FORNECIMENTO	CARGA (KW)	DISJUNTOR TERMOMAGNÉTICO (A)	RAMAL DE LIGAÇÃO					CONDUTOR COBRE ISOLADO MÍNIMO DO CLIENTE FASE(NEUTRO) (MM²)	DIÂMETRO NOMINAL Ø ELETRODUTO DE AÇO GALVANIZADO (POL)	CONDUTOR DE ATERRAMENTO (AÇO COBREADO) (MM²)	DIÂMETRO NOMINAL Ø ELETRODUTO A TERRAMENTO (POL)
				DISTÂNCIA ATÉ 2 KM DA ORLA MARÍTIMA		DISTÂNCIA A PARTIR DE 2 KM DA ORLA MARÍTIMA						
				CABO DE COBRE CONCÊNTRICO OU DUPLEX (MM²)	CABO DE COBRE MULTIPLEXADO (MM²)	CABO DE ALUMÍNIO MULTIPLEXADO (MM²)						
						DUPLEX CONCÊNTRICO	TRIPLEX	QUA-DRUPLEX				
CARGA INSTALADA	MONOFÁSICO	Até 4	30 ou 32	-	-	10	-	-	6(6)	1"	6	1/2"
		4,1 até 10	63 ou 70	-	-	10	-	-	10(10)	1"	10	1/2"
	BIFÁSICO	≤10	40	-	-	-	10	-	10(10)	1 1/2"	10	1/2"
		10,1 até 15	60	-	-	-	16	-	10(10)	1 1/2"	10	1/2"
DEMANDA	TRIFÁSICO	≤ 15	40	-	-	-	-	16	10(10)	2"	10	1"
		15,1 até 27	70	-	-	-	-	25	16(16)	2"	16	1"
		27,1 até 38	100	-	-	-	-	35	25(25)	2"	25	1"
		38,1 até 47	125	-	-	-	-	50	35(25)	3"	25	1"
		47,1 até 57	150	-	-	-	-	70	50(25)	3"	25	1"
		57,1 até 66	175	-	-	-	-	95	70(35)	3"	35	1"
		66,1 até 75	200	-	-	-	-	95	70(35)	3"	35	1"

Fonte – [48]

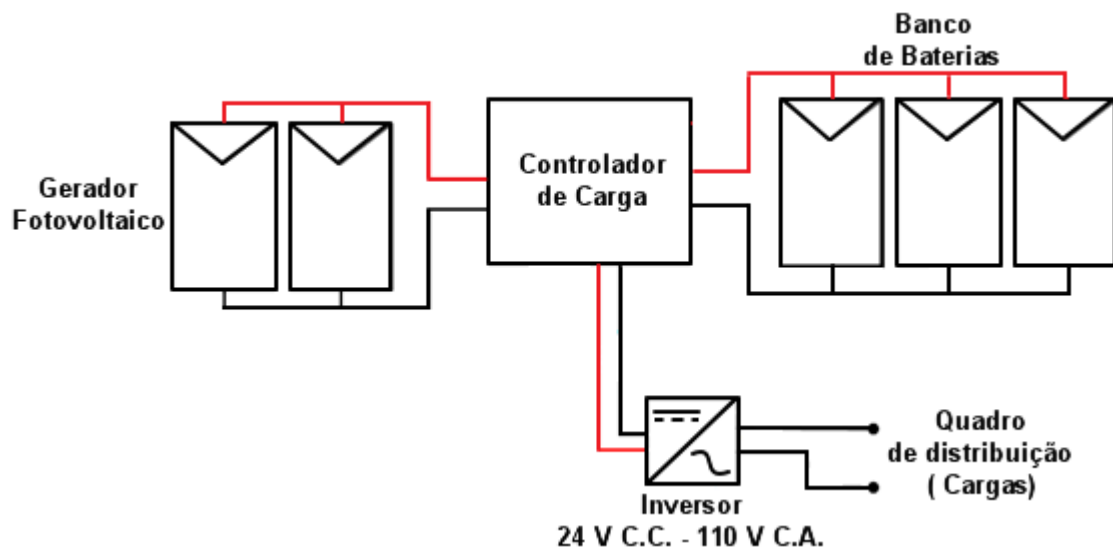
A Tabela 4.10 apresenta uma estimativa de custo em dólares (US\$) para os principais componentes do sistema considerando a cotação do dia 04/09/2014 de R\$ 2,2420 [49]. Nesta Tabela verifica-se que os módulos e baterias concentram a maior parte dos custos. O custo total do sistema seria de US\$ 3.989,42, considerando a cotação anterior, este valor equivale a R\$ 8.944,23. Na Figura 4.4 é mostrado um possível esquema de ligação para os componentes dimensionados anteriormente.

Tabela 4-10 – Estimativa de custo do sistema.

Estimativa de custo dos componentes do sistema fotovoltaico		
	Quantidade	Preço (US\$)
Módulo Fotovoltaico	4	1.086,53
Bateria	6	2.325,60
Controlador de carga	1	124,44
Inversor	1	302,85
Componentes elétricos (cabo, disjuntor, etc.)		150
Total		3.989,42

Fonte – Autoria própria.

Figura 4.4 – Esquema de ligação dos componentes do sistema.



Fonte – Autoria própria.

CONCLUSÃO

Os SIGs mostram-se como uma importante ferramenta para o processo de tomada de decisão nos mais diversos campos de aplicação desta tecnologia. Neste trabalho, empregou-se o SIG para criar mapas temáticos em que se pudesse observar o potencial de radiação solar para a Ilha do Marajó, visando desenvolver uma proposta de um sistema fotovoltaico para atender uma residência típica da região.

Dentre os componentes de um SIG, o que merece mais atenção do usuário é a base de dados. Neste trabalho foi necessário realizar o tratamento dos dados solarimétricos com o intuito de observar informações discrepantes e conseqüentemente diminuir os erros no produto final que são os mapas. O tratamento dos dados é uma tarefa que necessita de bastante atenção e tempo em sua execução.

Outro fator importante no uso da tecnologia SIG é que já existem soluções em softwares totalmente gratuitas e bem consolidadas, característica essa que reduz o custo dos projetos nesta área. O software QGIS apresenta-se como uma boa opção de escolha, pois além de ser gratuito, apresenta uma vasta gama de ferramentas ao usuário, o que dá uma versatilidade de aplicações e garante a qualidade do produto final.

Através dos mapas obtidos foi possível observar que os municípios do Marajó apresentam um bom potencial para geração de energia elétrica através da fonte solar. As médias da irradiação global, encontradas em toda a ilha, chegam a superar as médias de irradiação de países que apresentam um bom investimento em energias renováveis, como a Alemanha, França e Espanha.

Nos últimos anos, a legislação brasileira tem promovido o estabelecimento de normas e orientações acerca da utilização de fontes alternativas para geração de energia elétrica, em especial para os sistemas fotovoltaicos, incentivando a disseminação dessa fonte alternativa de energia. Essas iniciativas têm como meta a universalização dos serviços de energia, tendo em vista o direito à qualidade de vida, bem como a integração social.

Contudo, a implantação de um sistema fotovoltaico atualmente ainda é bastante onerosa. Isto se deve a falta de incentivos mais efetivos por parte do poder público e aos altos custos dos equipamentos necessários aos sistemas fotovoltaicos. No caso de sistemas isolados, deve-se ter uma atenção especial para a escolha das baterias, pois estas representam um valor considerável no momento da reposição do banco de baterias.

Os mapas solarimétricos mostraram o grande potencial de incidência solar na Ilha do Marajó. Através dos valores de radiação, verificou-se que é viável tecnicamente a geração de energia elétrica por meio da fonte solar em várias partes da ilha, além disso, observou-se que a região mais propícia para implantação de tais sistemas seria na região do litoral que abrange o município de Portel até Soure.

Como sugestão para futuros trabalhos destacam-se:

- Verificar a possibilidade do uso de softwares para a gestão de banco de dados, como por exemplo, o PostGIS, pois assim o processo de tratamento e edição de dados seria bem mais rápido.
- Um estudo e mapeamento de outras fontes renováveis para assim verificar a possibilidade de utilização destas fontes de energia de forma conjunta através de um sistema híbrido.
- Dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado conectado a uma mine-rede, com o objetivo de fornecimento de energia elétrica a uma comunidade.
- Realizar a implantação e o monitoramento do sistema, com o objetivo de verificar o desempenho do sistema projetado para o atendimento de uma residência com pequenas cargas.

REFERÊNCIAS

- [01] DUFFIE, J.; BECKMAN, W. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Willey&Sons, 1991.
- [02] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL, CRESSES. Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro, 2014.
- [03] RODRIGUES, M. J. S.; VALE, S. B. **Estudo de ângulos solares para a estimativa de irradiância solar em projetos de energia solar na cidade de Abaetetuba – PA**. II Seminário de Pesquisa e Extensão do Baixo Tocantins: temas, problemas e conhecimentos produzidos, Abaetetuba-PA, 2013.
- [04] FRAIDENRAICH, Naum e Lyra. **Energia Solar: Fundamentos e tecnologia de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica**. Recife, Ed. Universitária, 1995.
- [05] INÁCIO, Tais. **Potencial solar das radiações global, difusa e direta em Botucatu**. São Paulo. Universidade Estadual Paulista. 2009.
- [06] HODGE, B. K. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. Rio de Janeiro, LTC, 2011.
- [07] GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR – GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESSES. Edição especial. Rio de Janeiro, 2004.
- [08] SANTOS, Marco Aurélio dos. **Fontes de energia nova e renovável**. 1. Ed. Rio de Janeiro. LTC, 2013.
- [09] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte, CEMIG, 2012.

- [10] *World Meteorological Organization. Manual on the global observing system*. Geneva: WMO, n.544, 2013. Disponível em: <<https://docs.google.com/file/d/0BwdvoC9-AeWjUV2dIQmlSUkpOYm8/edit>>. Acessado em 16 Abr. 2014.
- [11] CAMPBELL SCIENTIFIC. **Piranômetro CMP11-L**. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com/cmp11>>. Acessado em 14 Mar. 2014.
- [12] CAMPBELL SCIENTIFIC. **Pireliometro CHP1**. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com.br/produtos.php?cat=pireliometro>>. Acessado em 14 Mar. 2014.
- [13] TIBA, Chiguera.; FRAIDENRAICH, Naum.; MOSZKOWICZ, Maurício.; CAVALCANT, Evandro Sérgio C.; LYRA, Francisco José Maciel,; NOGUEIRA, Ângela Maria de B.; GALLEGOS, Hugo Grossi. **Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos**. Recife, Ed. Universitária da UFPE, 2000.
- [14] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO – CRESESB. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_solar>. Acessado em 20 Mar. 2014.
- [15] ZILLES, Roberto.; MACÊDO, Wilson Negrão.; GALHARDO, Marcos Adré B.; OLIVEIRA, Sérgio Henrique F. **Sistema fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo. Oficina de textos, 2012.
- [16] PEREIRA, Alisson Cruz. **Geração de energia para condomínio utilizando sistema fotovoltaico autônomo - estudo de caso em edifício residencial com seis pavimentos**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.
- [17] GUZZO, Rodrigo Costa. **Projeto básico de um sistema fotovoltaico para geração de energia elétrica**. Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2008.
- [18] OLIVEIRA, E. M. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico fixo conectado à rede: estudo de caso do campus universitário de Abaetetuba**. Universidade Federal do Pará, 2013.

[19] NEOSOLAR ENERGIA. **Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes.** Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acessado em 20 Mai. 2014.

[20] SILVA JUNIOR, Carlos Roberto José da. **Projeto de um sistema fotovoltaico para energização de um equipamento de pesca com eletricidade.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

[21] SILVA, R. F. **Desenvolvimento de um sistema de informações geográficas em ambiente web para gestão espacial de estações rádio base.** Belém: UFPA, 2009.

[22] CÂMARA, Gilberto.; DAVIS, Clodoveu.; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos, INPE, (on-line, 2a. edição, revista e ampliada) 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd>>. Acesso em 30 Jan. 2014.

[23] FREITAS, Eduardo. Sistemas de informação geográfica: A maneira como o Google vai dominar as geotecnologias mostra como esta área evoluiu. **Scientific Amareican Brasil**, 2014. Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/artigos/sistemas_de_informacao_geografica.html>. Acesso em 30 Jan. 2014.

[24] MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Sistema de Informações Geográficas.** Disponível em: <<http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/sig.html>>. Acesso em 30 Jan. 2014.

[25] DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO A. V. M. **Análise espacial de dados geográficos.** Brasília, Embrapa, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise>>. Acesso em 30 Jan. 2014.

[26] MINARD, Charles Joseph. Hannibal Crosses the Alps. **Cartographia.wordpress.com**, 2008, Disponível em;<<http://cartographia.wordpress.com/2008/06/02/hannibal-crosses-the-alps/>>. Acesso em 29 Jan. 2014.

- [27] CÂMARA, Gilberto.; CASANOVA, Marco A.; HEMERLY, Andrea S.; MAGALHÃES, Geovane C.; MEDEIROS, Claudia M. B. **Anatomia de Sistema de Informação Geográfica**. Rio de Janeiro, 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/-gilberto/livro/anatomia.pdf>>. Acesso em 31 Jan. 2014.
- [28] FITZ, Paulo. Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo, Oficina de textos, 2008.
- [29] OLAYA, Víctor. **Sistema de Información Geográfica**. Versão 1.0 on-line, 2011. Disponível em: <http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG>. Acesso em 10 Jan. 2014.
- [30] MEDEIROS, M. L. **Artigos sobre conceitos em geoprocessamento**. 2012. Disponível em: <<http://andersonmedeiros.com/e-book-sobre-conceitos-em-geoprocessamento/>>. Acesso em 31 Jan. 2014.
- [31] LONGLEY, Paul A.; GOODCHILD, Michael F.; MAGUIRE, David J.; RHIND, David W. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. Tradução: André Schneider et. al. Revisão técnica: Hasenack, Eliseu José Weber. 3 ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.
- [32] **Síntese do Capítulo II - Linguagens e representações cartográficas**. Disponível em: <<http://licenciaturageografiauniube.blogspot.com.br>>. Acesso em 25 Mar. 2014.
- [33] WALSH, Al. **Navigation skills: Latitude and Longitude**. 2012. Disponível em: <<http://www.justtrails.com/nav-skills/navigation-skills-latitude-and-longitude>>. Acesso em 25 Mar. 2014.
- [34] LANG, Stefan. **Análise da paisagem com SIG**. São Paulo, oficina de textos, 2009.
- [35] NANNI, A. S.; DESCOVI FILHO, L; VIRTUOSO M. A.; MONTENEGRO, D.; WILLRICH, G.; MACHADO P. H.; SPERB, R.; DANTAS, G. S.; CALAZANS, Y. **Quantum GIS - Guia do Usuário, Versão 1.7.4 'Wroclaw'**. Disponível em: <http://qgisbrasil.files.wordpress.com/2012/05/guia_do_usuario_174_pt_br1.pdf>. Acesso em 11 Jun. 2013.

[36] QUANTUM GIS. Software SIG utilizado para obtenção dos mapas temáticos. Disponível para download em: <<http://qgis.org/en/site/forusers/download.html>>. Acesso em 18 Jun. 2014.

[37] ASSOCIAÇÃO DOS MUNICÍPIOS DO ARQUIPÉLAGO DO MARAJÓ – AMAM. **Linhão do Marajó**. Disponível em: <http://www.amam-marajo.org/noticia_detalhes.asp?-codigo=1038>. Acessado em 08 Jan. 2014.

[38] GOOGLE MAPAS, **Ilha do Marajó**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@1.1607429,50.6303208,393163m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>>. Acessado em 10 Ago. 2014.

[39] VIANA, Trajano de Souza. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFCS, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2010.

[40] PEREIRA, Enio Bueno,; MARTINS, Fernando Ramos,; ABREU, Samuel Luna de,; RÜTHER, Ricardo. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos, 1ª Edição INPE, 2006.

[41] GOOGLE MAPAS, **Município de Muaná**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@1.5856186,49.2301294,17911m/data=!3m1!1e3>>. Acessado em: 01 Jun. 2014.

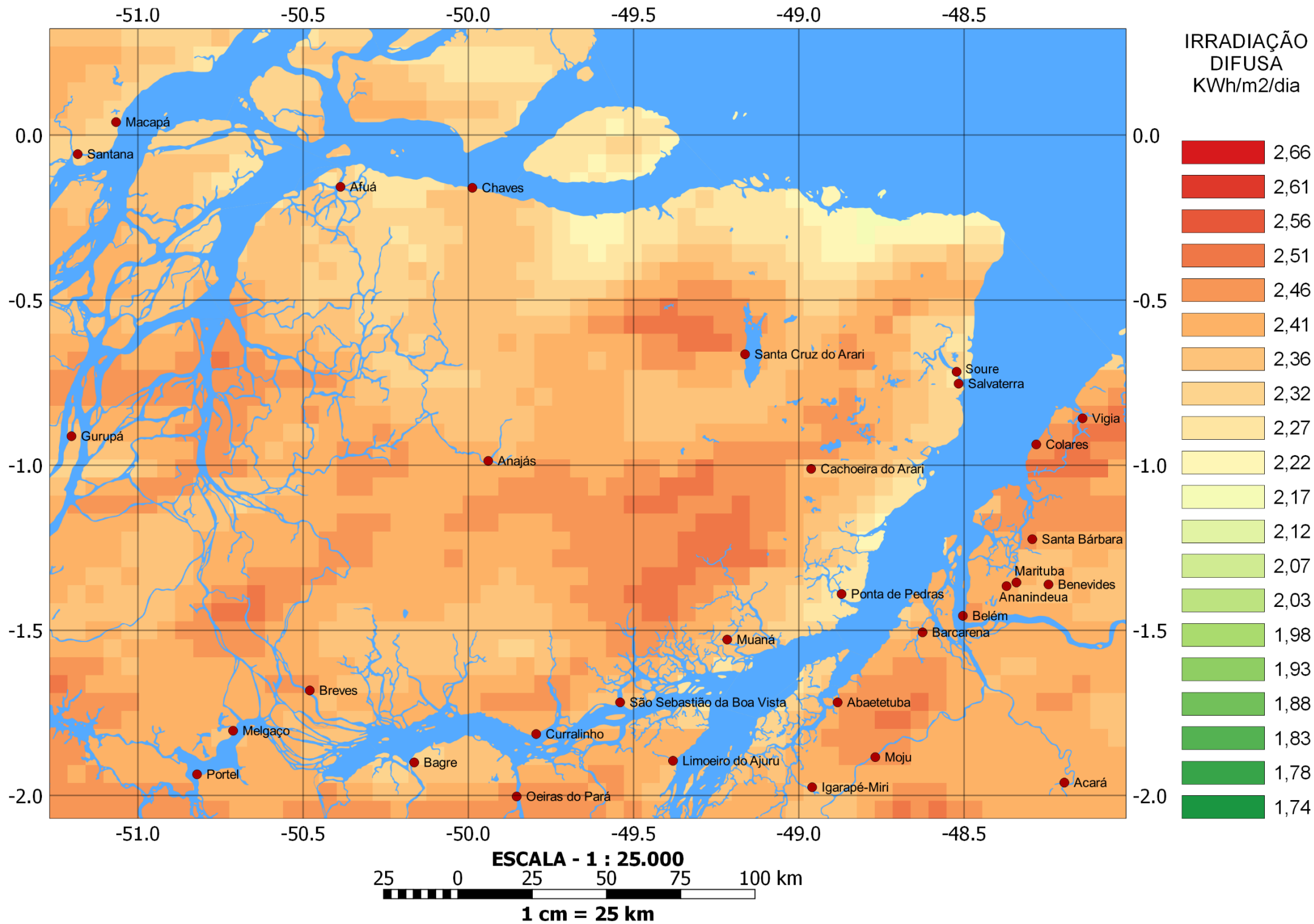
[42] Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução normativa nº 483/12, de 5 de junho de 2012**. Disponível em: <www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acessado em: 30 Jun. 2014.

[43] YINGLI SOLAR, **Painel Solar Fotovoltaico - Yingli 140W YL140P-17b - Especificações Técnicas - en**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-yingli-yl140p-17b-140wp.html>>. Acessado em 09 Jun. 2014.

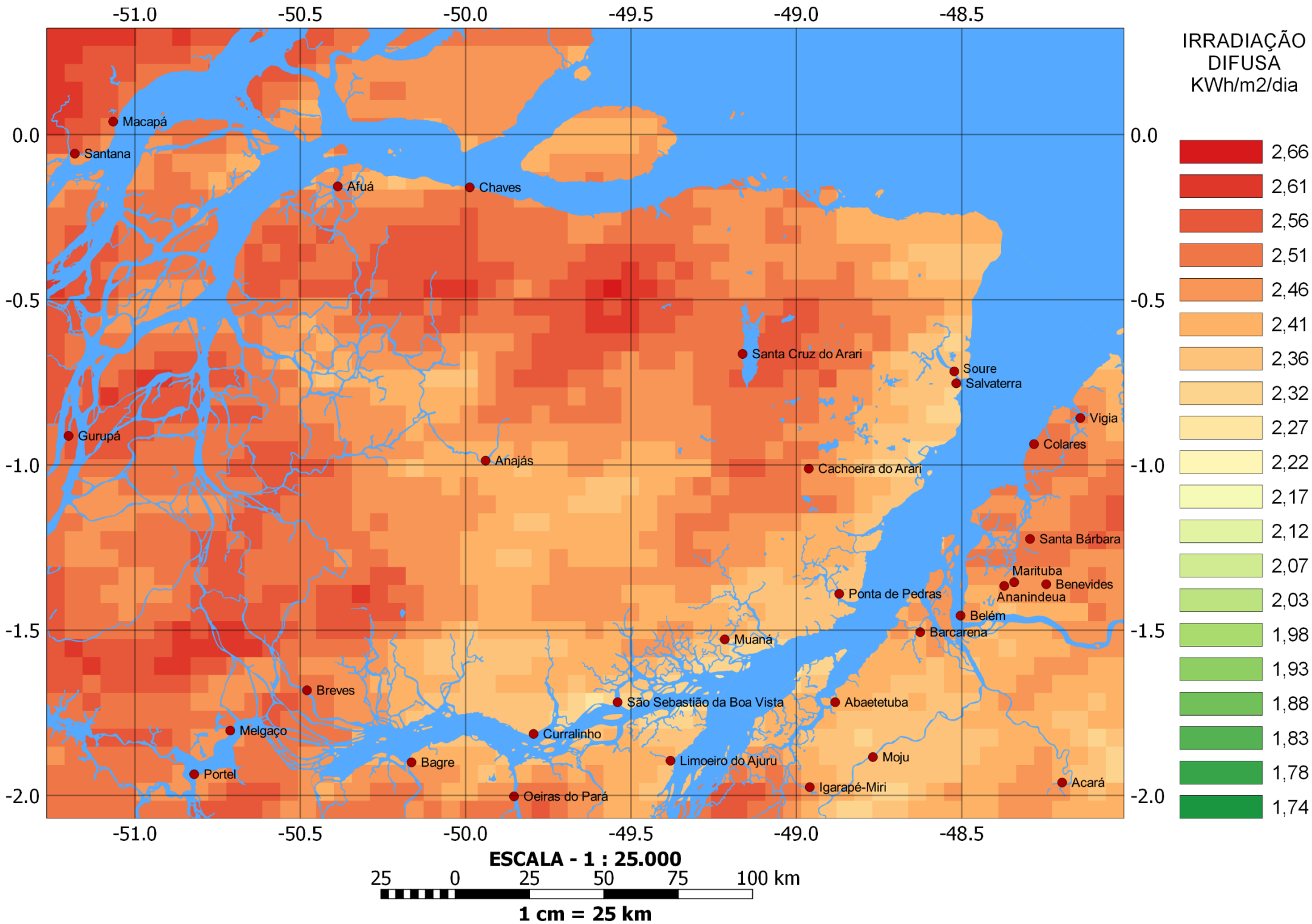
- [44] HELIAR, **Catálogo técnico bateria estacionária freedom**. Disponível em: <http://d26maze4pb6to3.cloudfront.net/heliar/2713/9402/8933/Catlogo_Freedom_EM_BAIXA.pdf>. Acessado em 09 Jun. 2014.
- [45] NEOSOLAR ENERGIA, **Controlador de Carga Epsolar Landstar LS2024 20A 12/24V**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/controlador-de-carga-epsolar-landstar-ls2024-20a-12-24v.html>>. Acessado em 01 Jul. 2014.
- [46] NEOSOLAR ENERGIA, **Off-grid-Inversor Xantrex PROwatt 250W (24Vcc / 120Vac / 250W / 60Hz)**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/loja/inversor-xantrex-prowatt-250w-24vcc-120vac-250w-60hz.html>>. Acessado em 01 Jul. 2014.
- [47] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, **NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão**. 2004.
- [48] Centrais Elétricas do Pará – CELPA. **Fornecimento de energia elétrica em baixa tensão**. Norma técnica NT.31.001, de 16 de junho de 2014. Disponível em: <http://www.mzweb.com.br/cemar/web/download_arquivos.asp?id_arquivo=8E256E4D-B27B-4BAA-B869-CCAB5B97362E>. Acessado em 20 Ago. 2014.
- [49] UOL ECONOMIA. **Uol economia cotações: cotação do dólar comercial**. Disponível em: <<http://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/dolar-comercial-estados-unidos/>>. Acesso em: 04 Set. 2014.

APÊNDICE A – Mapas de irradiação solar difusa

JANEIRO



FEVEREIRO



MARÇO

-51.0

-50.5

-50.0

-49.5

-49.0

-48.5

0.0

-0.5

-1.0

-1.5

-2.0

**IRRADIAÇÃO
DIFUSA
KWh/m2/dia**

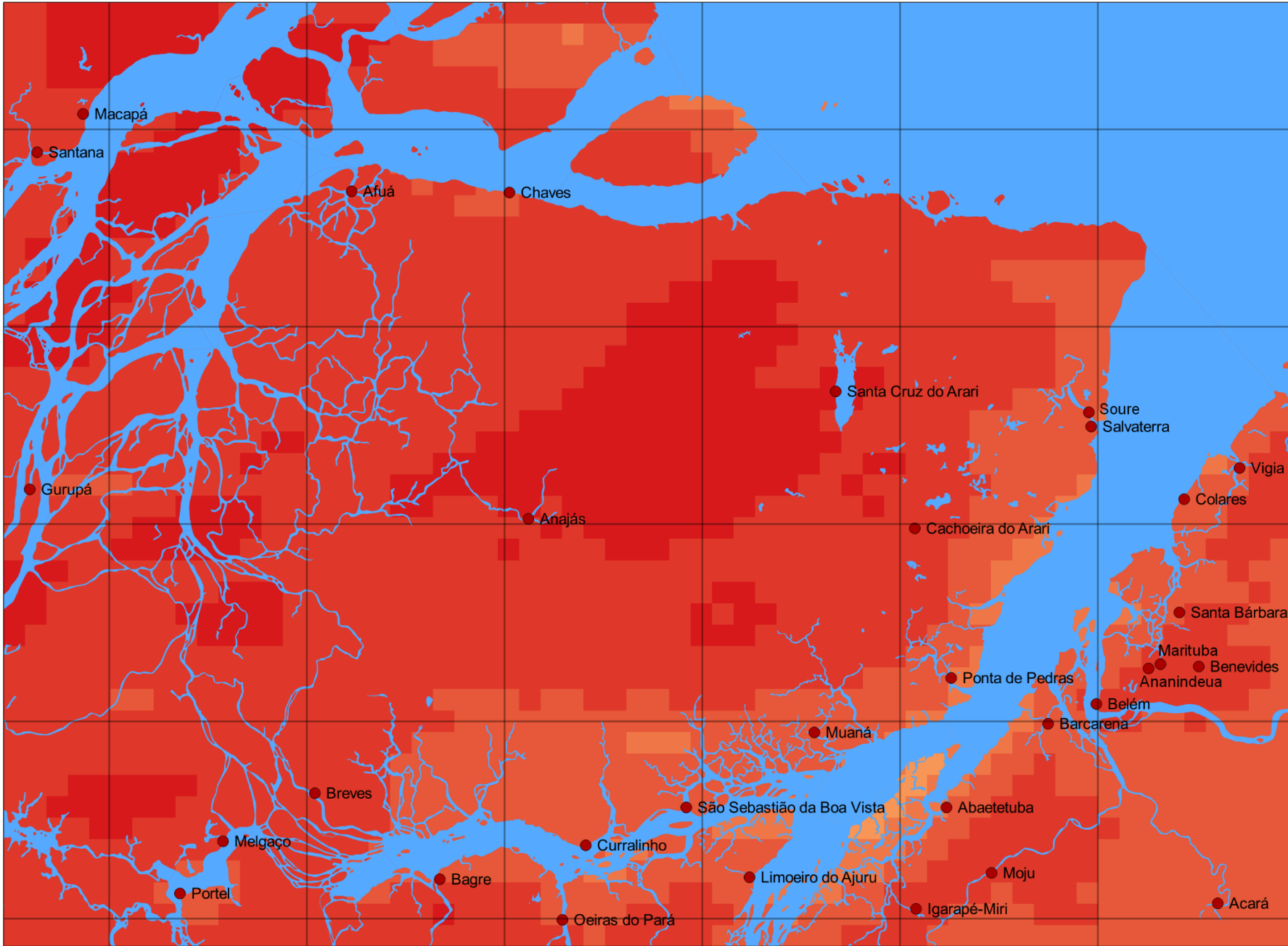
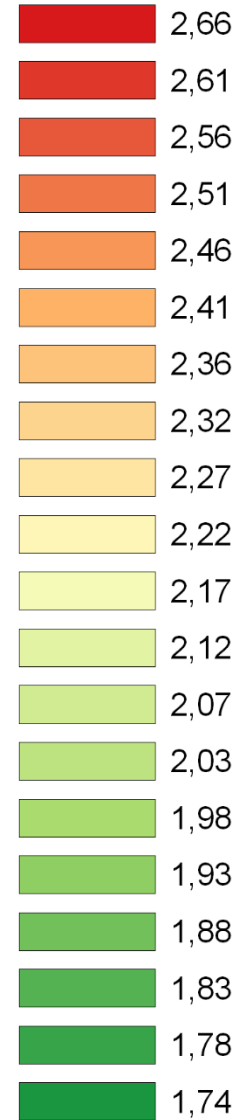
0.0

-0.5

-1.0

-1.5

-2.0



-51.0

-50.5

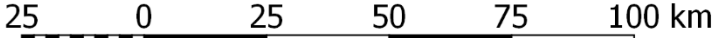
-50.0

-49.5

-49.0

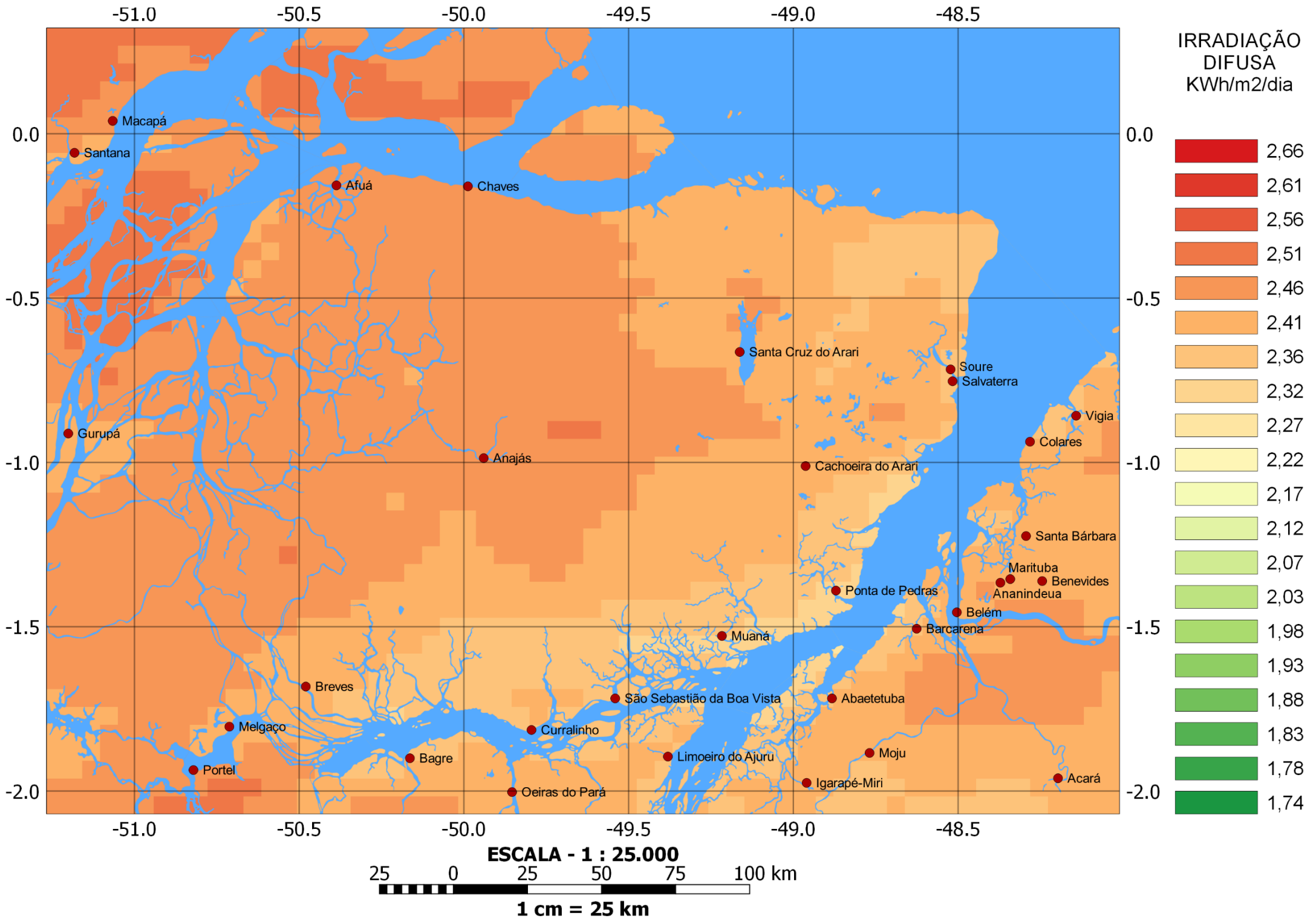
-48.5

ESCALA - 1 : 25.000

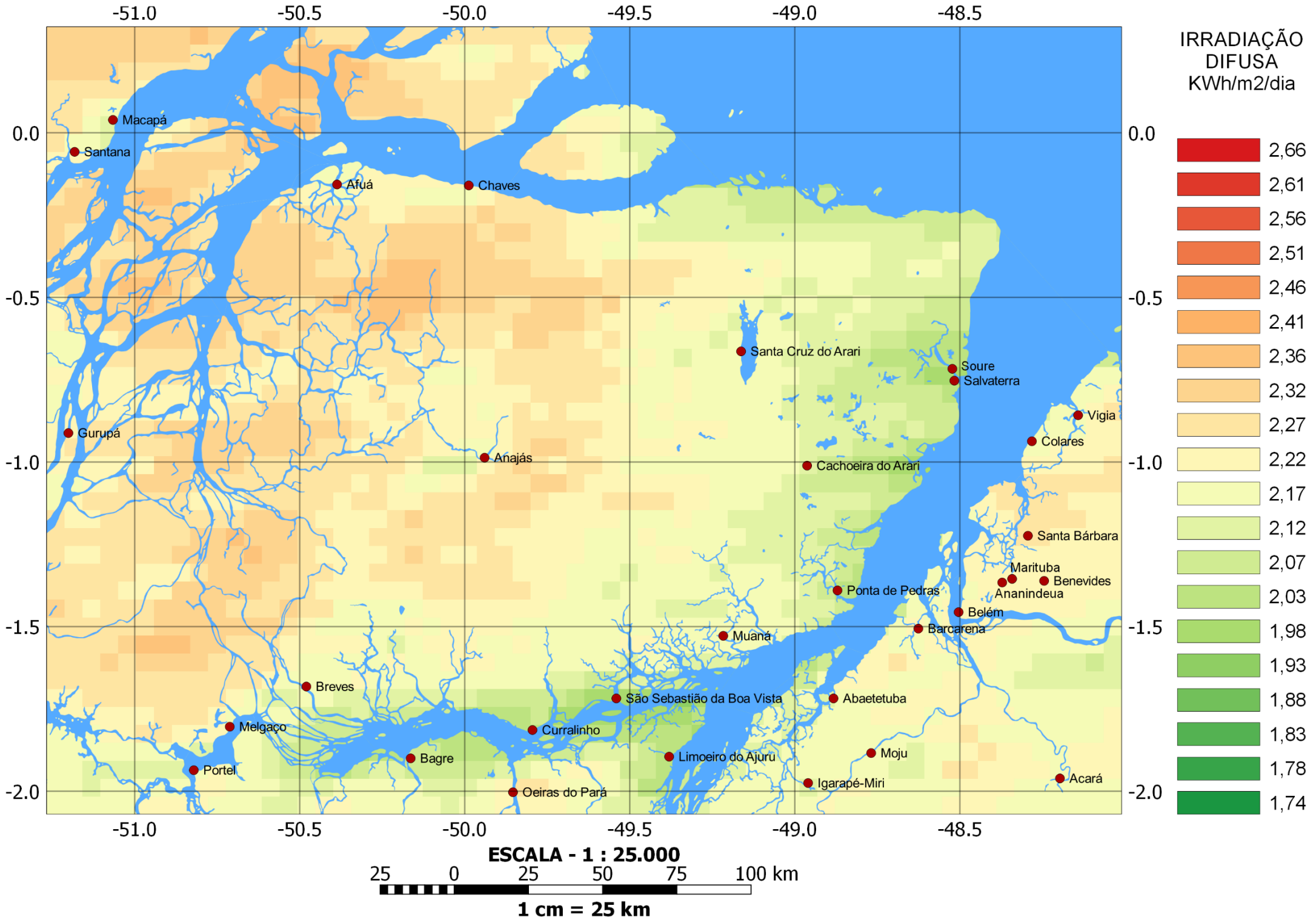


1 cm = 25 km

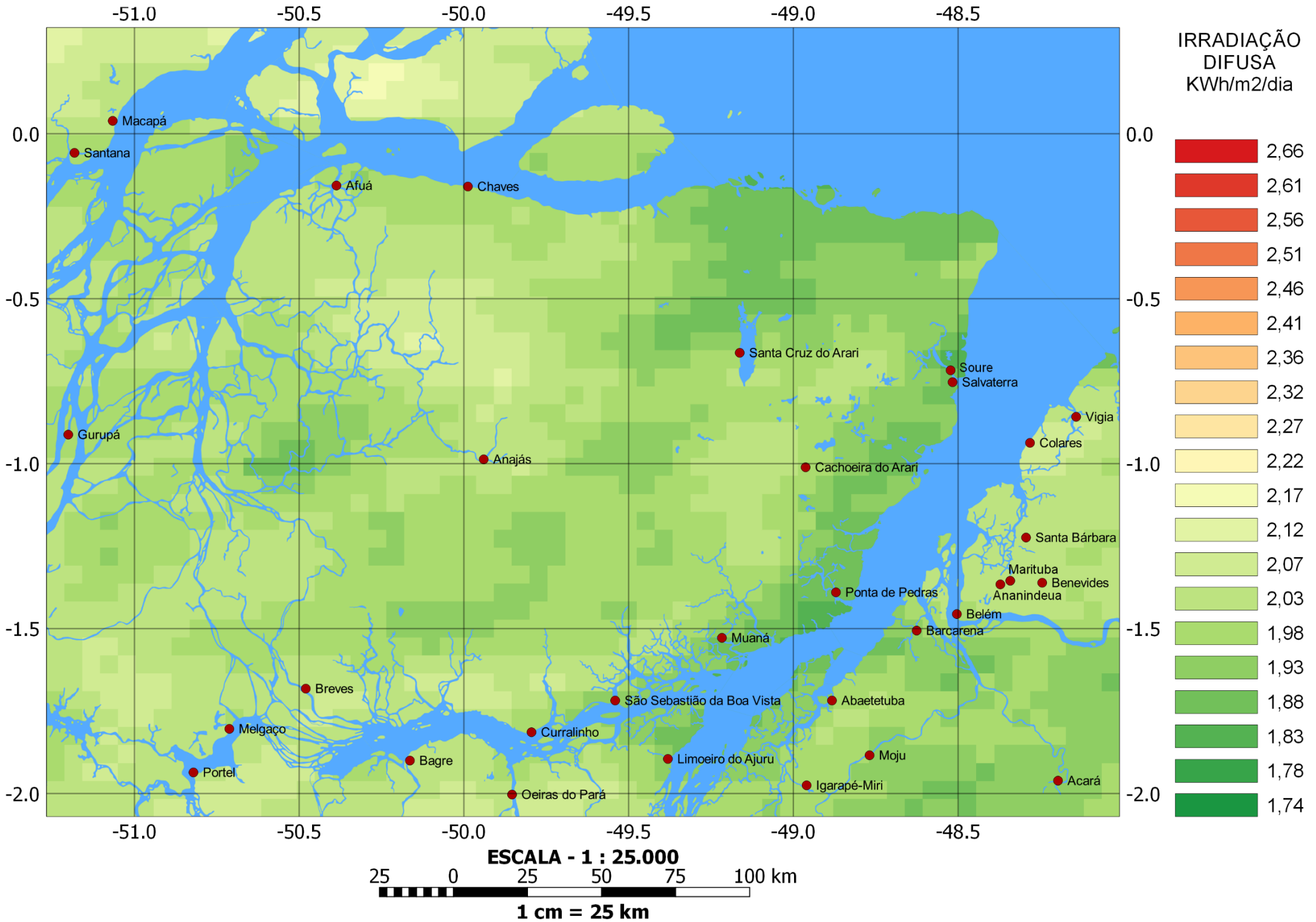
ABRIL



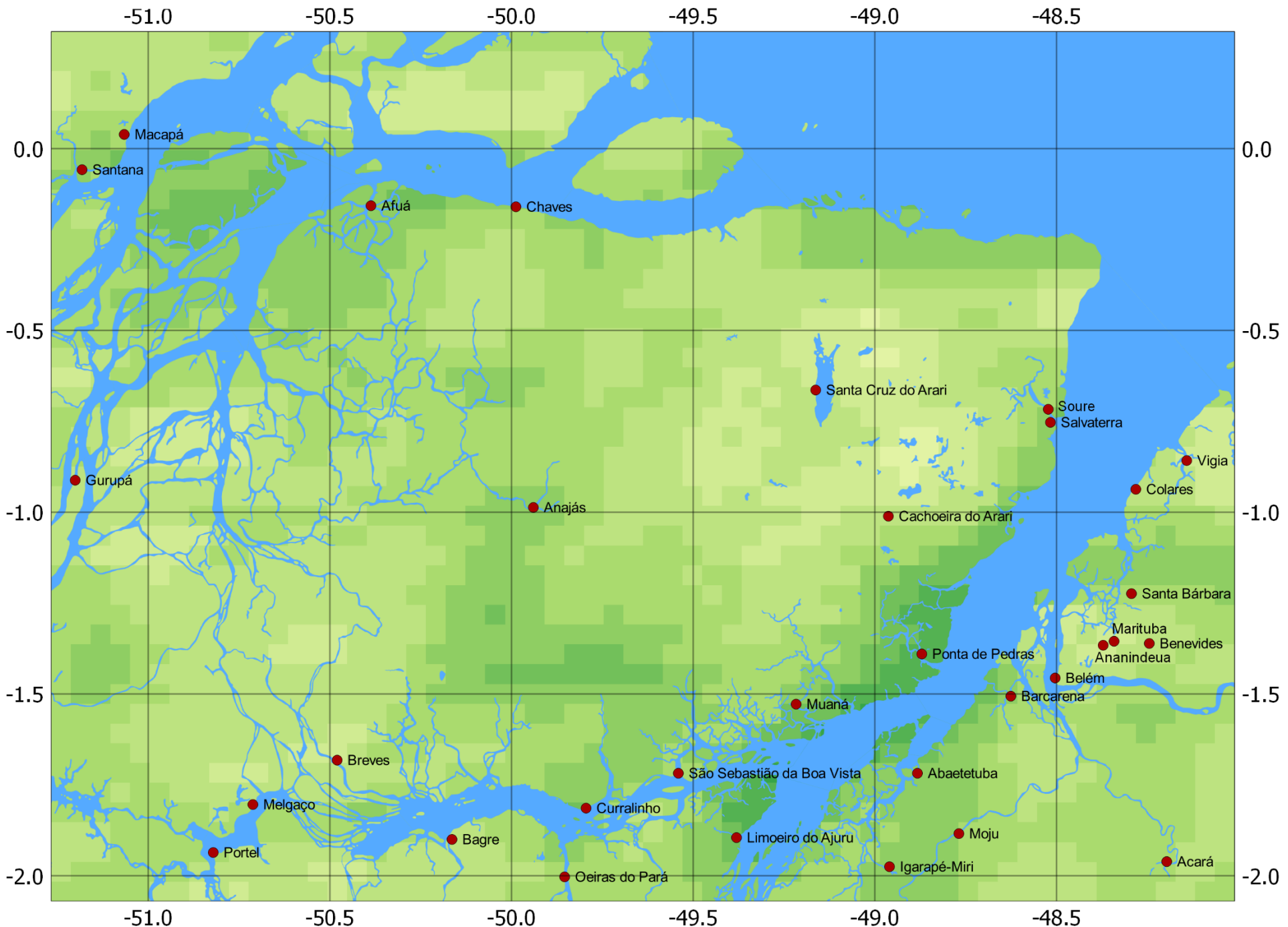
MAIO



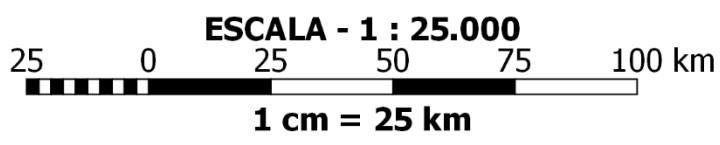
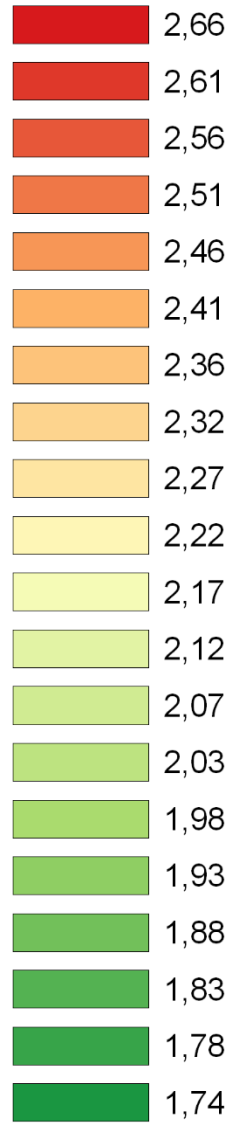
JUNHO



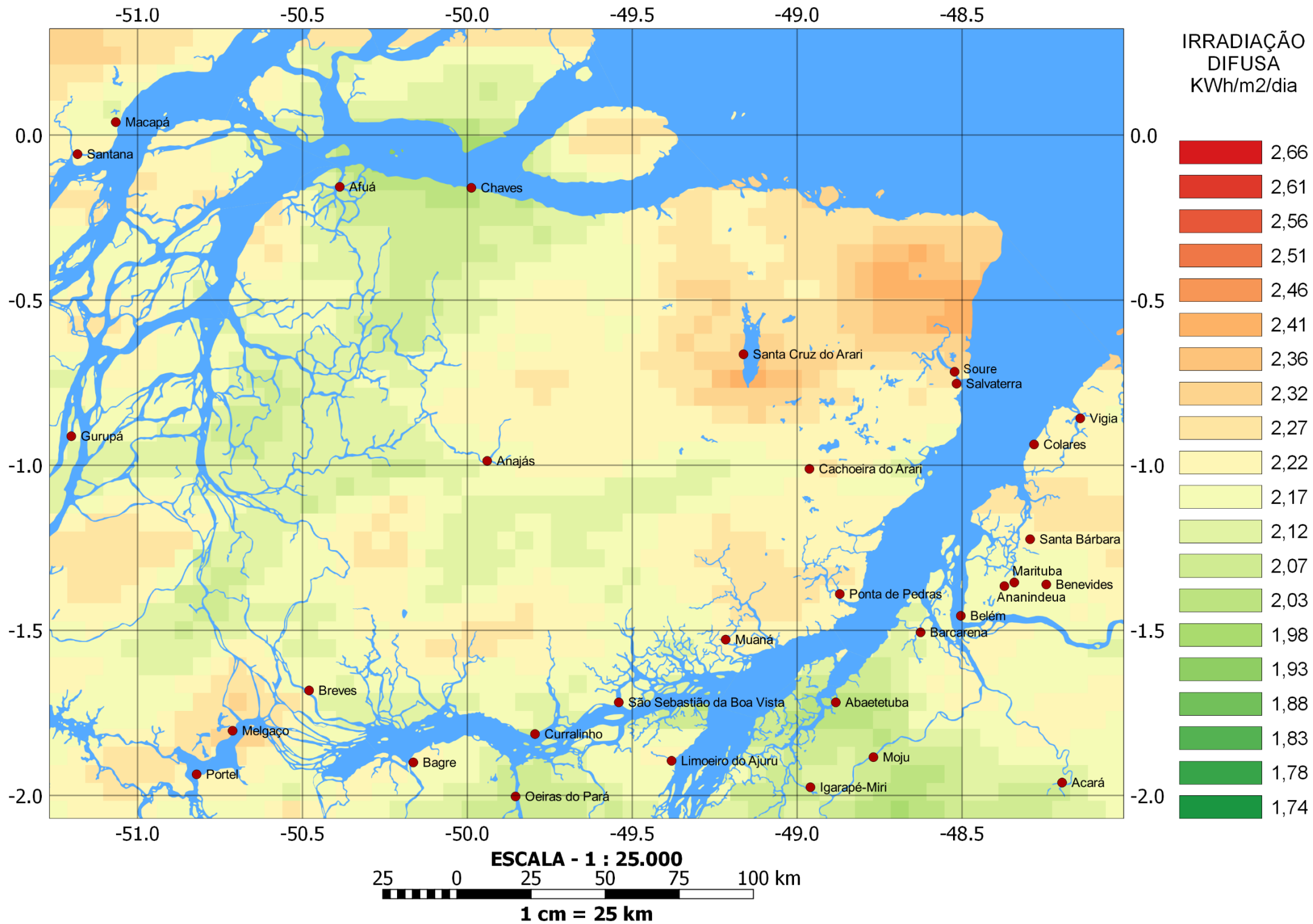
JULHO



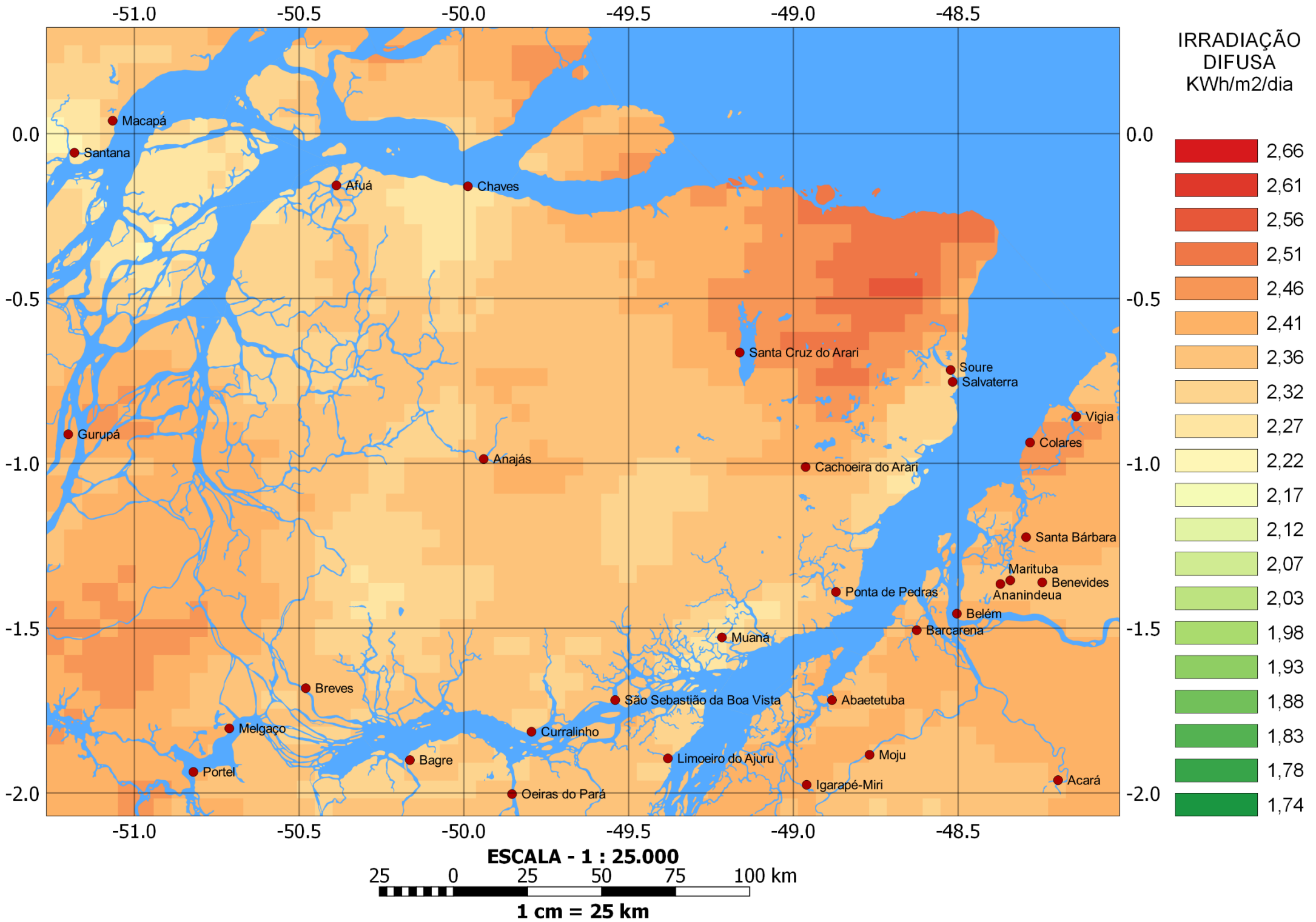
IRRADIAÇÃO DIFUSA
KWh/m2/dia



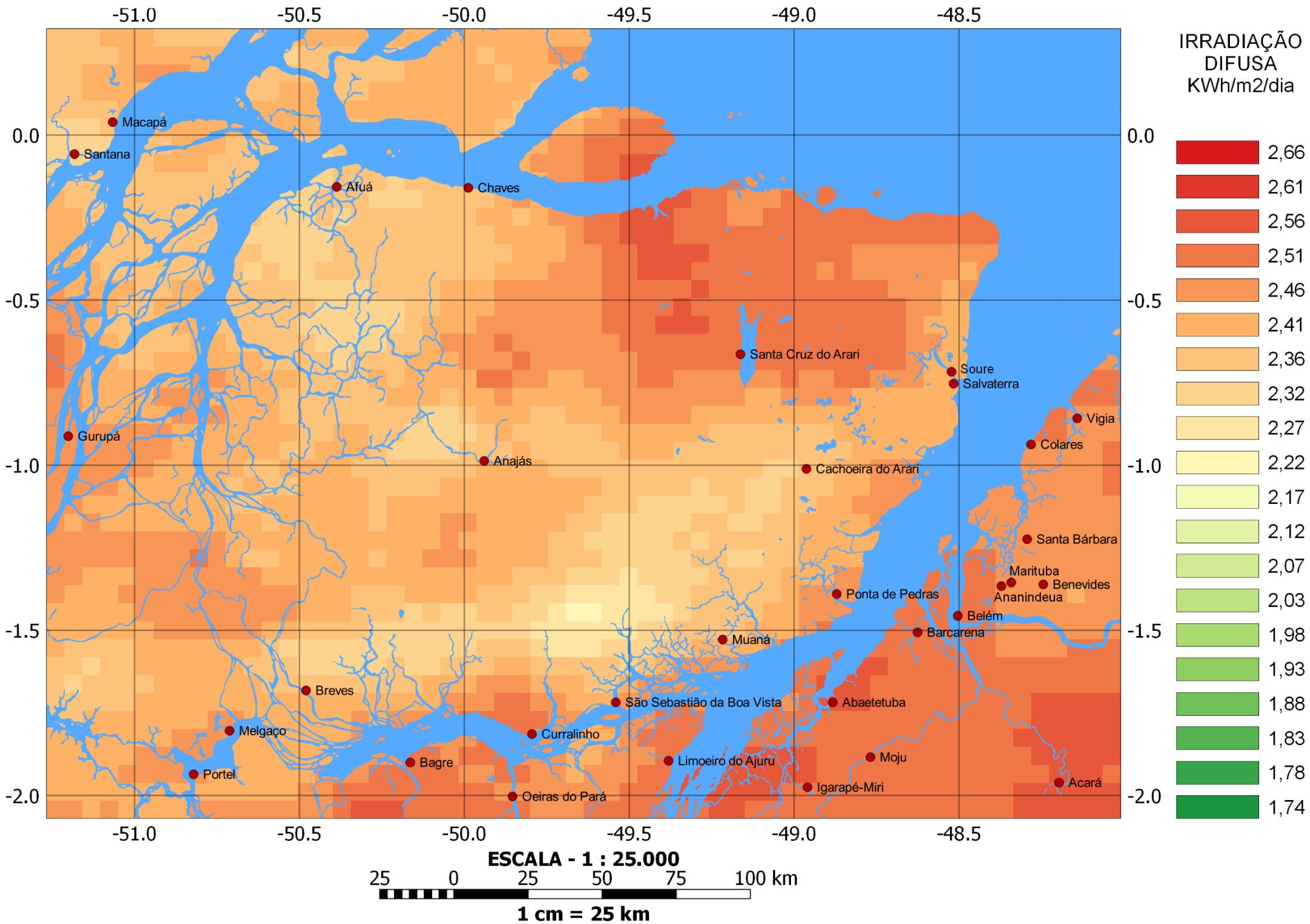
AGOSTO



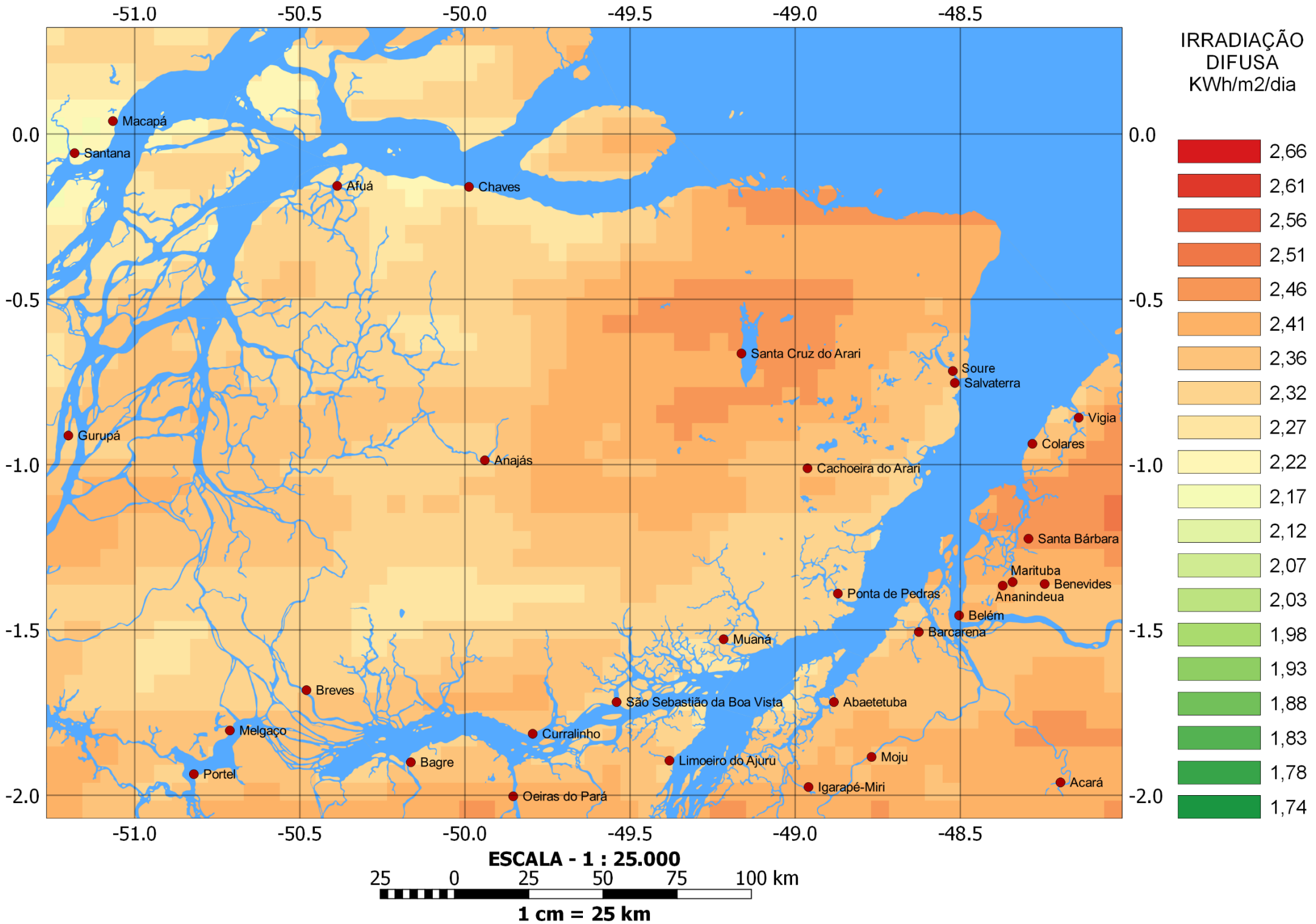
SETEMBRO



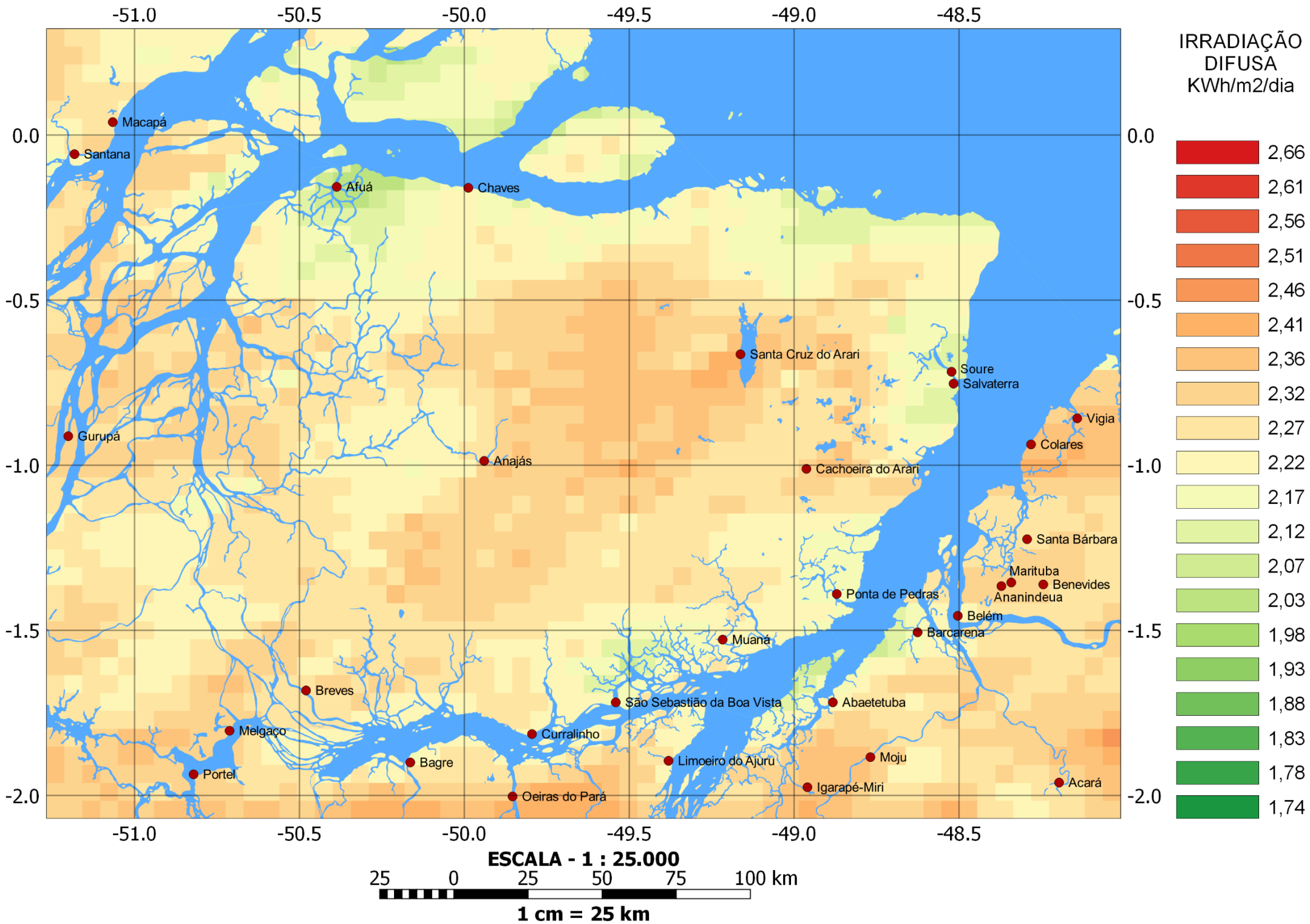
OUTUBRO



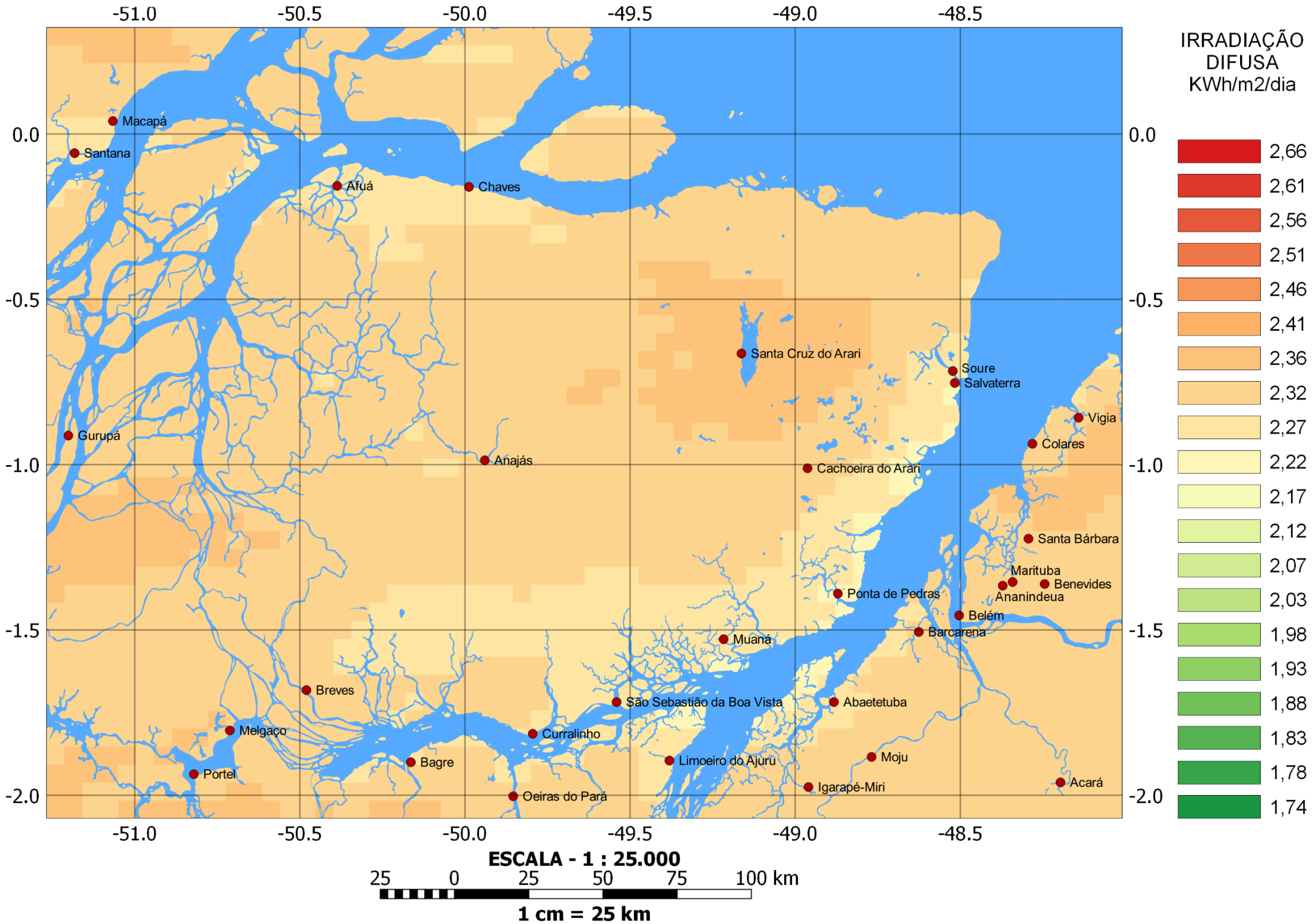
NOVEMBRO



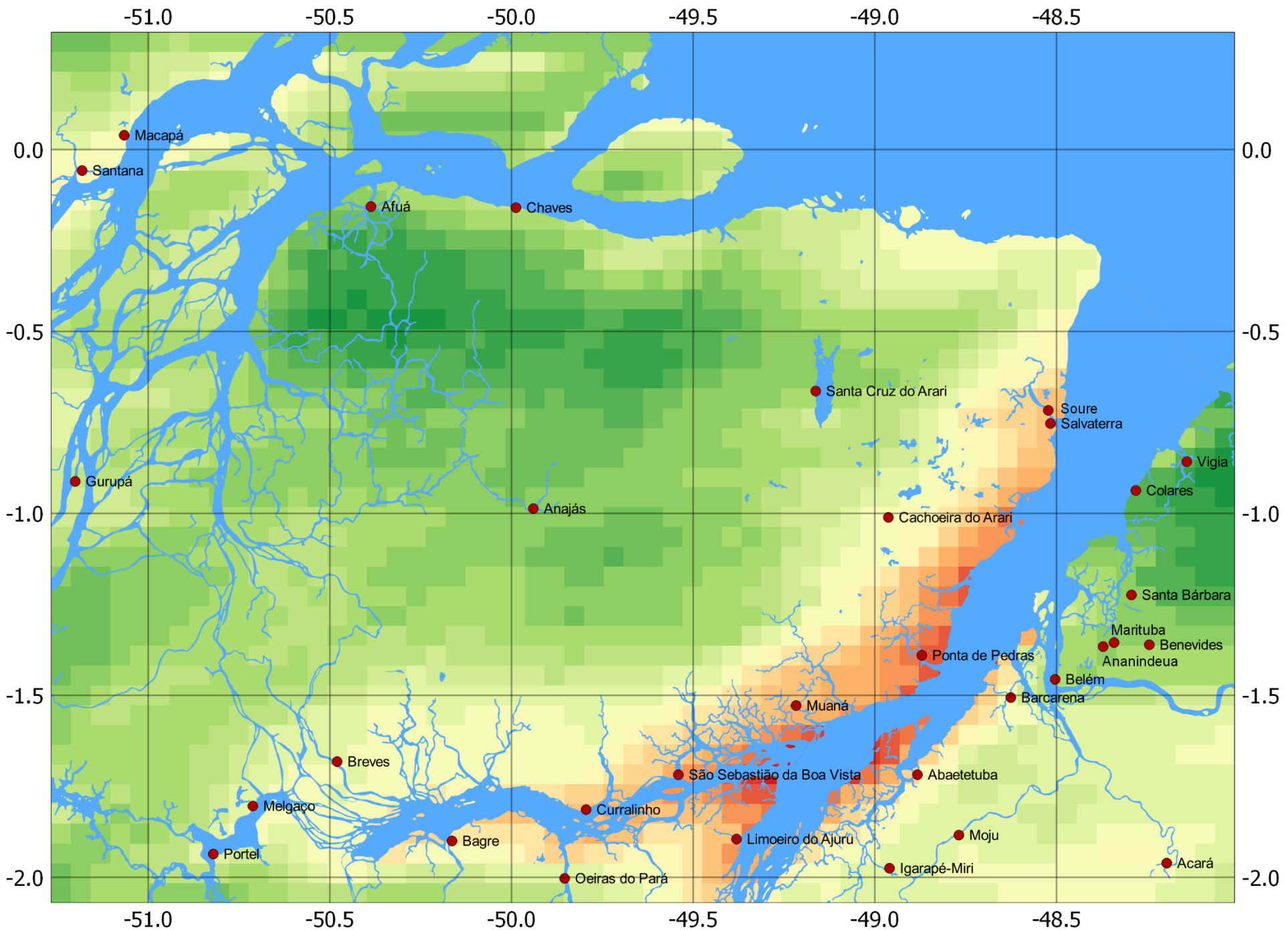
DEZEMBRO



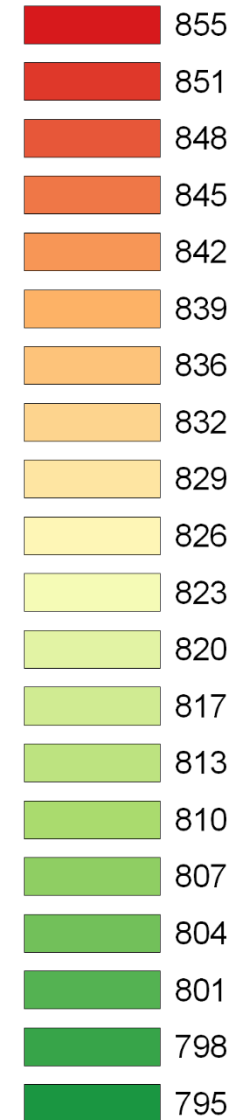
MÉDIA ANUAL



TOTAL ANUAL



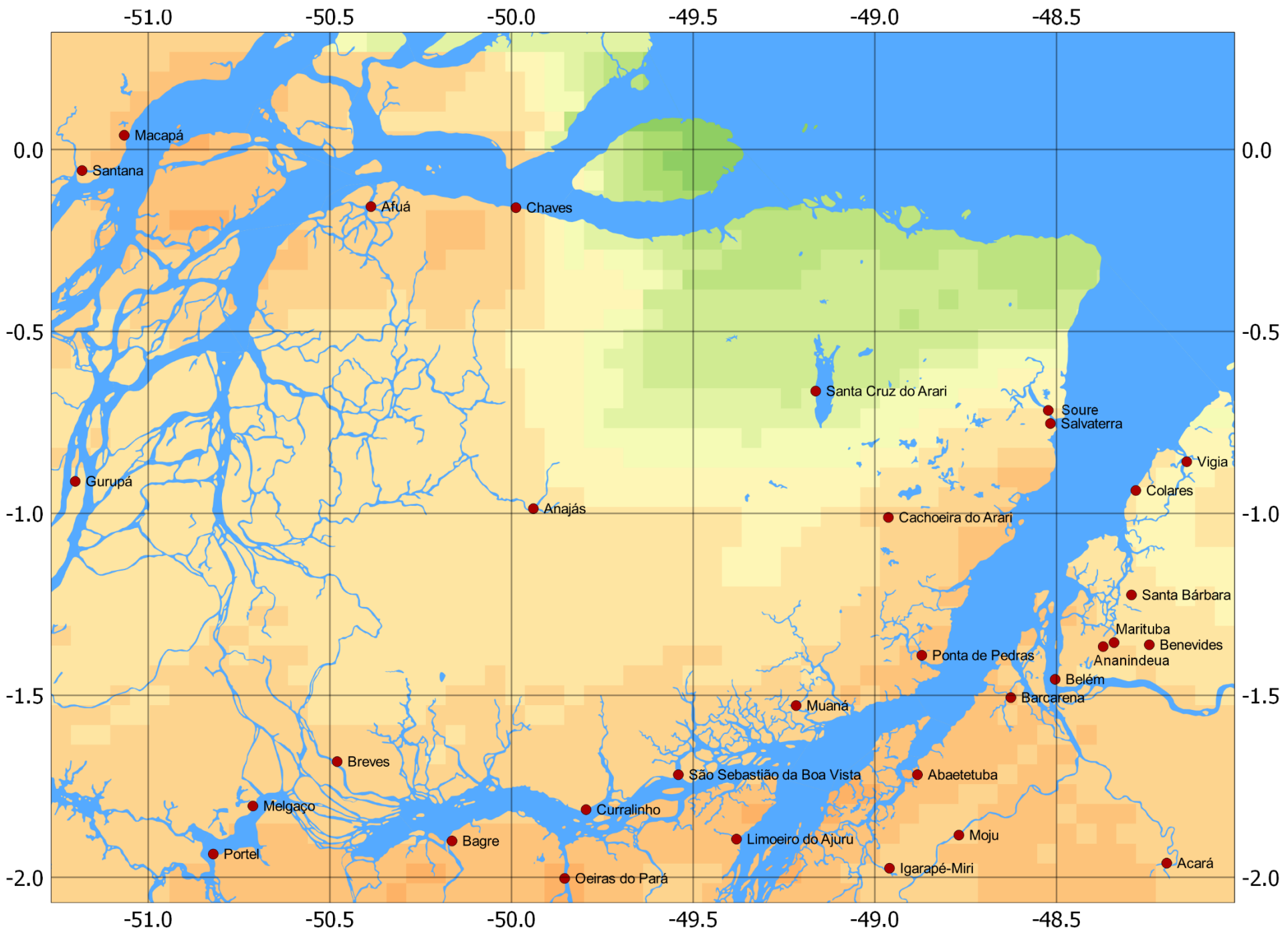
IRRADIAÇÃO
DIFUSA
KWh/m²/ano



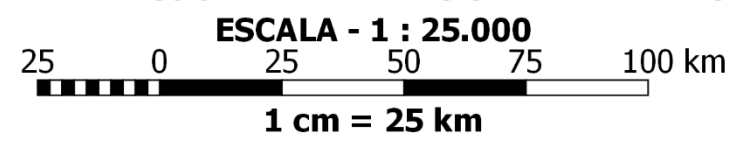
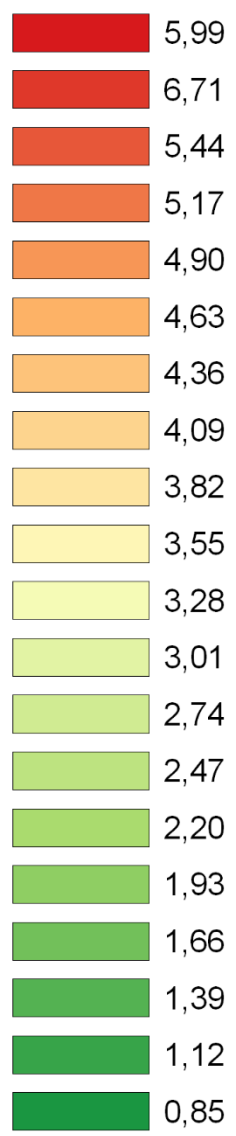
ESCALA - 1 : 25.000
25 0 25 50 75 100 km
1 cm = 25 km

APÊNDICE B – Mapas de irradiação solar direta

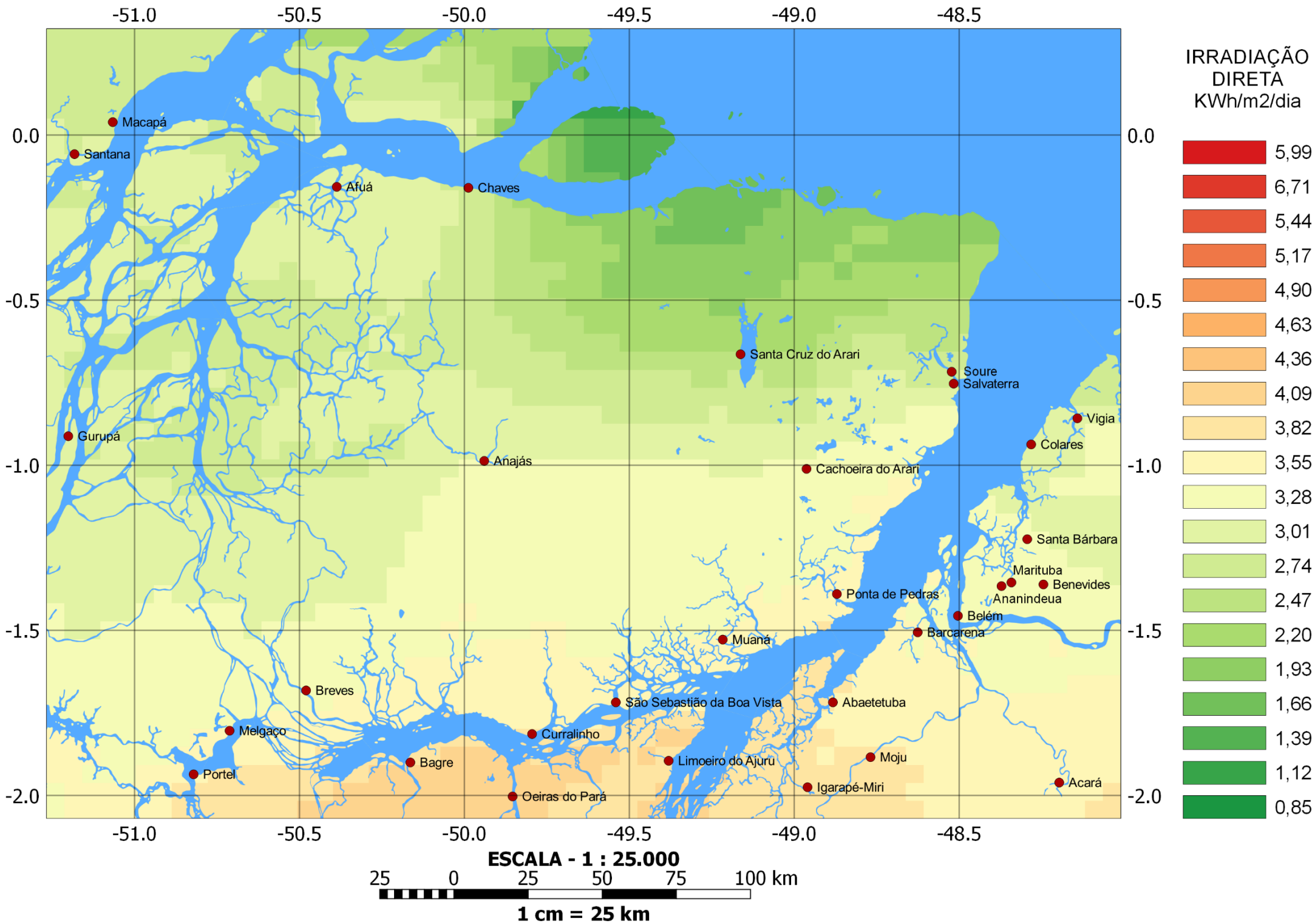
JANEIRO



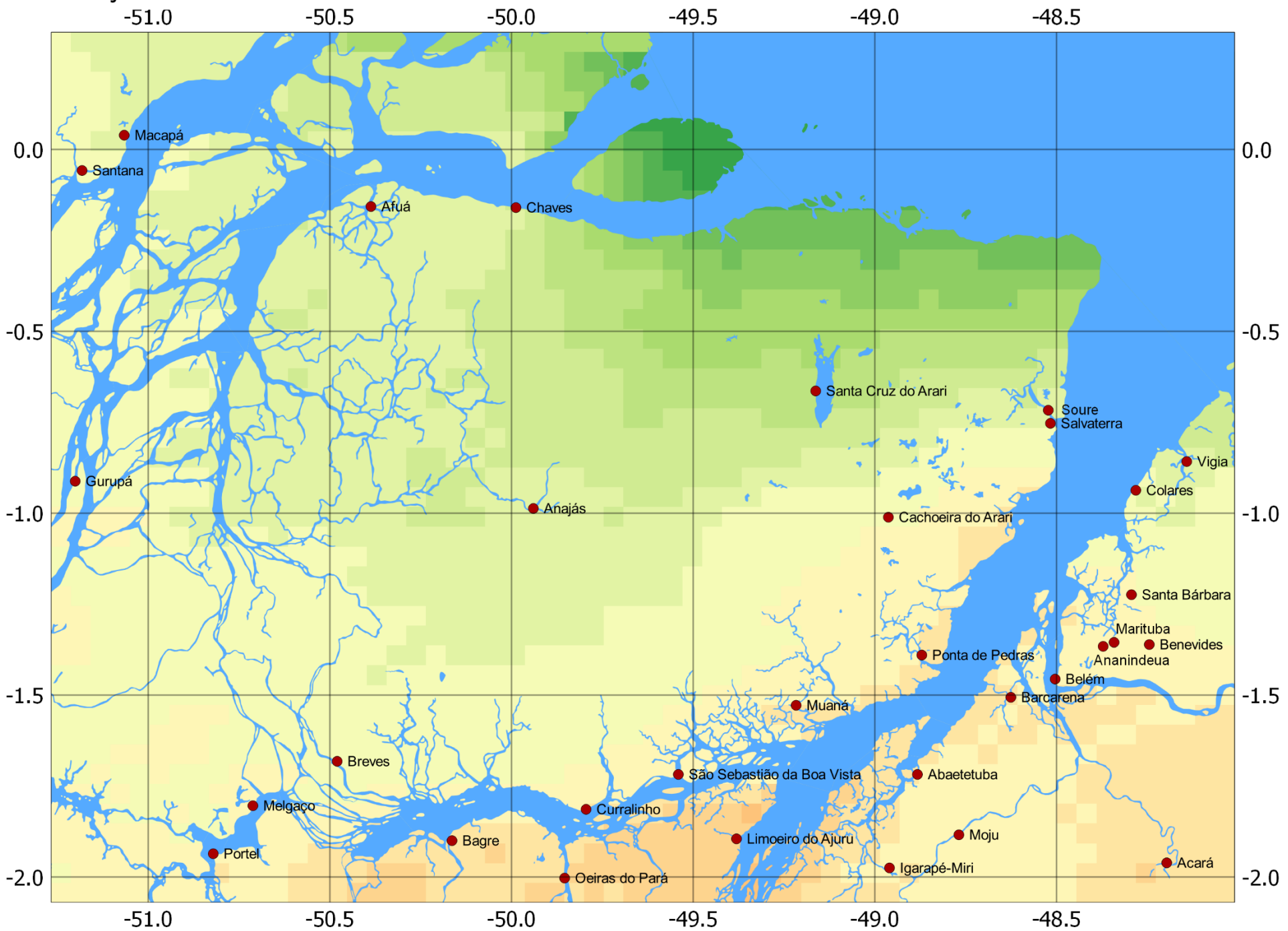
IRRADIAÇÃO DIRETA
KWh/m²/dia



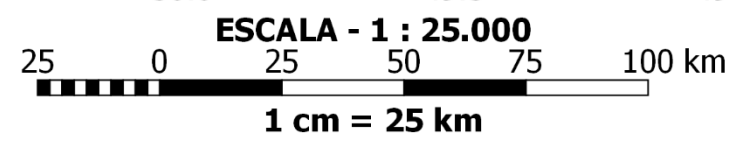
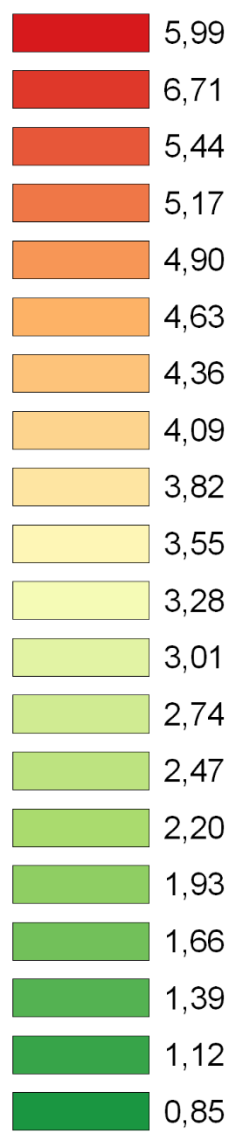
FEVEREIRO



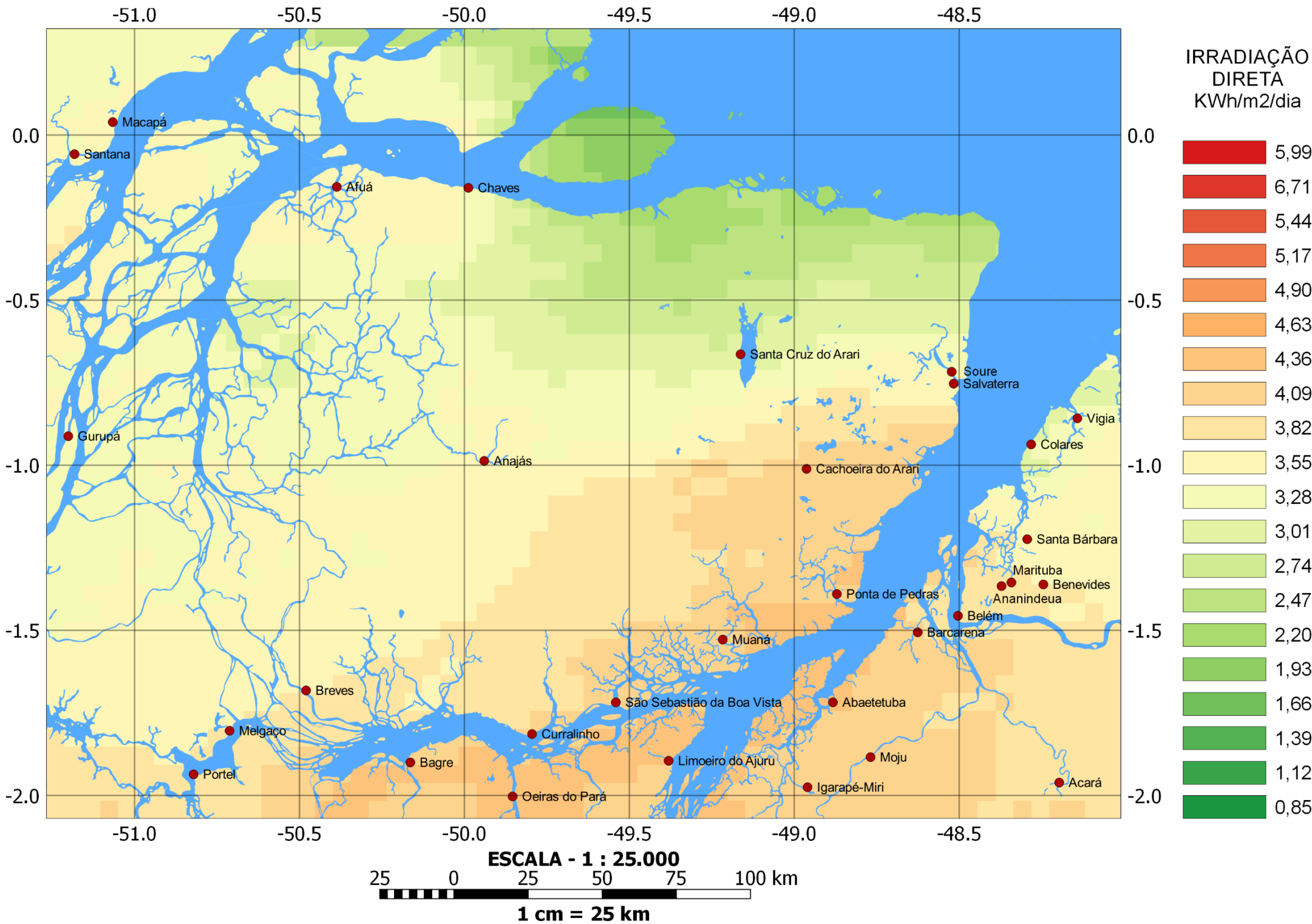
MARÇO



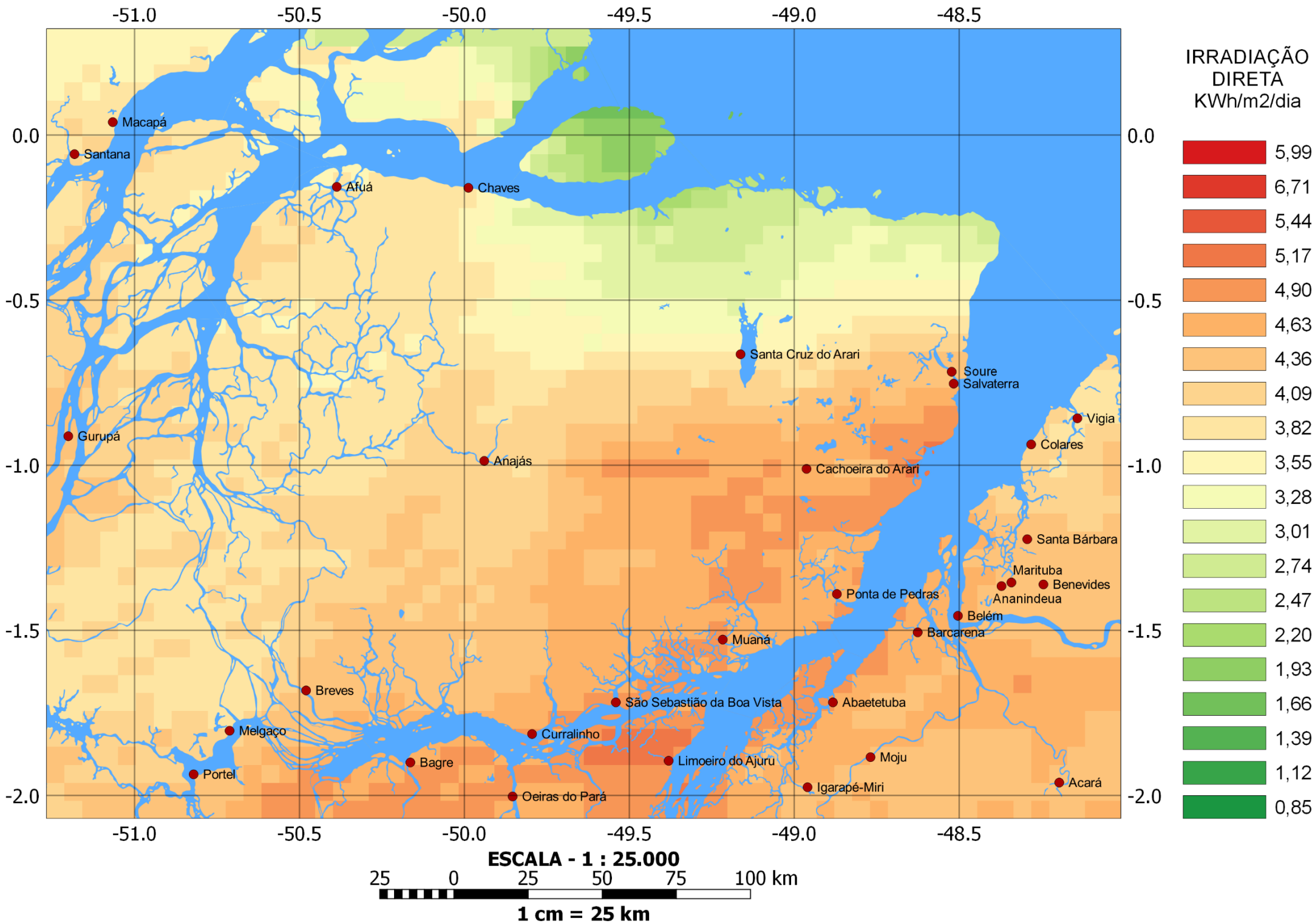
IRRADIAÇÃO DIRETA
KWh/m²/dia



ABRIL



MAIO



JUNHO

-51.0

-50.5

-50.0

-49.5

-49.0

-48.5

0.0

-0.5

-1.0

-1.5

-2.0

0.0

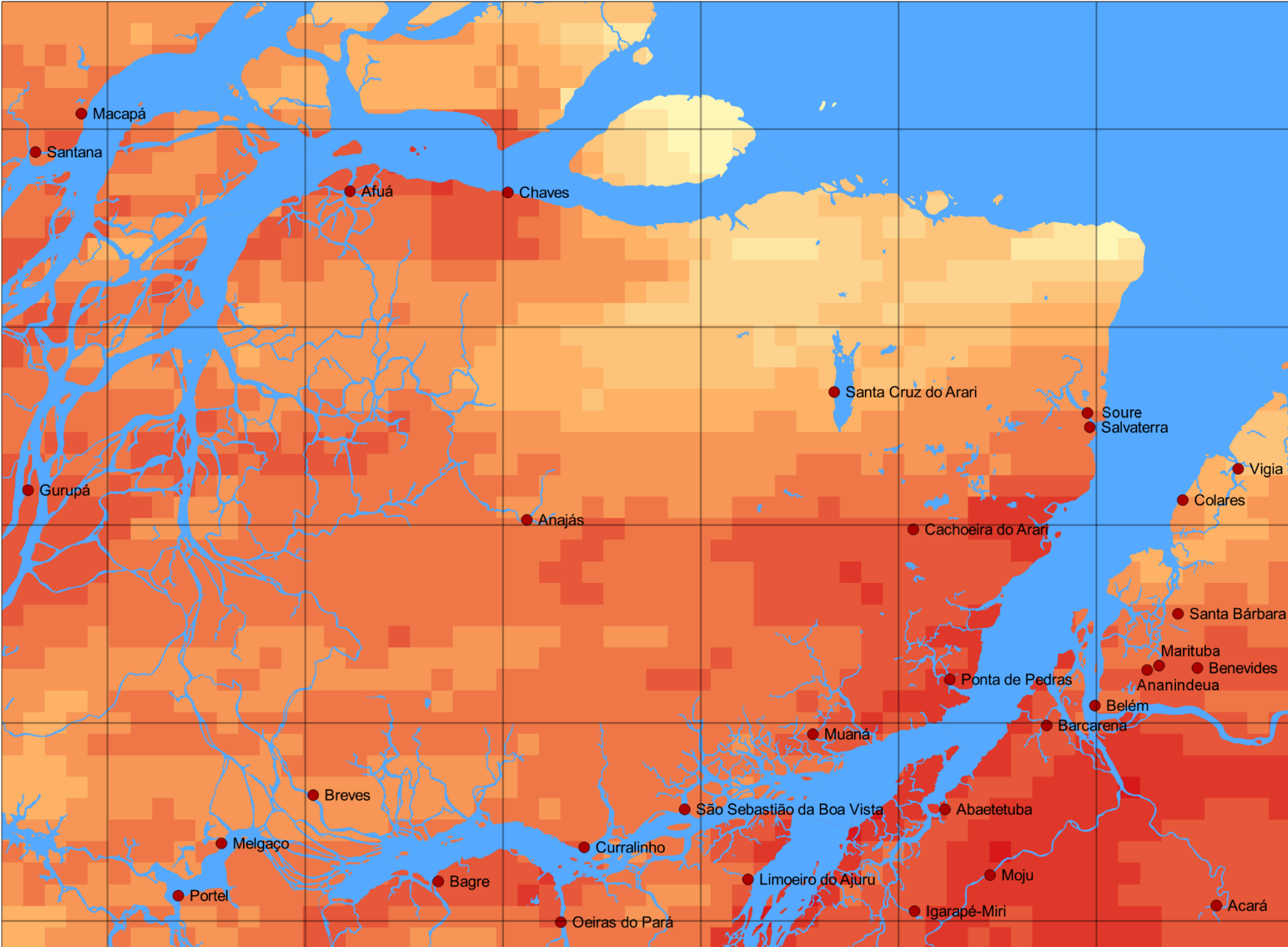
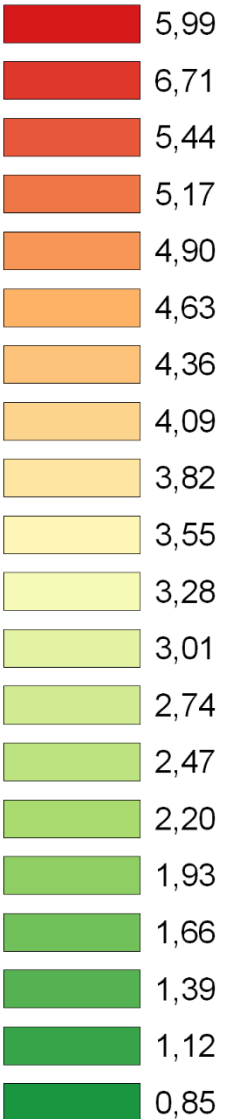
-0.5

-1.0

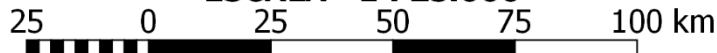
-1.5

-2.0

IRRADIAÇÃO
DIRETA
KWh/m2/dia

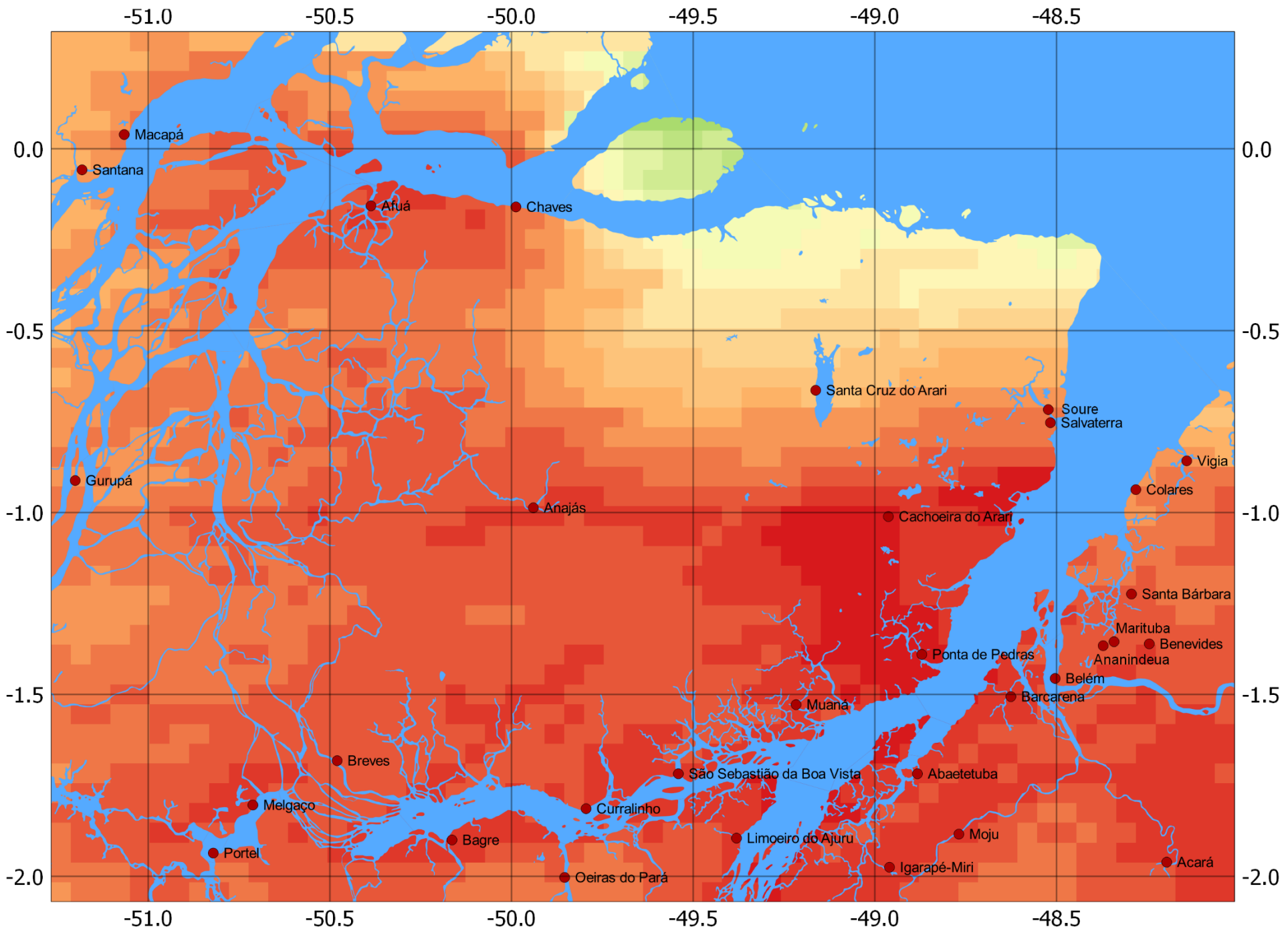


ESCALA - 1 : 25.000

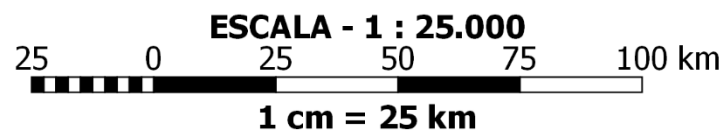
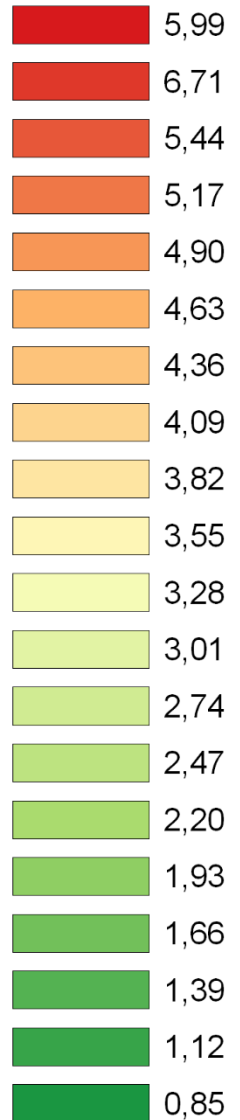


1 cm = 25 km

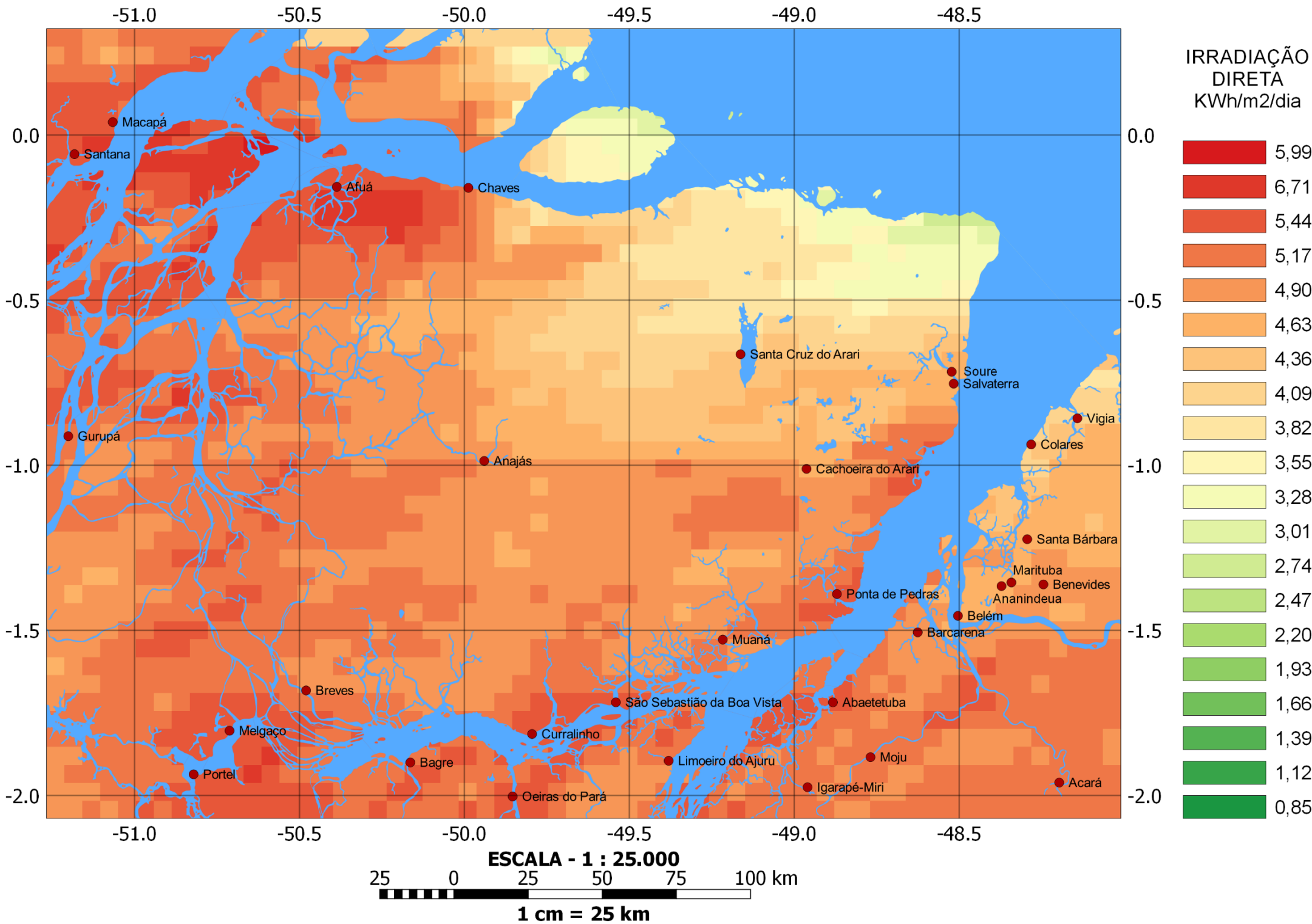
JULHO



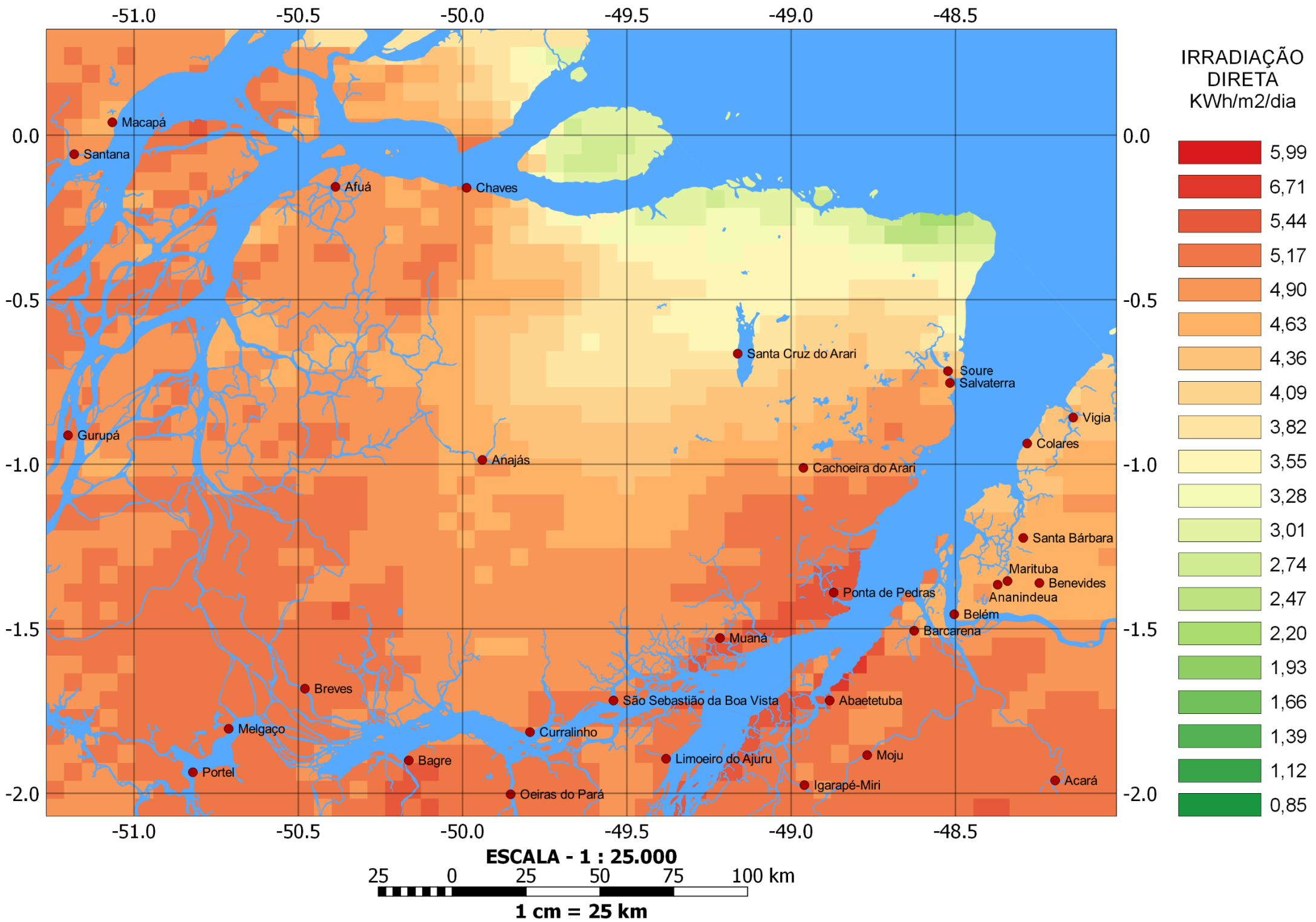
IRRADIAÇÃO DIRETA
KWh/m²/dia



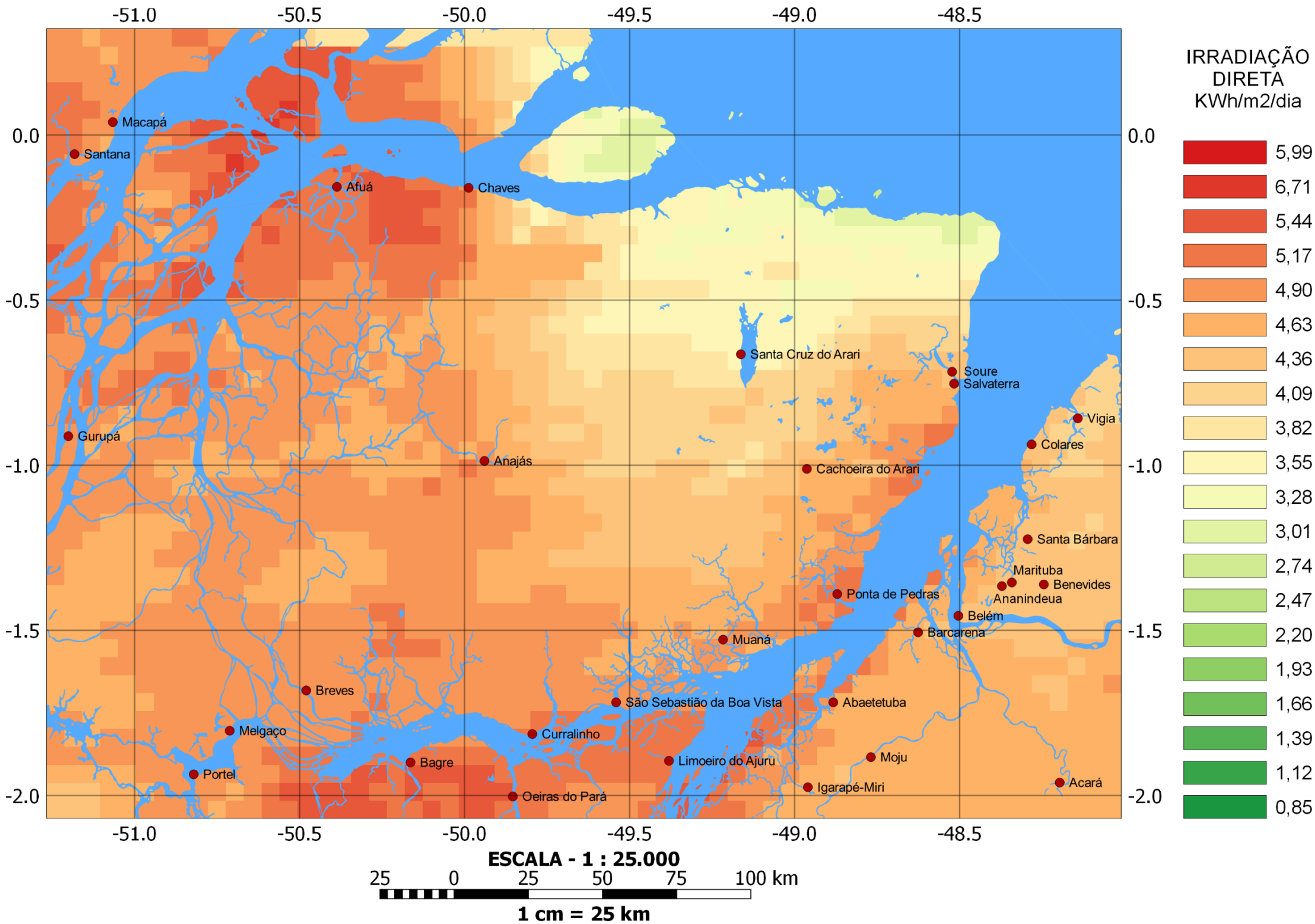
AGOSTO



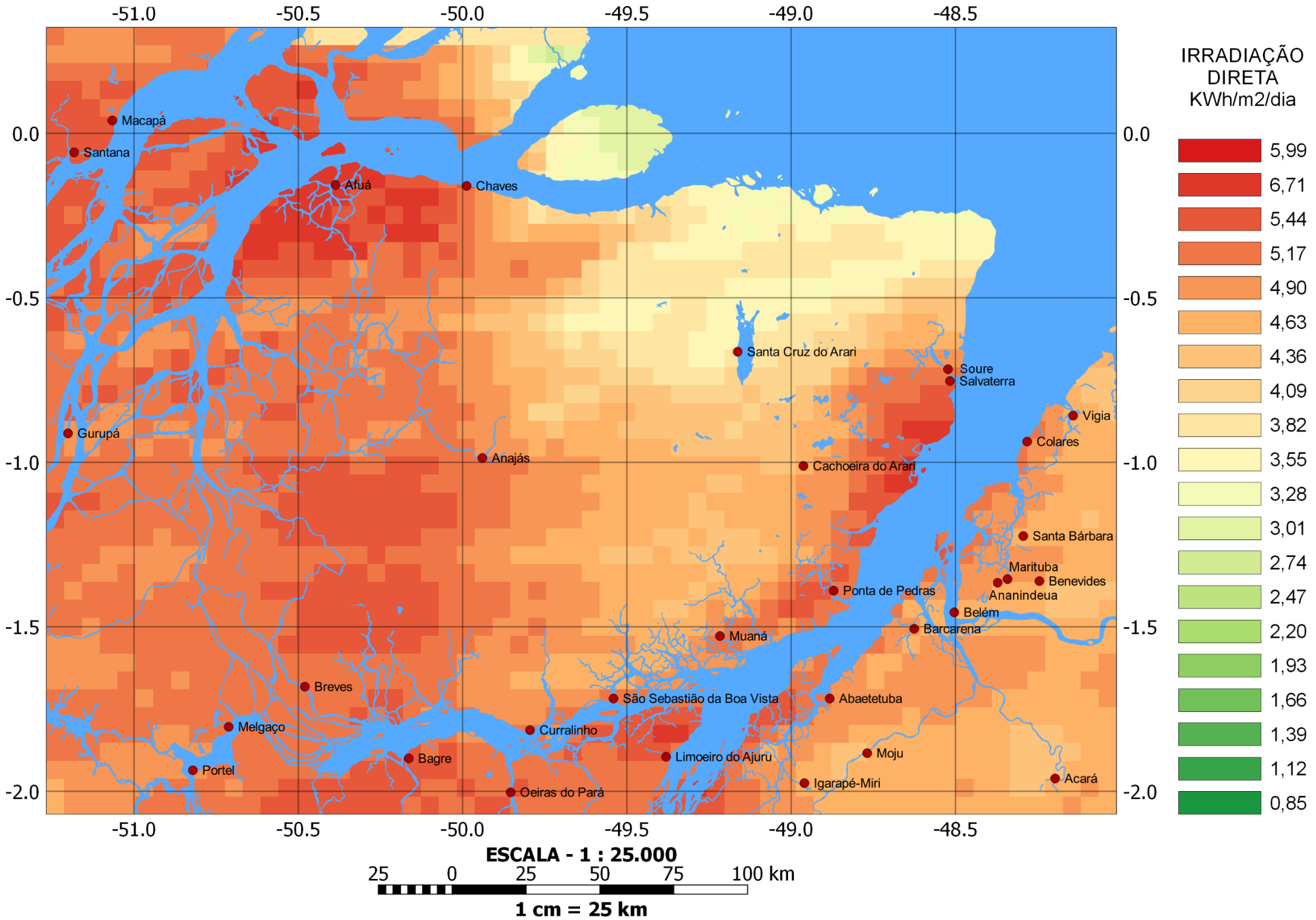
SETEMBRO



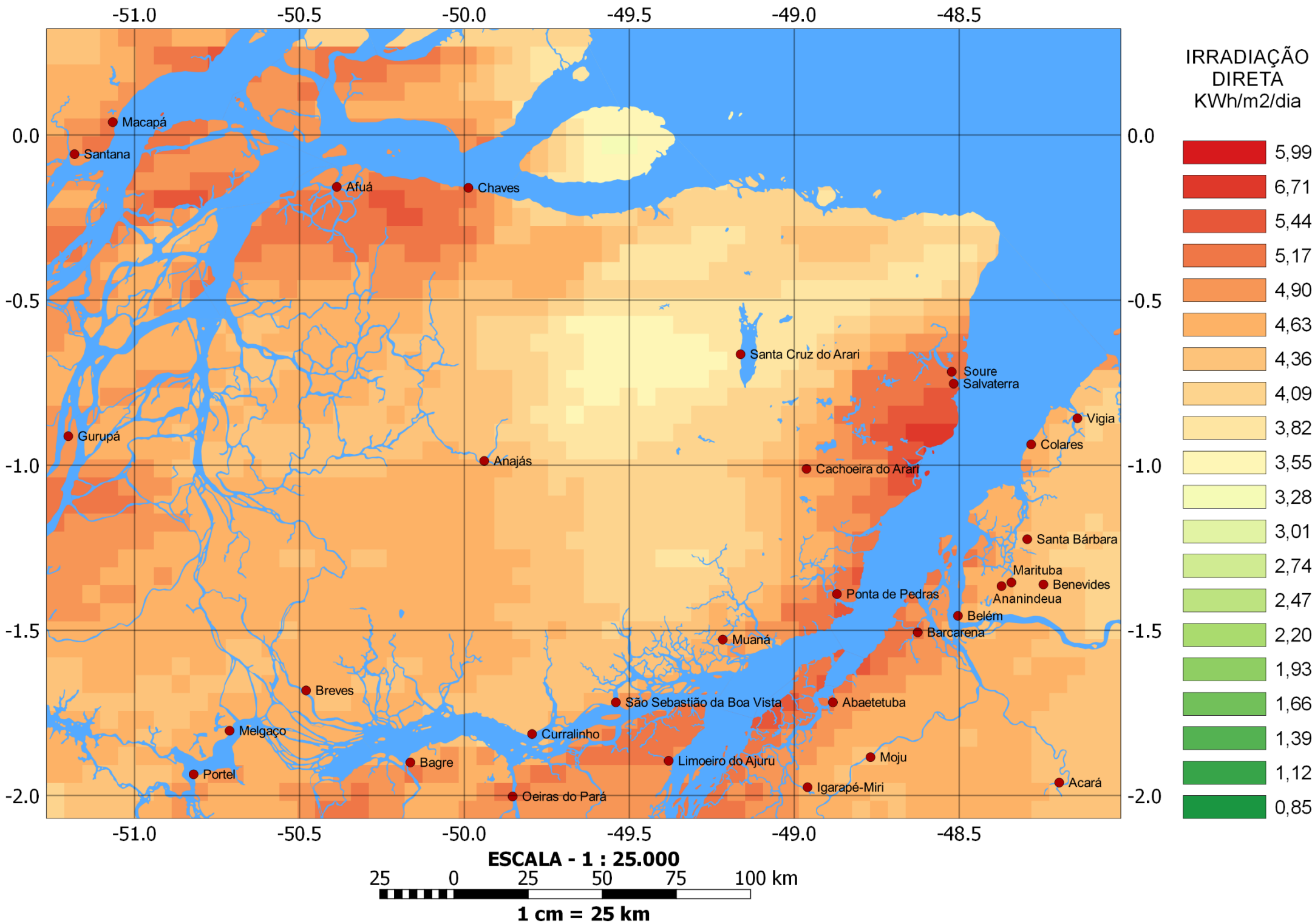
OUTUBRO



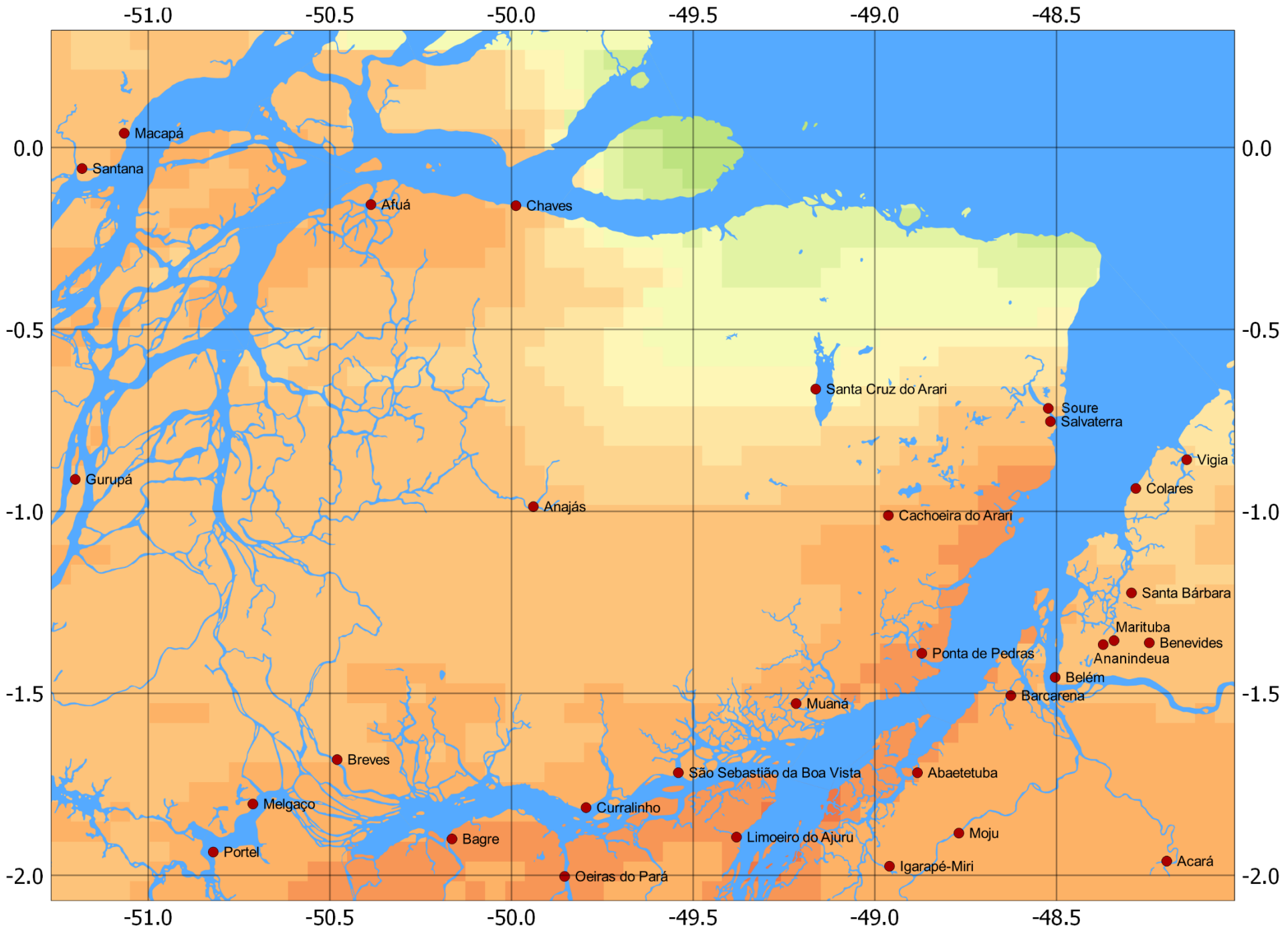
NOVEMBRO



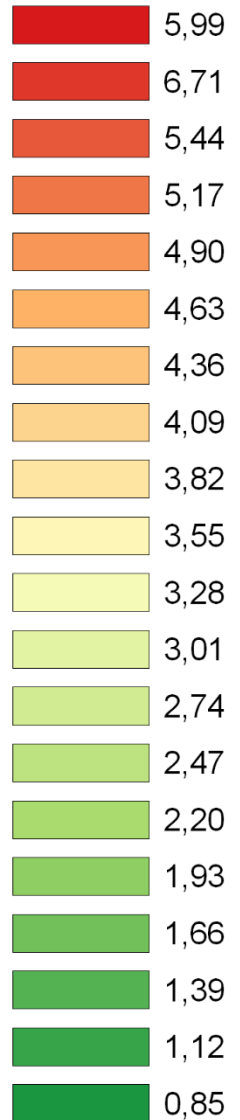
DEZEMBRO



MÉDIA ANUAL



IRRADIAÇÃO
DIRETA
KWh/m²/dia



ESCALA - 1 : 25.000
25 0 25 50 75 100 km
1 cm = 25 km

TOTAL ANUAL

