

Foto: CEMIG



CEMIG
A Melhor Energia do Brasil.

R&D | **ANEEL**

Atlas *Solarimétrico*
de Minas Gerais



Dados internacionais de catalogação na publicação

Companhia Energética de Minas Gerais.
Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Belo Horizonte: Cemig, 2012.
80 p.: ilust.

ISBN: 978-85-87929-50-1

1. Energia solar. 2. Usina solar
I. Companhia Energética de Minas Gerais. II. Título

CDU: 621.47
621.311.28

Copyright: Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG®

Endereço:
Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energéticas
Av. Barbacena, 1200 – 16º B1
30190-131 Belo Horizonte (Minas Gerais) / Brasil

CEMIG
A Melhor Energia do Brasil.

R&D ANEEL

Expediente Atlas:
Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG

Presidente:
Djalma Bastos de Moraes

Vice-Presidente:
Arlindo Porto Neto

Diretor de Distribuição e Comercialização:
José Carlos Mattos

Diretor de Finanças e Relações com Investidores:
Luiz Fernando Rolla

Diretor de Geração e Transmissão:
Luiz Henrique de Castro Carvalho

Diretor de Gestão Empresarial:
Frederico Pacheco de Medeiros

Diretor de Desenvolvimento de Negócios:
Fernando Henrique Schüffner Neto

Diretor de Gás:
Fuad Jorge Noman Filho

Diretor Comercial:
José Raimundo Dias Fonseca

Diretora Jurídica:
Maria Celeste Moraes Guimarães

Diretor de Relações Institucionais e Comunicação:
Luiz Henrique Michalick

Superintendência de Tecnologia e Alternativas Energéticas:
Alexandre Francisco Maia Bueno

Gerência de Alternativas Energéticas:
Marco Aurélio Dumont Porto

Coordenação do Projeto na Terra Verde:
Ruibran Januário dos Reis
Chigueru Tiba

Coordenador do Projeto na Cemig:
Júlio César Ezequiel da Costa

Equipe Técnica:
João Francisco de Abreu
Daniel Pereira Guimarães
Melina Amoni Silveira Alves
Douglas Sathler dos Reis
Naum Fraidenaich
Elielza M. S. Barbosa
Olga de Castro Vilela
Verônica W. B. Azevedo
Grazielle Santos Vieira Sarti

Projeto Gráfico:
Vianello Comunicação Ltda.

Direção de Arte:
Omar Vianello

Editoração Eletrônica e Produção Gráfica:
Rute Gouvêa

Apresentação do Atlas Solarimétrico do Estado de Minas Gerais

Ao completar 60 anos de existência e de trabalho para o crescimento do Estado, tendo alcançado, neste período, o reconhecimento mundial por sua preocupação e cuidado com o meio ambiente e pela manutenção de uma matriz energética renovável e, há 12 anos consecutivos, presente no Índice Dow Jones de Sustentabilidade, a Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig apresenta o estudo que demonstra o potencial de energia solar de Minas Gerais.

Uma das prioridades do Governo de Minas Gerais é assegurar as condições para a manutenção de um desenvolvimento sustentável através da garantia de disponibilidade de energia segura, abundante e produzida de forma sustentável, como fonte de crescimento econômico e melhoria do bem-estar do povo mineiro.

Entre as diversas fontes de energia renovável que podem ser aproveitadas, a energia solar é um recurso renovável de baixo impacto socioambiental, com a tendência mundial de se tornar progressivamente atrativa do ponto de vista econômico. Assim, reveste-se de importância fundamental o levantamento do potencial de energia solar de Minas Gerais, visando sua inserção na matriz energética do Estado e do País.

Minas Gerais, com tradição no uso de coletores solares para o aquecimento de água e abundante em quartzo, mineral básico para a produção de um insumo essencial para a produção das células fotovoltaicas, o silício metálico, possui um ambiente propício e vocação natural para a produção e uso da energia solar.

O Governo de Minas Gerais, atento à relevância de todos os aspectos envolvidos nessa questão, recomendou à Cemig que realizasse, por meio do seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Cemig – Aneel, estudos para a determinação do potencial de energia solar do Estado e da localização das melhores incidências de radiação, para a identificação de melhores alternativas de aproveitamento dessa fonte primária de energia e para a inserção dessa energia na matriz energética considerando seus aspectos de sazonalidade, variabilidade e disponibilidade diária.



Mensagem da presidente do Conselho de Administração e do presidente da Cemig

A Cemig nasceu em 1952, pelas mãos do então governador e, posteriormente, presidente Juscelino Kubitschek, com o objetivo de assegurar ao Estado energia elétrica limpa, segura e abundante, insumo imprescindível para a instalação de um parque industrial, para o desenvolvimento e para o conforto dos mineiros.

Naquela época, há seis décadas, a Cemig assumiu diversas centrais hidrelétricas e planejou a construção de outras em Minas. Uma dessas hidrelétricas, a usina de Três Marias, é reconhecida como um marco para o setor no Brasil, como primeiro grande empreendimento na área de energia elétrica, tendo aberto o caminho para a construção de barragens de grande porte em Minas e em outros Estados.

Atualmente, as fontes de exploração de energia hidrelétrica estão praticamente esgotadas, resumindo o aproveitamento de seu potencial à construção de pequenas centrais hidrelétricas. Simultaneamente, o mundo também passou a ser mais exigente com projetos de produção de eletricidade, cobrando esforços na busca de caminhos para o uso de energias renováveis e limpas, e a Cemig, à frente do seu tempo, incluiu a sustentabilidade e o respeito ao meio ambiente como elementos de sua visão, que norteia todas as ações da Empresa.

É dentro desse contexto que a Cemig foi incumbida pelo Governo de Minas Gerais de liderar o processo de prospecção dos potenciais eólico e solar do Estado. Na verdade, esse não é um assunto novo para a Cemig, talvez inédito na escala e magnitude dos tempos atuais, pois a Empresa vem pesquisando o potencial eólico e solar em território mineiro desde 1982, quando foram mapeados, por intermédio de um projeto conjunto com a Finep (Financiadora de Estudos e Projetos), 58 áreas do Estado.

Ainda em 1982, tiveram início esses trabalhos de levantamento do potencial de ventos e de radiação solar, em 23 postos de medições anemométrica e solarimétrica da Cemig espalhados pelo interior de Minas Gerais e no Posto Central de Solarimetria, em Belo Horizonte. Foram coletados dados de radiação solar global nesses locais, e depois dispostos em isolinhas, obedecendo às recomendações da WMO (*World Meteorological Organization* – Organização Meteorológica Mundial), procurando cobrir todas as regiões mineiras e mantendo uma distância média de 150 quilômetros entre os postos. Assim, produziu-se o primeiro mapa de radiação solar do Estado.

Dentro do mesmo convênio com a Finep, a Cemig implantou, na década de 80, duas estações remotas de radiocomunicação e telemetria, sendo uma exclusivamente alimentada com painéis fotovoltaicos, na localidade de Porto Indaiá, situada no município de Morada Nova de Minas, e outra estação com fonte híbrida de energia (solar e eólica), no município de Pompéu.

Com a necessidade de alimentar a área de operação e planejamento elétrico com dados de radiação solar ainda mais modernos, a Cemig implantou, no século 21, uma moderna rede de piranômetros, que permitiu a coleta de dados de alta confiabilidade, que contribuíram para a elaboração do presente Atlas.

Em agosto de 2008, o então governador Aécio Neves encaminhou mensagem ao Conselho de Administração da Cemig, solicitando que a Companhia envidasse os melhores esforços na perseguição do aumento da energia renovável na matriz energética, em especial as energias eólica e solar, sendo necessário, para isso, o levantamento do potencial do Estado.

Com a publicação do Atlas Eólico de Minas Gerais em 2010, a Cemig contratou, em abril do ano seguinte, por meio de seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D Cemig – Aneel, o projeto “Desenvolver um Sistema para Cálculo do Potencial de Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas e Termoelétricas Solares de Grande Porte” com o objetivo de levantar o potencial de energia solar do Estado e identificar os melhores sítios para implantação de empreendimentos solares fotovoltaicos e termossolares. Esse projeto, que inclui, entre outras iniciativas, a medição de radiação solar e de grandezas meteorológicas relacionadas em cinco novos pontos do Estado durante o período de 24 meses, previa ainda a publicação do presente Atlas Solarimétrico do Estado de Minas Gerais.

A empresa contratada para o desenvolvimento dos estudos foi o Centro de Capacitação, Treinamento e Cultura Terra Verde, contando ainda com a participação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Os dados iniciais desse trabalho de mapeamento se revelaram promissores, pois apontam índices de radiação solar global de 5,5 a 6,5 kWh/m².d em mais da metade do área territorial do Estado, indicando sua adequação à implantação de empreendimentos solares. O mapeamento considerou ainda outros fatores, como a insolação média (quantidade diária de horas de sol), além de disponibilidade de rede elétrica de conexão e disponibilidade de água (insumo necessário no caso de empreendimentos termossolares), indicando áreas preferenciais para a implantação desses empreendimentos no Estado.

A importância do presente estudo é ainda maior se for levado em conta o grande alcance social desse projeto quando efetivamente os empreendimentos começarem a ser viabilizados, pois as regiões de maior potencial correspondem exatamente aos municípios mais carentes de Minas Gerais, sejam aqueles que estão ao longo da Serra do Espinhaço ou na área mineira da Sudene.

Acreditamos, portanto, que a Cemig, mais uma vez, dá sua contribuição para o desenvolvimento econômico e social de Minas Gerais. Essas são, na verdade, duas vocações da Empresa desde sua criação. E é por trabalhos como esse e por ações concretas que a Cemig é referência no Brasil e apontada, pelo Índice Dow Jones de Sustentabilidade, duas vezes como líder mundial em sustentabilidade, nos últimos anos.

Agradecemos ao governador Antonio Anastasia pela confiança depositada em nossa Empresa para a realização deste trabalho e reiteramos a importância do Programa Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento para o Setor Elétrico – P&D Aneel, que tem viabilizado a realização de importantes pesquisas para o desenvolvimento tecnológico e social do País.

Cumprimentamos também os nossos parceiros neste projeto e destacamos a decisiva participação do corpo técnico da Cemig para a conclusão de, assim acreditamos, um dos mais importantes trabalhos no campo energético de Minas Gerais e que, com certeza, reverterá em empreendimentos que vão gerar empregos e agregar valor para nossa economia.

Dorothea Werneck

Djalma Bastos de Moraes

Índice

1 - O Estado de Minas Gerais

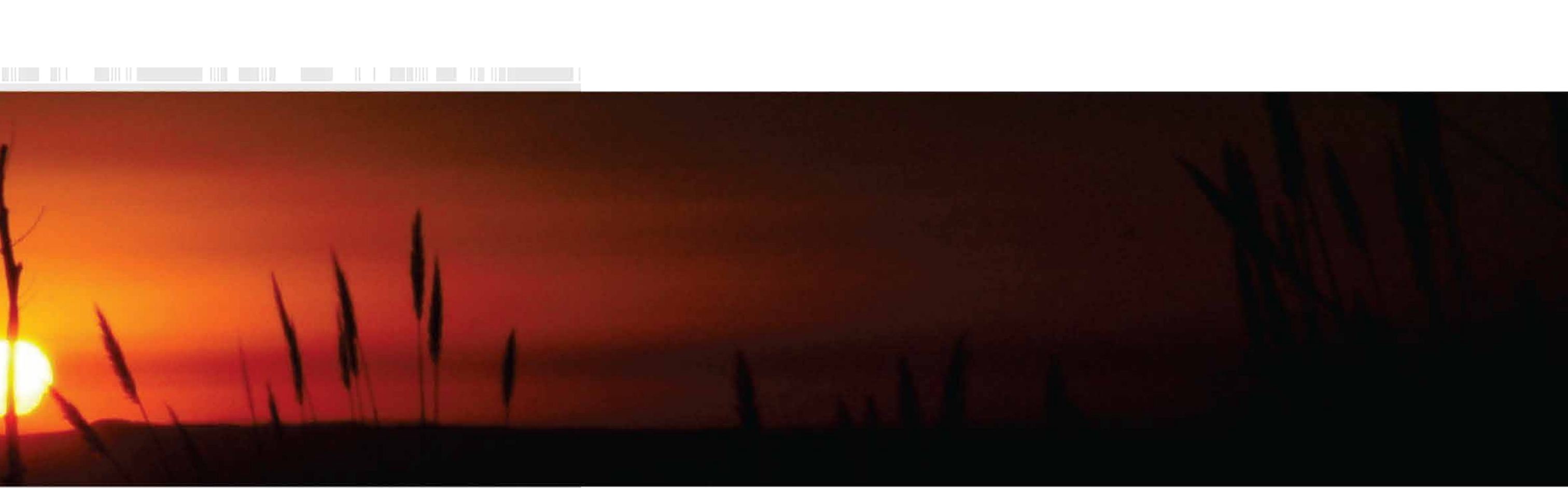
1.1 - Caracterização Geográfica	7
1.2 - Vegetação	8
1.3 - Unidades de Conservação e Terras Indígenas	9
1.4 - Clima	12
1.5 - Infraestrutura	21
1.6 - Demografia e Consumo de Energia	24

2 - Energia Solar e Tecnologia

2.1 - Energia Solar na Superfície Terrestre	27
2.2 - Histórico	32
2.3 - Tecnologia	34
2.4 - Desenvolvimento da Tecnologia em Minas Gerais	43

3 - Metodologia

3.1 - Processo de Mapeamento	45
3.2 - Coleta e Avaliação dos Dados Solarimétricos	46
3.3 - Sistemas de Informações Geográficas	49
3.4 - Interpolação Espacial	50
3.5 - Identificação de Locais para Instalação de Centrais Elétricas	53



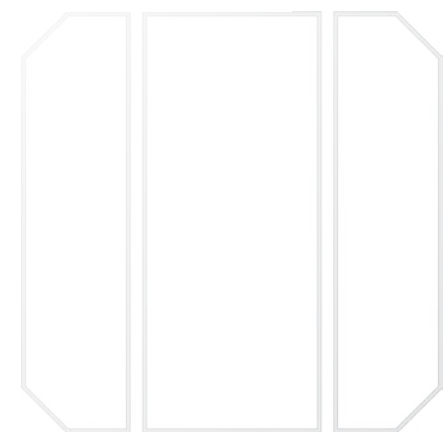
4 - Mapas Solarimétricos de Minas Gerais

4.1 - Mapas Solarimétricos de Minas Gerais	57
4.2 - Estações Solarimétricas	60
4.3 - Radiação Solar	61
4.4 - Insolação	65

5 - Conclusão

5.1 - Análises e Diagnósticos	71
5.2 - Considerações Finais	79

Referências Bibliográficas	80
-----------------------------------	----



1. O Estado de Minas Gerais



Foto: CEMIG

1.1	CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA.....	7	1.4	CLIMA	12
1.2	VEGETAÇÃO	8	1.5	INFRAESTRUTURA.....	21
1.3	UNIDADES DE CONSERVAÇÃO E TERRAS INDÍGENAS.....	9	1.6	DEMOGRAFIA E CONSUMO DE ENERGIA.....	23

1.1 – Caracterização Geográfica



Figura 1.1.1: Localização do Estado de Minas Gerais / Fonte: Landsat 7

Minas Gerais é a quarta unidade da federação em extensão territorial, apresentando 586.528 km², o que corresponde a 7% do território do País. O Estado está localizado entre os paralelos 14°13'58" e 22°54'00" de latitude Sul e os meridianos 39°51'32" e 51°02'35" a oeste de Greenwich. Minas Gerais compõe a região Sudeste e possui uma linha de divisa de 4.727 km com os estados vizinhos. Limita-se a sul e sudoeste com o estado de São Paulo, a oeste com o Mato Grosso do Sul, a noroeste com Goiás, ao norte com a Bahia, a leste com o Espírito Santo e a sudeste com o Rio de Janeiro, conforme a Figura 1.1.1.

Minas Gerais possui o território inteiramente formado por planaltos, com destaque para o planalto central na porção noroeste e para o planalto atlântico que abrange mais da metade do Estado, com a predominância dos "mares de morros" e altitude média de 700 m. De acordo com a Figura 1.1.2, as serras da Mantiqueira, do Caparaó, da Canastra e a cordilheira do Espinhaço se destacam, com altitudes superiores a 1.700 m. Além das áreas montanhosas, o Estado apresenta também áreas de planaltos e as depressões formadas pelos vales dos rios São Francisco, Jequitinhonha, Doce e Paraíba do Sul.

A serra da Mantiqueira, denominação tupi que significa "serra que chora" em função do grande número de nascentes ali existentes, estende-se pela divisas de Minas Gerais com os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, penetrando o interior mineiro até as cercanias de Barbacena. Integra o ecossistema da Mata Atlântica com uma riquíssima biodiversidade. Na região do Parque Nacional

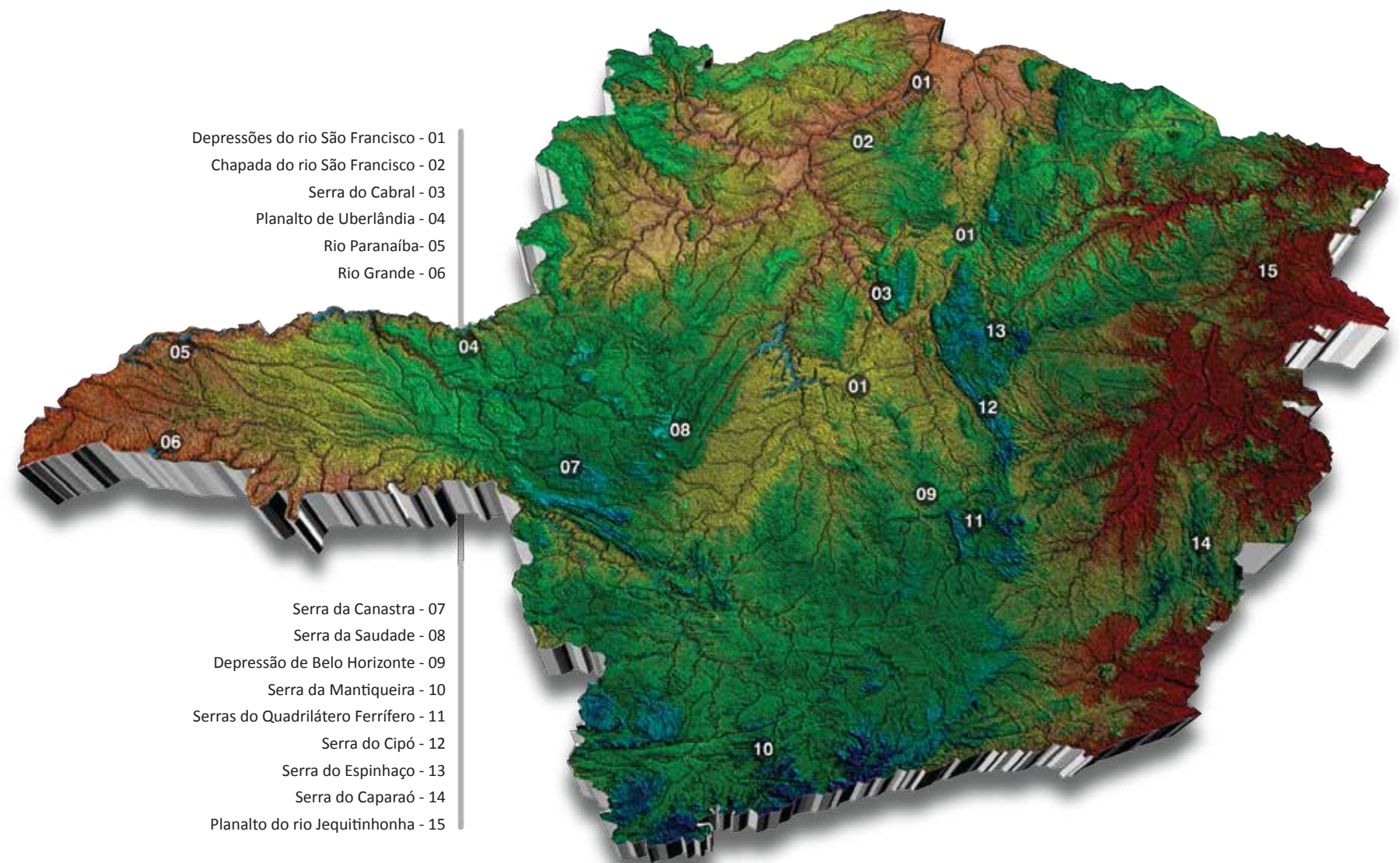


Figura 1.1.2: Geomorfologia do Estado de Minas Gerais

do Itatiaia, limite entre os municípios de Resende (RJ) e Itamonte (MG) está o pico das Agulhas Negras, com 2.787 m de altitude. Outro ponto culminante nessa região é o pico da Pedra da Mina (2.770 m de altitude), entre os municípios de Queluz (SP) e Passa Quatro (MG).

A serra do Caparaó localiza-se na divisa de Minas Gerais com o Espírito Santo, tendo o pico da Bandeira (2.892 m) como ponto culminante. Até a identificação dos picos da Neblina e 31 de Março na serra do Imeri, fronteira do Brasil e Venezuela, o pico da Bandeira era considerado o ponto mais elevado do território brasileiro. O pico do Cristal, no município de Caparaó, com 2.798 m, ocupa o quarto lugar em altitude.

A serra da Canastra, localizada no sudoeste de Minas Gerais, tem esse nome devido às suas características fisiográficas abauladas. É local da nascente do rio São Francisco e famosa pela biodiversidade, clima e inúmeras cachoeiras ali existentes, como a imponente Casca D'Anta, com seus 186 m de altura.

A serra do Espinhaço estende-se desde o município de Ouro Branco em Minas Gerais até Xique-Xique na Bahia, onde re-

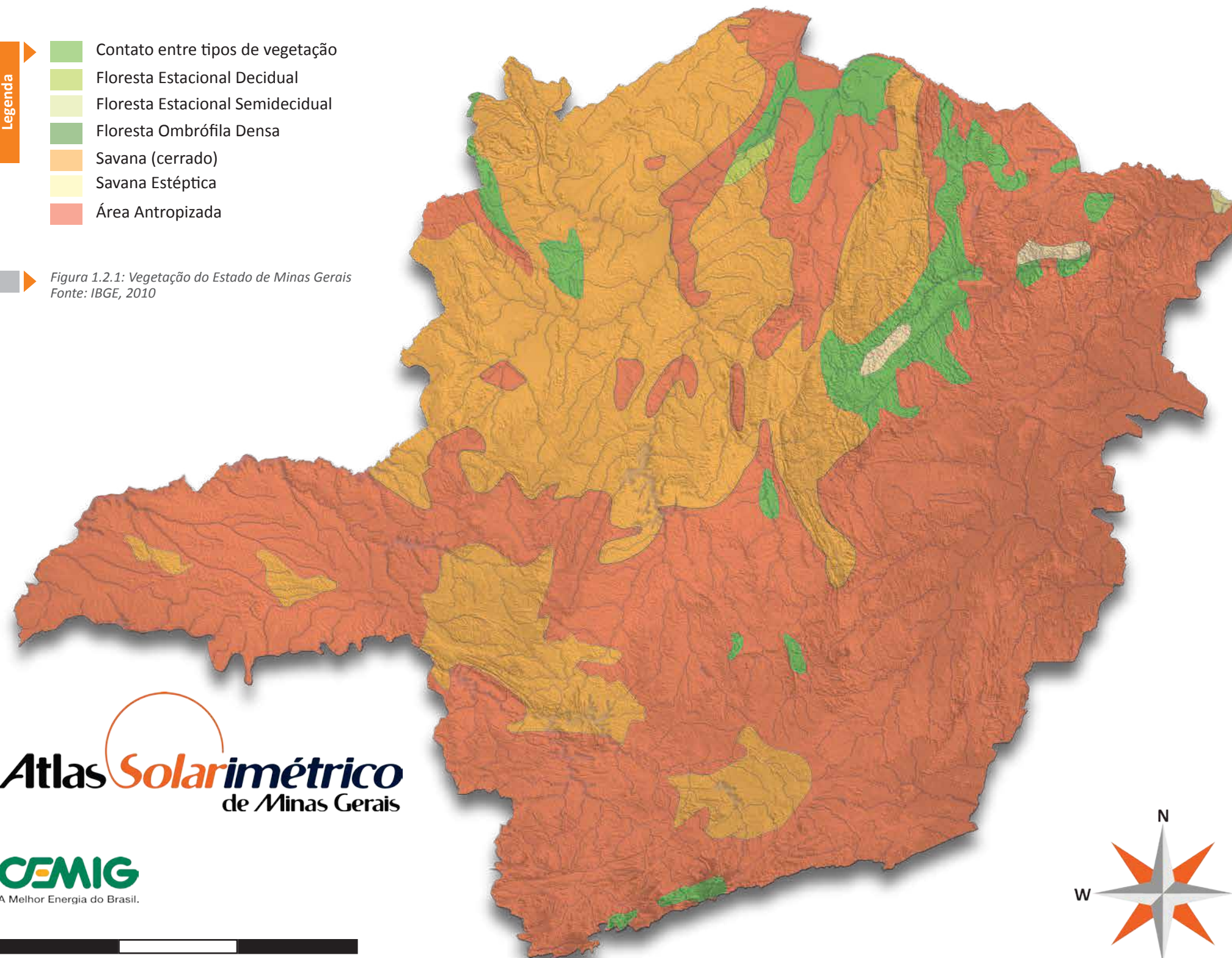
cebe a denominação de Chapada Diamantina. O Quadrilátero Ferrífero, situado no Espinhaço meridional, engloba 34 municípios e abriga importantes cidades como a capital Belo Horizonte, Ouro Preto, Mariana, Congonhas, Sabará, João Monlevade e Itabira. O relevo possui importantes regiões serranas, como as do Curral, em Belo Horizonte, do Caraça, do Rola Moça, da Piedade, do Itacolomi, da Moeda, do Mascate e a Serra Azul. Na região setentrional as mais conhecidas são as serras do Cipó, Itambé, do Cabral e a serra Geral. Na serra do Cipó localiza-se a famosa cachoeira do Tabuleiro, cujos 273 m de queda livre a torna a maior do Estado e a terceira cachoeira mais alta do Brasil.

A capital mineira está dentro da depressão de Belo Horizonte, com um relevo caracterizado por espigões, colinas e encostas policonvexas de declividades variadas. As serras que contornam Belo Horizonte são ramificações da cordilheira do Espinhaço, com destaque para as serras de Jatobá, José Vieira, Mutuca, Taquaril e Curral. O ponto de maior altitude da capital mineira encontra-se na serra do Curral (1.538 m) e a sede de Belo Horizonte possui 852 m de altitude.

1.2 – Vegetação

- Legenda**
- Contato entre tipos de vegetação
 - Floresta Estacional Decidual
 - Floresta Estacional Semidecidual
 - Floresta Ombrófila Densa
 - Savana (cerrado)
 - Savana Estéptica
 - Área Antropizada

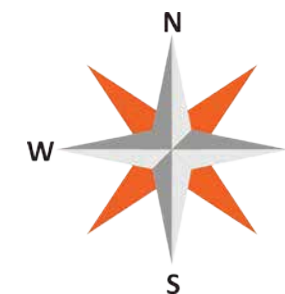
Figura 1.2.1: Vegetação do Estado de Minas Gerais
Fonte: IBGE, 2010



Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais

CEMIG
A Melhor Energia do Brasil.

0 200 400 600km



A vasta superfície do Estado, associada às características climáticas, geomorfológicas e hídricas, resultou no aparecimento de uma cobertura vegetal diversificada. Atualmente, grande parte do Estado está tomada por áreas antropizadas, resultado da ocupação pouco racional do território no passado. O Cerrado (Savana) e a Mata Atlântica (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Estacional Decidual e Semidecidual), juntamente com pequenas áreas de savana estéptica, estão presentes no território mineiro (Figura 1.2.1).

O Cerrado forma uma paisagem de alta biodiversidade, embora menor do que a Mata Atlântica. É o bioma de maior extensão territorial em Minas Gerais, sendo o segundo maior do Brasil. A vegetação de cerrado, em sua maior parte, é constituída por gramíneas, arbustos e árvores esparsas. As árvores têm caules retorcidos e raízes longas, que permitem a absorção da água.

A Mata Atlântica é formada por uma série de ecossistemas com características próprias. Em Minas Gerais predominam a Floresta Ombrófila Densa, a Floresta Estacional Decidual e Semidecidual. Em toda sua extensão, estes ecossistemas se interligam, acompanhando as características climáticas das regiões e tendo como elemento comum a exposição aos ventos úmidos oceânicos. Assim como em outros estados brasileiros, a Mata Atlântica mineira foi bastante devastada, restando pequenas porções, que se somam aos 10% de mata nativa restantes em todo o País.

1.3 – Unidades de Conservação e Terras Indígenas

As unidades de conservação (UCs) públicas (federais, estaduais e municipais) e particulares são protegidas por leis com o intuito de preservar as riquezas naturais para as gerações futuras. Existem várias categorias de UCs, com estrutura de funcionamento adequada ao seu propósito: parques, reservas biológicas, estações ecológicas, reservas particulares de patrimônio natural, entre outras.

Minas Gerais possui atualmente 4,58 milhões de ha de áreas protegidas, distribuídas por 430 UCs cadastradas no Instituto Estadual de Florestas (IEF), o que corresponde a 7,8% do território mineiro. Diante das restrições legais e da abrangência das UCs no Estado, a implantação de projetos energéticos deve levar em consideração o mapeamento das áreas protegidas para evitar impedimentos de ordem ambiental.

A Tabela 1.3.1 apresenta a relação das UCs e TIs registradas em Minas Gerais.

Relação de Siglas:

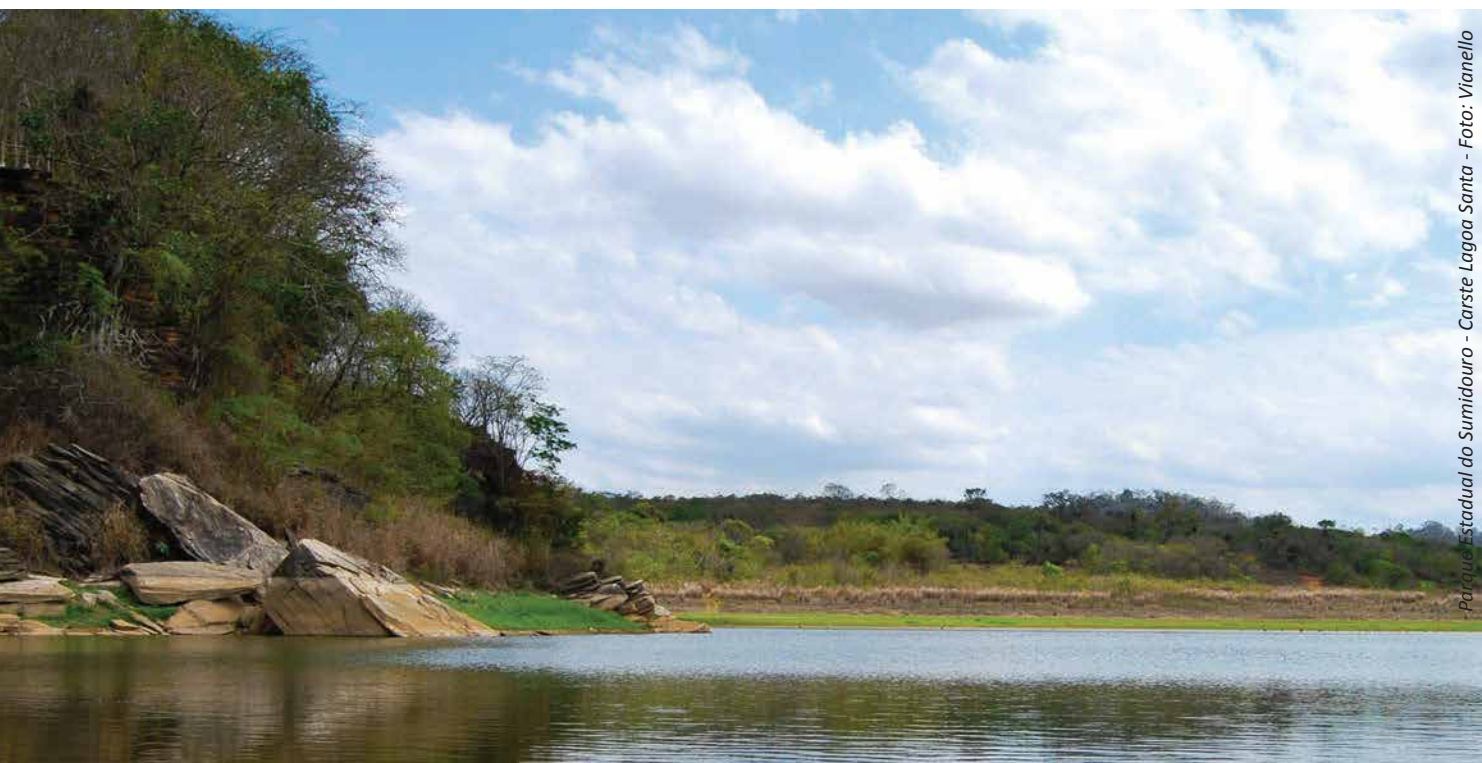
APA	(Área de Proteção Ambiental)
APE	(Área de Proteção Especial)
EE	(Estação Ecológica)
FLO	(Floresta Nacional, Estadual ou Municipal)
MN	(Monumento Natural)
PAQ	(Parque)
AQF	(Parque Florestal)
PAQN	(Parque Natural)
RB	(Reserva Biológica)
RDS	(Reserva de Desenvolvimento Sustentável)
RPPN	(Reserva Particular do Patrimônio Natural)
RVS	(Refúgio de Vida Silvestre)
TI	(Terra Indígena)

Unidade de Proteção Integral	
EE Estação Ecológica	
Nome	Área (ha)
EE Acauã	5.196
EE Água Limpa	71
EE Aredes	1.158
EE Cercadinho	225
EE Corumbá	304
EE Fechos	603
EE Mar de Espanha	187
EE Mata do Cedro	1.563
EE Mata dos Ausentes	490
EE Sagarana	2.340
EE Tripuí	392
RB - Reservas Biológicas	
Nome	Área (ha)
RB Carmo da Mata	86
RB Colônia 31 de Março	5.030
RB Fazenda da Cascata	64
RB Fazenda Lapinha	369
RB Fazenda São Mateus	377
RB Jaíba	6.358
RB Santa Rita	604
RB São Sebastião do Paraíso	249
RB Serra Azul	3.841
PAQ - Parque	
Nome	Área (ha)
PAQ Alto Cariri	6.151
PAQ Baleia	102
PAQ Biribiri	16.999
PAQ Caminho das Gerais	56.237
PAQ Campos Altos	782
PAQ Caparaó	7.235
PAQ Cavernas do Peruaçu	56.800
PAQ Grande Sertão Veredas	83.363
PAQ Grão Mogol	33.325
PAQ Ibitipoca	14.887
PAQ Itacolomi	6.172
PAQ Itatiaia	15.463
PAQ Lagoa do Cajueiro	20.500
PAQ Lapa Grande	9.663
PAQ Mata Seca	10.282
PAQ Montezuma	1.743
PAQ Natural Ribeirão do Campo	3.096
PAQ Nova Baden	214
PAQ Pau Furado	2.200
PAQ Pico do Itambé	6.520
PAQ Rio Corrente	5.065
PAQ Rio Doce	35.970
PAQ Rio Preto	12.184
PAQ Sempre-Vivas	124.555
PAQ Serra da Canastra	200.000

Unidade de Proteção Integral	
PAQ - Parque	
Nome	Área (ha)
PAQ Serra da Candonga	3.302
PAQ Serra das Araras	11.137
PAQ Serra da Boa Esperança	5.873
PAQ Serra do Brigadeiro	14.984
PAQ Serra do Cabral	22.256
PAQ Serra do Cipó	31.010
PAQ Serra do Independente	13.508
PAQ Serra do Papagaio	22.917
PAQ Serra do Rola-Moça	3.940
PAQ Serra Negra	13.654
PAQ Serra Nova	12.658
PAQ Serra Verde	142
PAQ Sete Salões	12.521
PAQ Sumidouro	13.000
PAQ Verde Grande	25.570
PAQ Veredas do Peruaçu	31.226
MN - Monumento Natural	
Nome	Área (ha)
MN De Itatiaia	3.216
MN Experiência da Jaguará	38
MN Gruta Rei do Mato	141
MN Lapa Vermelha	33
MN Peter Lund	72
MN Santo Antônio	31
MN Serra da Moeda	2.372
MN Serra do Gambá	442
MN Vargem da Pedra	10
MN Várzea da Lapa	23
MN Várzea do Lageado e Serra do Raio	2.199
RVS - Refúgio de Vida Silvestre	
Nome	Área (ha)
RVS Rio Pandeiros	6.103
RVS Libélulas da Serra São José	3.717
RVS Mata dos Muriquis	2.722
RVS Rios Tijuco e Rio da Prata	9.750
Unidade de Uso Sustentável	
APA - Áreas de Proteção Ambiental	
Nome	Área (ha)
APA Água Branca	19.598
APA Água Santa de Minas	6.121
APA Águas Vertentes	76.310
APA Alto da Conceição	4.150
APA Alto Jequitibá	4.830
APA Alto Rio Doce	23.473
APA Alto Taboão	2.450

Tabela 1.3.1: Unidades de Conservação e Terras Indígenas
Fonte: IEF-MG, 2012

1.3 - Unidades de Conservação e Terras Indígenas



Parque Estadual do Sumidouro - Carste Lagoa Santa - Foto: Vianello

Unidade de Uso Sustentável		
APA - Áreas de Proteção Ambiental		
Nome	Área (ha)	
APA	Alto Xopotó	3.650
APA	Antônio Dias	11.893
APA	Ervália	21.779
APA	Tronqueiras	14.625
APA	Araponga	9.694
APA	Árvore Bonita	8.875
APA	Bacia do Rio do Machado	125.368
APA	Barão e capivara	35.743
APA	Barra Longa	4.321
APA	Belém	3.247
APA	Belo Oriente	18.309
APA	Boa Esperança	4.986
APA	Bom Jardim	16.270
APA	Bom Jesus	4.534
APA	Bom Jesus do Galho	29.231
APA	Bom Retiro	12.467
APA	Boqueirão da Mira	8.515
APA	Braúna	13.707
APA	Brecha	6.392
APA	Cachoeira Alegre	23.520
APA	Cachoeira das Andorinhas	18.700
APA	Caiana	4.676
APA	Canaã	10.962
APA	Caparaó	5.238
APA	Capivara	15.206
APA	Carste de Lagoa Santa	38.114
APA	Carvão de Pedra	18.054

Unidade de Uso Sustentável		
APA - Áreas de Proteção Ambiental		
Nome	Área (ha)	
APA	Cavernas do Peruçu	115.236
APA	Chapada do Pequiheiro	6.251
APA	Cochá e Gibão	284.619
APA	Coqueiral	6.838
APA	Corredeiras	10.778
APA	Córrego da Mata	19.866
APA	Córrego das Flores	5.709
APA	Córrego Novo	11.742
APA	Dionísio	22.909
APA	Divino	11.170
APA	Divinolândia	3.764
APA	Esperança	9.455
APA	Felício	11.684
APA	Fernão Dias	180.373
APA	Fervedouro	14.330
APA	Fortaleza de Ferros	39.078
APA	Francês	18.309
APA	Gameleira	12.866
APA	Gavião	11.176
APA	Gonzaga	12.036
APA	Gualaxo do Sul	7.682
APA	Hematita	20.346
APA	Igarapé	6.556
APA	Ipanema	10.418
APA	Itabirinha	15.902
APA	Itacuru	24.592
APA	Jaboti	6.941

Unidade de Uso Sustentável		
APA - Áreas de Proteção Ambiental		
Nome	Área (ha)	
APA	Jacroá	5.402
APA	Jacutinga	8.036
APA	Jaguarapu	7.819
APA	Jequeri	22.314
APA	Labirinto	5.428
APA	Lagoa Silvana	5.793
APA	Lajedão	12.000
APA	Macuco	3.924
APA	Manhumirim	3.071
APA	Martins Soares	5.529
APA	Matinha	16.589
APA	Miraí	7.251
APA	Montanha Santa	2.460
APA	Morro da Pedreira	130.372
APA	Nascentes do Ribeirão Sacramento	6.686
APA	Nascentes do Rio Capivari	31.622
APA	Nascentes do Rio Tronqueiras	12.694
APA	Ninho das Garças	8.279
APA	Nova Era	11.500
APA	Oratórios	4.723
APA	Pandeiros	210.000
APA	Pedra Branca	5.903
APA	Pico do Itajurú	4.818
APA	Pingo D'água	3.995
APA	Piranga	36.825
APA	Pitanga	11.209
APA	Pontão	8.454
APA	Presidente Bernardes	12.692
APA	Renascença	10.739
APA	Rio Manso	7.331
APA	Rio Manso	8.823
APA	Rio Mombaça	4.931
APA	Rio Picão	7.003
APA	Rio Pomba	8.795
APA	Rio Preto	3.050
APA	Rio Uberaba	240.943
APA	Salto do Suaçuí	9.108
APA	Santa Efigênia de Minas	8.972
APA	Santana do Paraíso	24.040
APA	São Lourenço	8.314
APA	São Tomé	3.115
APA	Sardoá	6.410
APA	Senador Firmino	7.316
APA	Senhora de Oliveira	8.780
APA	Serra Bom Sucesso	7.831
APA	Serra da Mantiqueira	296.663
APA	Serra da Providência	6.350
APA	Serra das Aranhas	3.633
APA	Serra do Gavião	29.304
APA	Serra do Intendente	13.410
APA	Serra do Pito Acesso	3.320

Unidade de Uso Sustentável		
APA - Áreas de Proteção Ambiental		
Nome	Área (ha)	
APA	Serra do Sabonetal	82.500
APA	Serra do Turvo	14.200
APA	Serra dos Núcleos	4.092
APA	Serra São José	4.758
APA	Serra Talhada	20.040
APA	Serrana	8.233
APA	Silverânia	7.017
APA	Suaçuí	10.598
APA	Sul	172.118
APA	Sussuarana	19.606
APA	Teixeiras	10.146
APA	Urucum	2.087
APA	Vale do Rio Macaúbas	7.675
APA	Vapabusul	19.494
APA	Vargem das Flores	12.270
APA	Virginópolis	17.301
APA	Vista Alegre	12.403
APA	Zabelê	14.702
APA	Mata do Krambeck	292
APA	Rio Pandeiros	210
APA	Fazenda Capitão Eduardo	260
APA	Rio Uberaba	656.656
APA	Rio Machado	125.368

FLO - Floresta Estadual		
Nome	Área (ha)	
FLO	São Judas Tadeu	140
FLO	Uaimii	4.398

RDS - Reserva do Desenvolvimento Sustentável		
Nome	Área (ha)	
RDS	Veredas do Acari	60.975

RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural		
Nome	Área (ha)	
RPPN	Aldeia	7.342
RPPN	Alto da Boa Vista II	7
RPPN	Alto do Palácio	244
RPPN	Alto D'Ouro	274
RPPN	Alto Gamarra	34
RPPN	Alto Rio Grande	33
RPPN	Antônio Lopes Merson	220
RPPN	Antônio Pedro de Oliveira	590
RPPN	Arizona	179
RPPN	Ave Lavrinha	49
RPPN	Berço de Furnas	5
RPPN	Berço de Furnas II	18
RPPN	Brumas do Espinhaço	950
RPPN	Cachoeira da Sucupira	41
RPPN	Cachoeira do Tombo	12
RPPN	Calunga	70
RPPN	Cambuí Velho	10

Tabela 1.3.1: Unidades de Conservação e Terras Indígenas / Fonte: IEF-MG, 2012

1.3 – Unidades de Conservação e Terras Indígenas

Unidade de Uso Sustentável		
RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural		
Nome	Área (ha)	
RPPN	Campestre	10
RPPN	Campina	12
RPPN	Campos Joviano	30
RPPN	Celulas Verdes	6
RPPN	Contendas	230
RPPN	Córrego da Onça	20
RPPN	Córrego das Traíras	159
RPPN	Cotovelo	204
RPPN	da Fragalha	3
RPPN	da Mata	24
RPPN	Da Pedra Branca	15
RPPN	Darcel Batalha	306
RPPN	Diogo	195
RPPN	do Andaime	175
RPPN	do Bom Fim	3
RPPN	Dr. Marcos Vidigal de Vasconcelos	84
RPPN	EBQ	13
RPPN	Ecocerrado Brasil	30
RPPN	Ermo dos Gerais	213
RPPN	Fartura	1.455
RPPN	Faz. Alto da Conceição	6
RPPN	Faz. Do Arrenegado	12.444
RPPN	Faz. Reserva Lagoa da Capa	602
RPPN	Fazenda Alegria	22
RPPN	Fazenda Barrão	545
RPPN	Fazenda Baú	24
RPPN	Fazenda Boa Esperança	127
RPPN	Fazenda Boa Vista	13
RPPN	Fazenda Bulcão	609
RPPN	Fazenda Cachoeira de Roça Grande	31
RPPN	Fazenda Campinho	43
RPPN	Fazenda Campos de São Domingos	4.502
RPPN	Fazenda Capivary	1.984
RPPN	Fazenda Carneiro	484
RPPN	Fazenda da Glória	129
RPPN	Fazenda da Gruta	709
RPPN	Fazenda da Picada	61
RPPN	Fazenda das Pedras / Leste	262
RPPN	Fazenda do Tanque	10
RPPN	Fazenda dos Cordeiros	13
RPPN	Fazenda Ecológica	120
RPPN	Fazenda Floresta	31
RPPN	Fazenda Jequitibá	19
RPPN	Fazenda Lagoa	292
RPPN	Fazenda Lavagem	90
RPPN	Fazenda Malhada Alta	158
RPPN	Fazenda Olhos D'água	158
RPPN	Fazenda São Lourenço	177
RPPN	Fazenda São Lourenço/Matinha	8
RPPN	Fazenda Serra da Moeda	15
RPPN	Fazenda Serra do Cabral e Lazão	721

Unidade de Uso Sustentável		
RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural		
Nome	Área (ha)	
RPPN	Fazenda Serra Negra	332
RPPN	Fazenda Sucupira	252
RPPN	Fazenda Vargem Alegre	10
RPPN	Floresta do Pengá	57
RPPN	Gentio	1.393
RPPN	Gibão/Fleixeiras	3.528
RPPN	Gruta do Carimbado	3
RPPN	Gruta do Carimbado II	2
RPPN	Guilman Amorim	254
RPPN	Habitat Engenharia	6
RPPN	Herculano	50
RPPN	Horto Alegria	1.064
RPPN	Horto Carbonita B	3.553
RPPN	Horto Carbonita C	2.564
RPPN	Horto Carbonita I	220
RPPN	IAOPA Agropecuária	796
RPPN	Instituto Olho D'Água	2
RPPN	Irmã Sheila	65
RPPN	Itabiruçu	221
RPPN	José Luiz Magalhães Netto	17
RPPN	Josepha Mendes Ferrão	1
RPPN	Juliano Banko	307
RPPN	Jurema	436
RPPN	Jurerê	7
RPPN	Lafarge	83
RPPN	Loredano Aleixo	567
RPPN	Luiz Carlos Jurovsk Tamassia	1.247
RPPN	Mata do Jambreiro	912
RPPN	Mata do Tuffi	57
RPPN	Mata Samuel de Paula	148
RPPN	Mata São José	522
RPPN	Mato da Copaíba	5
RPPN	Mato Limpo	39
RPPN	Minas Tênis Clube	15
RPPN	Monte Santo	5
RPPN	Morro das Árvores	217
RPPN	Morro do Elefante	31
RPPN	Morro Grande 1, 2, 3, 4	364
RPPN	Nascentes do Aiuruoca I	31
RPPN	Nascentes do Aiuruoca II	22
RPPN	Nossa Senhora Aparecida	150
RPPN	Olga Coelho Ulman	92
RPPN	Ondina	27
RPPN	Ovídio Antônio Pires - 2	84
RPPN	Ovídio Antonio Pires 5	74
RPPN	Ovídio Pires 3	97
RPPN	Ovídio Pires 4	3
RPPN	Paixãozinha	15
RPPN	Paneleiros	8
RPPN	Pasmado	15
RPPN	Pedra Branca	259

Unidade de Uso Sustentável		
RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural		
Nome	Área (ha)	
RPPN	Ponte Funda	13
RPPN	Porto Cajueiro	6.190
RPPN	Quebra-Ossos	7
RPPN	Quinta do Centro	5
RPPN	Recanto dos Sonhos	17
RPPN	Refúgio dos Sauás - Resgate III	30
RPPN	Res. Britagem São Salvador	10
RPPN	Reserva Água Limpa I, II, III	518
RPPN	Reserva Ambiental Rolim	22
RPPN	Reserva do Açude	5
RPPN	Reserva Natural Sagui da Serra	33
RPPN	Reserva Sucury	280
RPPN	Resgate I	10
RPPN	Retiro Branco	207
RPPN	Riacho Fundo I e II	22
RPPN	Rio das Antas	35
RPPN	Rubens Rezende Fontes	10
RPPN	Santa Eduvirgens	5
RPPN	Santuário Veredas do São Miguel	1.013
RPPN	São Francisco de Assis	4
RPPN	São Francisco de Assis	62
RPPN	São Lourenço e Funil	26
RPPN	Sauá	13
RPPN	Serra da Prata	205
RPPN	Serra do Ibitipoca	5
RPPN	Serra do Papagaio - Matutu	378
RPPN	Serra dos Garcias	18
RPPN	Serrinha	5
RPPN	Sítio do Zaca	17
RPPN	Sítio Dois Irmãos	17
RPPN	Sítio dos Borges	283
RPPN	Sítio do Tileco	7
RPPN	Sítio Ribeirão das Mortes	5
RPPN	Sítio Som e Poesia	4
RPPN	Sítio Usina	2
RPPN	Sítio Ventania	1
RPPN	Soc. Mineira de Cult. Nipo-Brasileira	22
RPPN	Sol Nascente	60
RPPN	Tambasa	5
RPPN	Terra da Pedra Montada	42
RPPN	Terras da Madruga	10
RPPN	Terras do Morro Grande	69
RPPN	Toca Furada	1
RPPN	Usina Cel. Domiciano	222
RPPN	Vale da Luciânia	2.896
RPPN	Vale de Salvaterra	263
RPPN	Vale do Parauninha	166
RPPN	Vale dos Cristais	249
RPPN	Vale Encantado	38
RPPN	Vargem do Rio das Pedras	611
RPPN	Vereda da Caraíba	10.368

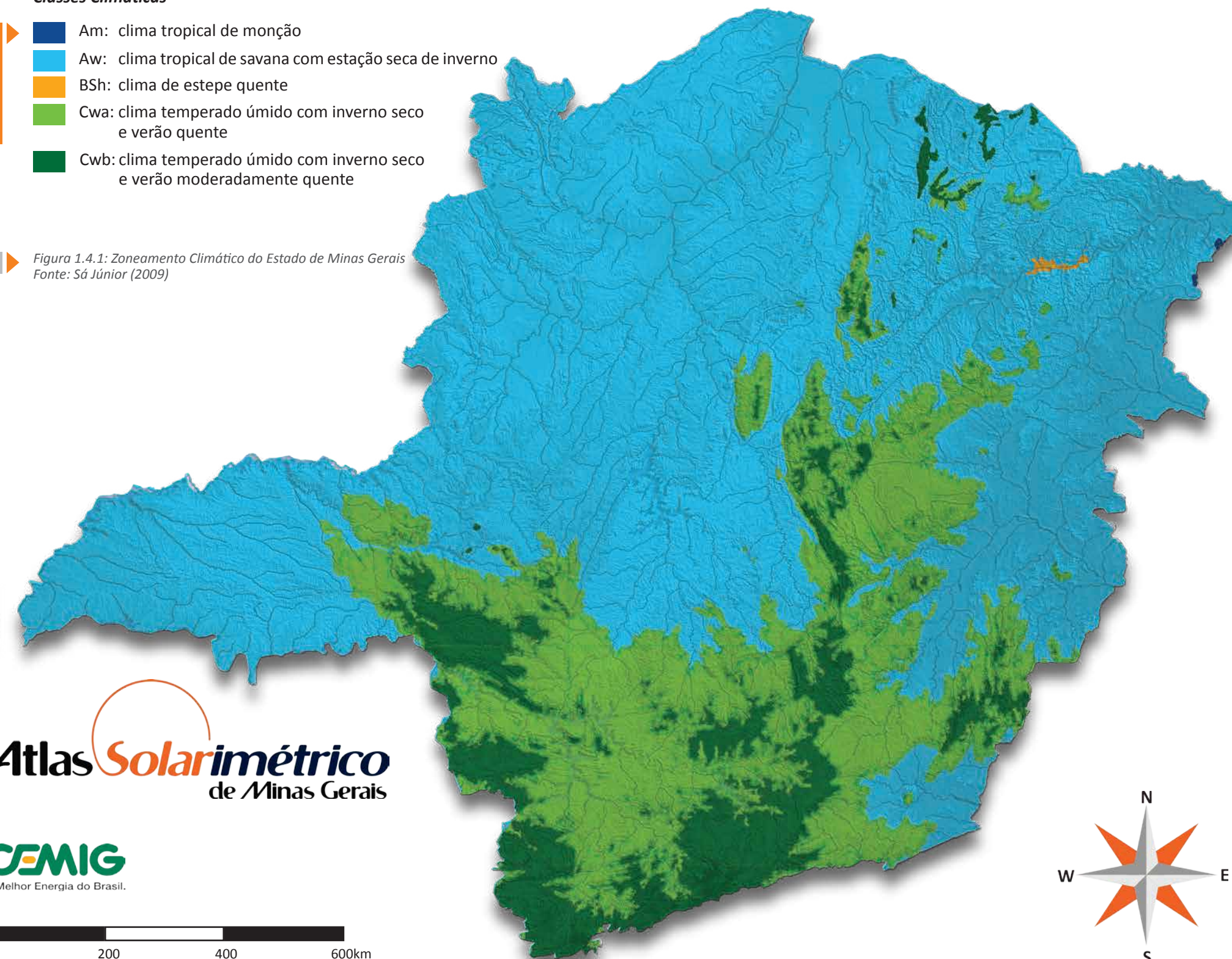
Unidade de Uso Sustentável		
RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural		
Nome	Área (ha)	
RPPN	Vida Verde	11
RPPN	Ville Casa Branca	3
RPPN	07 de Outubro	5
RPPN	Água Boa	1.316
RPPN	Fazenda Bosque da Neblina	40
RPPN	Fazenda Nascer	60
RPPN	Mitra do Bispo II	26
RPPN	Reserva do Muquém	718
RPPN	Reserva do Triângulo I	5.540
RPPN	São Paulo	5
RPPN	São Vicente	2
RPPN	Vale das Borboletas	11
Área de Proteção Especial		
APE - Área de Proteção Especial		
Nome	Área (ha)	
APE	Áreas Adjacentes ao PAQ do Rio Doce	5.951
APE	Bacia do Ribeirão da Laje	6.193
APE	Barreiro	1.327
APE	Catarina	180
APE	Cercadinho	247
APE	Confusão	2.768
APE	Córregos Feio e Fundo e Areia	14.800
APE	Fechos	476
APE	Lapa Nova de Vazante	75
APE	Mutuca	250
APE	Pico do Ibituruna	6.000
APE	Ribeirão do Urubu	12.903
APE	Rio Manso	65.778
APE	Rola-Moça e Bálsamo	738
APE	Santa Izabel e Espalha	21.600
APE	Serra Azul	26.058
APE	Soberbo	10.300
APE	Taboão	890
APE	Todos os Santos	37.800
APE	Várzea das Flores	12.300
APE	Veríssimo	2.000
Terras Indígenas		
TI - Terras Indígenas		
Nome	Área (ha)	
TI	Guarani	3.270
TI	Krenak	4.040
TI	Maxacali	5.307
TI	Xacriabá	46.800

1.4 – Clima

Classes Climáticas

- Legenda**
- Am: clima tropical de monção
 - Aw: clima tropical de savana com estação seca de inverno
 - BSh: clima de estepe quente
 - Cwa: clima temperado úmido com inverno seco e verão quente
 - Cwb: clima temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente

Figura 1.4.1: Zoneamento Climático do Estado de Minas Gerais
Fonte: Sá Júnior (2009)



As condições reinantes de tempo durante longos períodos determina a condição climática de uma região. A classificação climática de Köppen-Geiger é amplamente adotada para caracterizações climatológicas. A última atualização climática de Minas Gerais foi efetuada por Sá Júnior (2009), sendo identificadas as classes climáticas Aw (Clima tropical de savana com estação seca de inverno), Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente), Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente) e em menor escala as classes BSh (clima de estepe quente) e Am (clima tropical de monção). A Figura 1.4.1 ilustra as principais classes climáticas observadas em Minas Gerais.

1.4 – Clima

Precipitação

As séries históricas empregadas nesse trabalho pertencem às redes pluviométricas monitoradas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM), Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS), Furnas e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), gerenciadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) através do sistema HidroWeb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>). A seleção das séries levou em consideração o período de duração da coleta de dados, a continuidade das séries e a análise de consistência dos dados.

O período mínimo de duração das séries foi estabelecido em 20 anos para permitir a espacialização das informações em áreas com baixa disponibilidade de séries superiores a 30 anos, como a região noroeste de Minas.

A análise de consistência baseou-se nos seguintes critérios:

- Descarte de dados mensais quando o número de falhas excedesse a 3 falhas/mês entre os meses de outubro e março;
- Descarte de dados mensais quando o número de falhas excedesse a 5 falhas/mês entre os meses de abril e setembro;
- Reposição das falhas com dados de estações próximas submetidos à testes de homogeneidade conforme metodologia adotada por Caram (2007).
- Descarte de dados mensais quando fossem observados registros de chuvas com magnitudes superiores a 80 mm/dia, precedidas de falhas nas medições (chuvas acumuladas no pluviômetro);

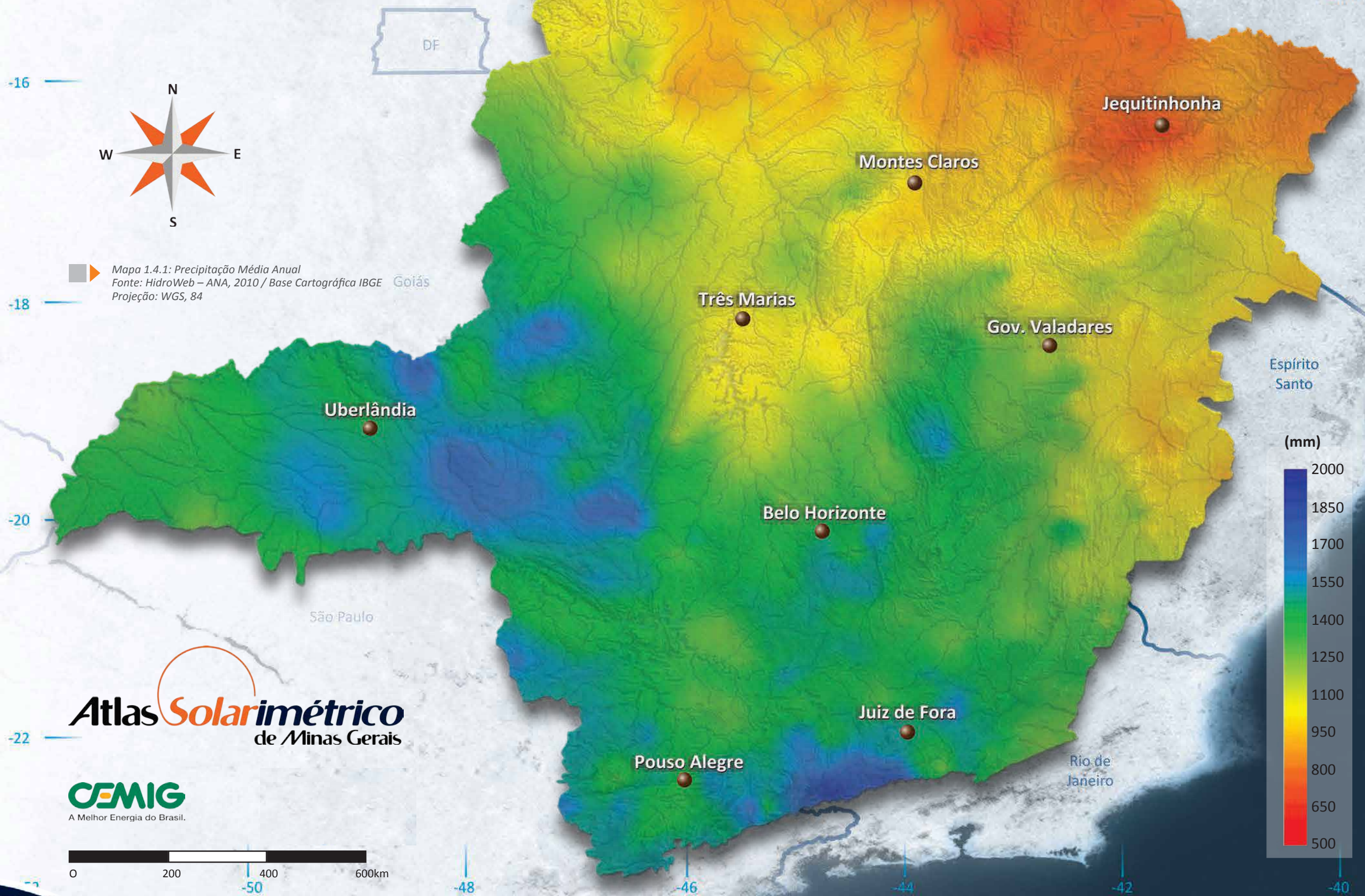
- Descarte de dados diários de chuvas de grande magnitude (acima de 100 mm/dia) quando não houvesse registro de chuvas acima de 50 mm/dia em estações vizinhas ou alterações na vazão de cursos d'água na bacia hidrográfica em que a estação se encontrava.

Entre as estações disponibilizadas pelo Hidroweb para o estado de Minas Gerais, 590 atenderem aos critérios de seleção adotados.

Os Mapas 1.4.1 a 1.4.13 apresentam a distribuição das precipitações anuais e mensais no estado de Minas Gerais, com base nos dados já citados.



Precipitação Média Anual

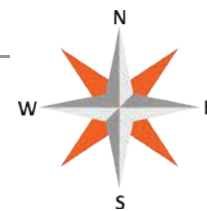
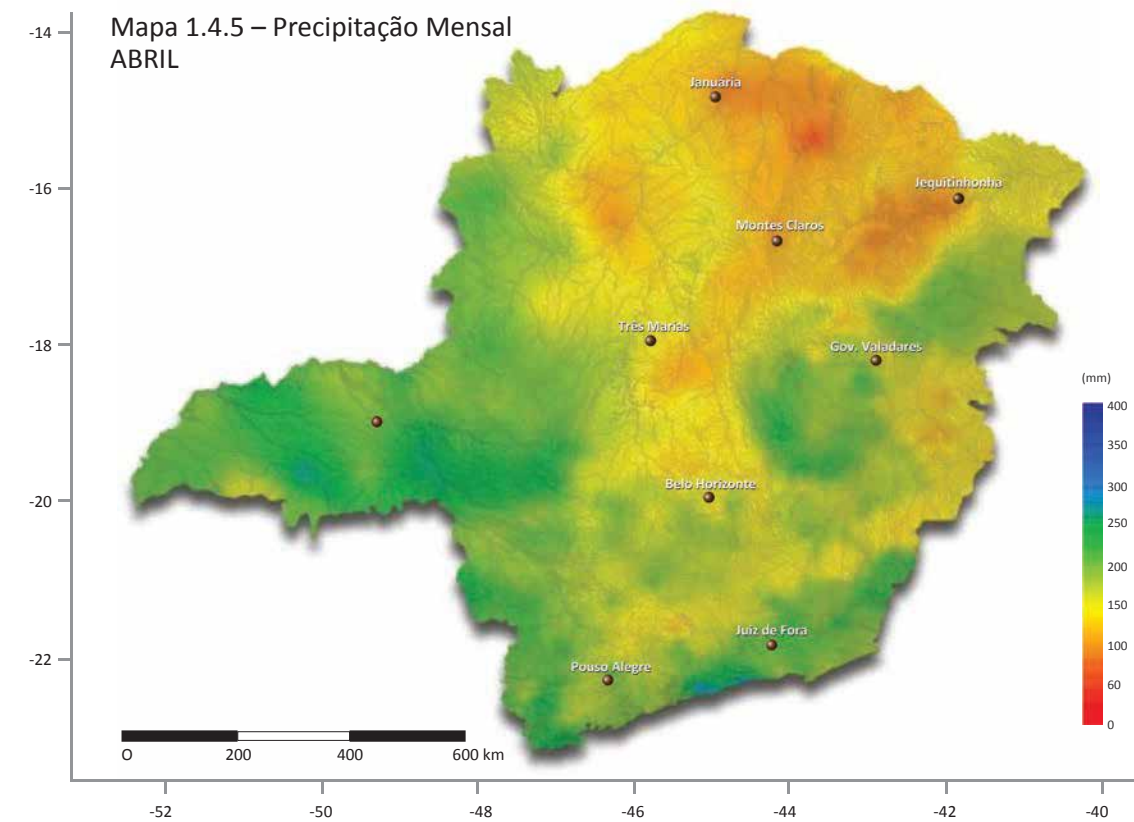
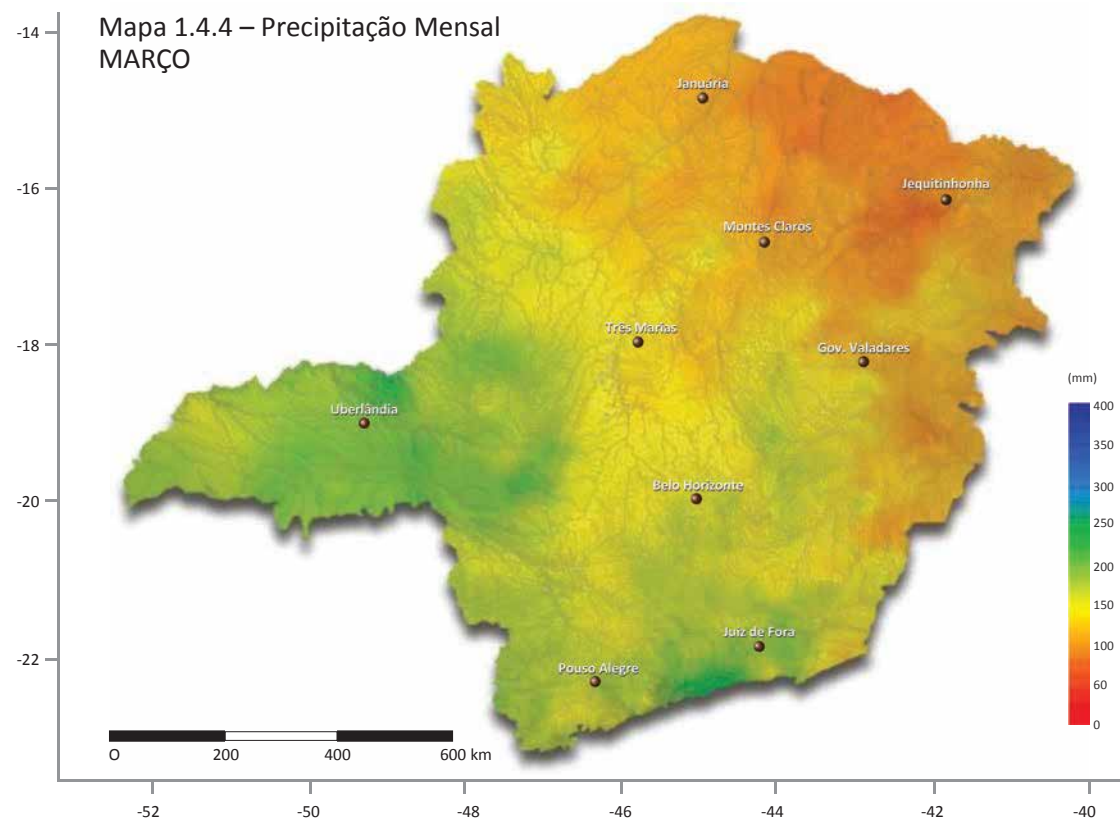
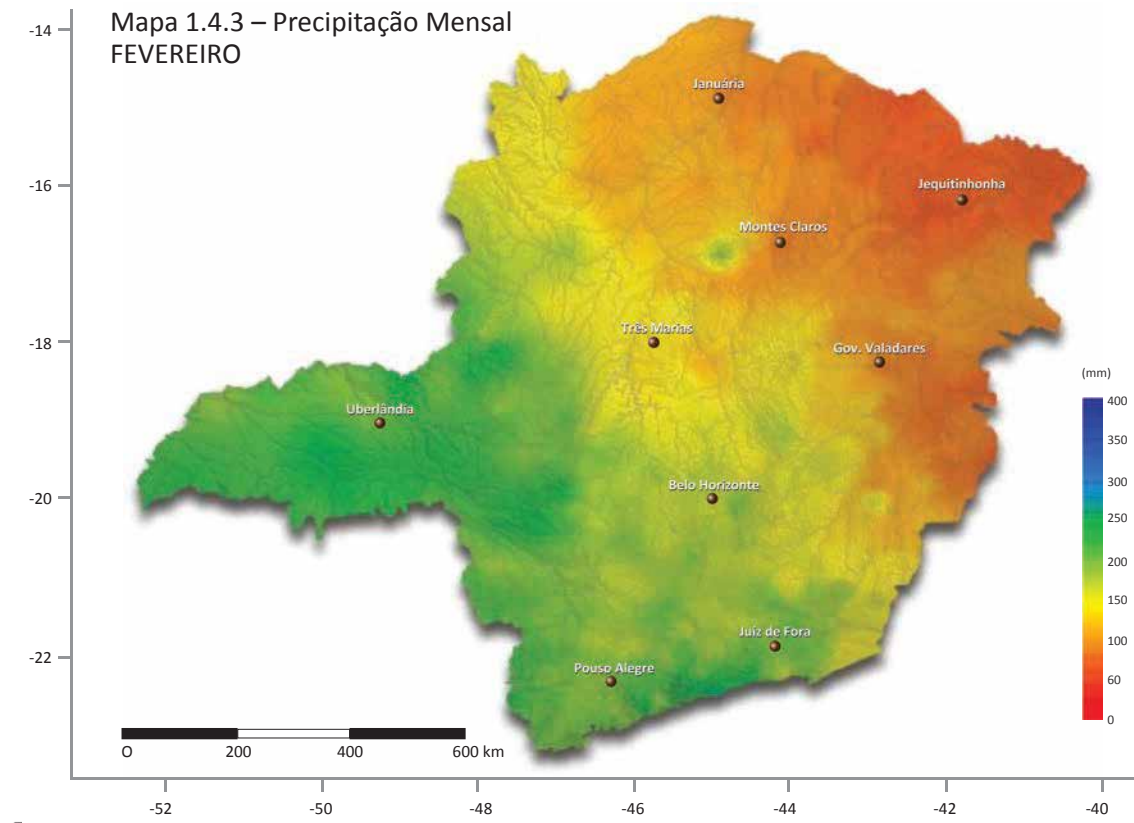
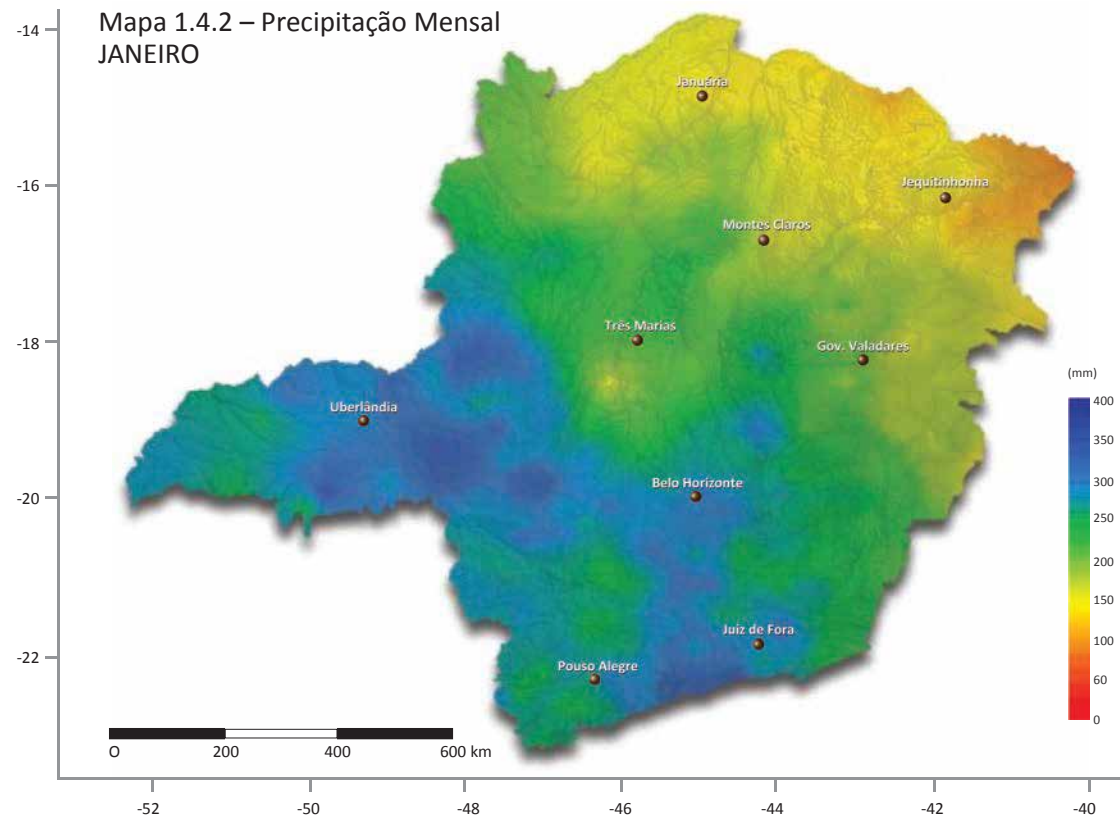


Mapa 1.4.1: Precipitação Média Anual
Fonte: HidroWeb – ANA, 2010 / Base Cartográfica IBGE
Projeção: WGS, 84

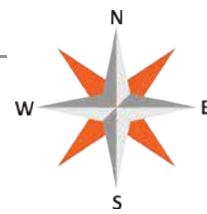
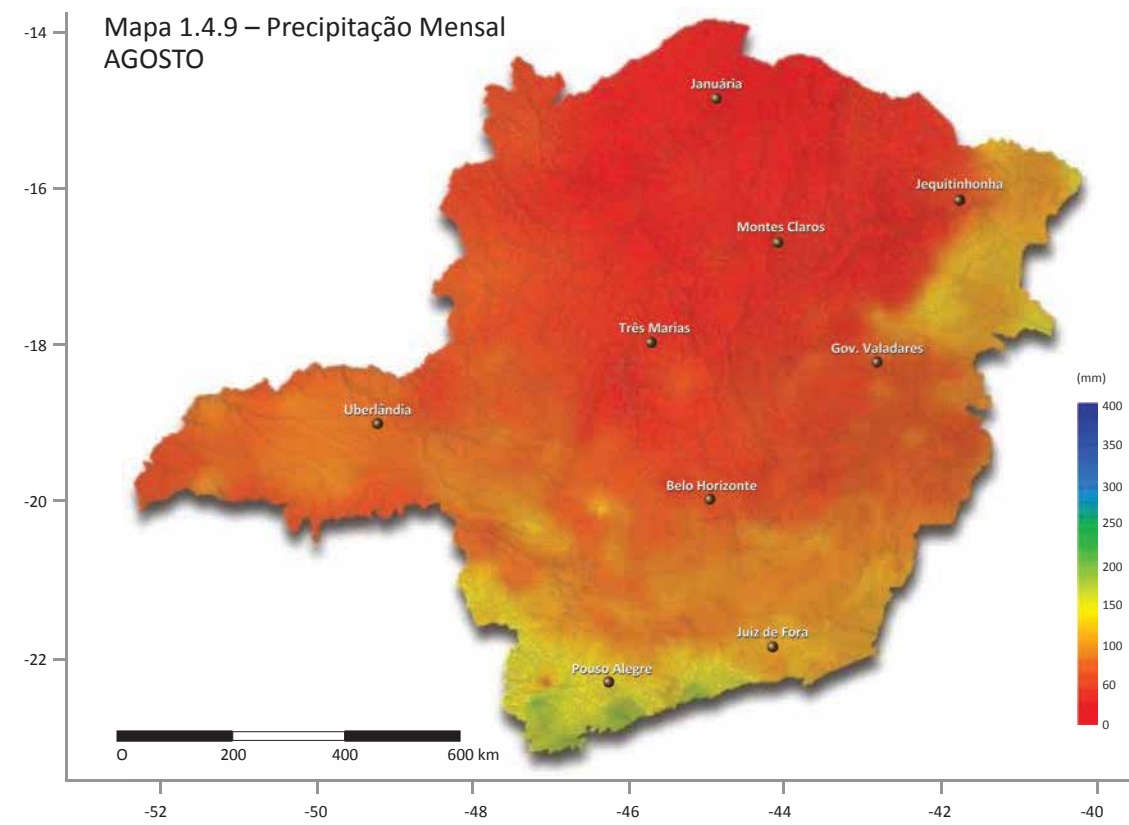
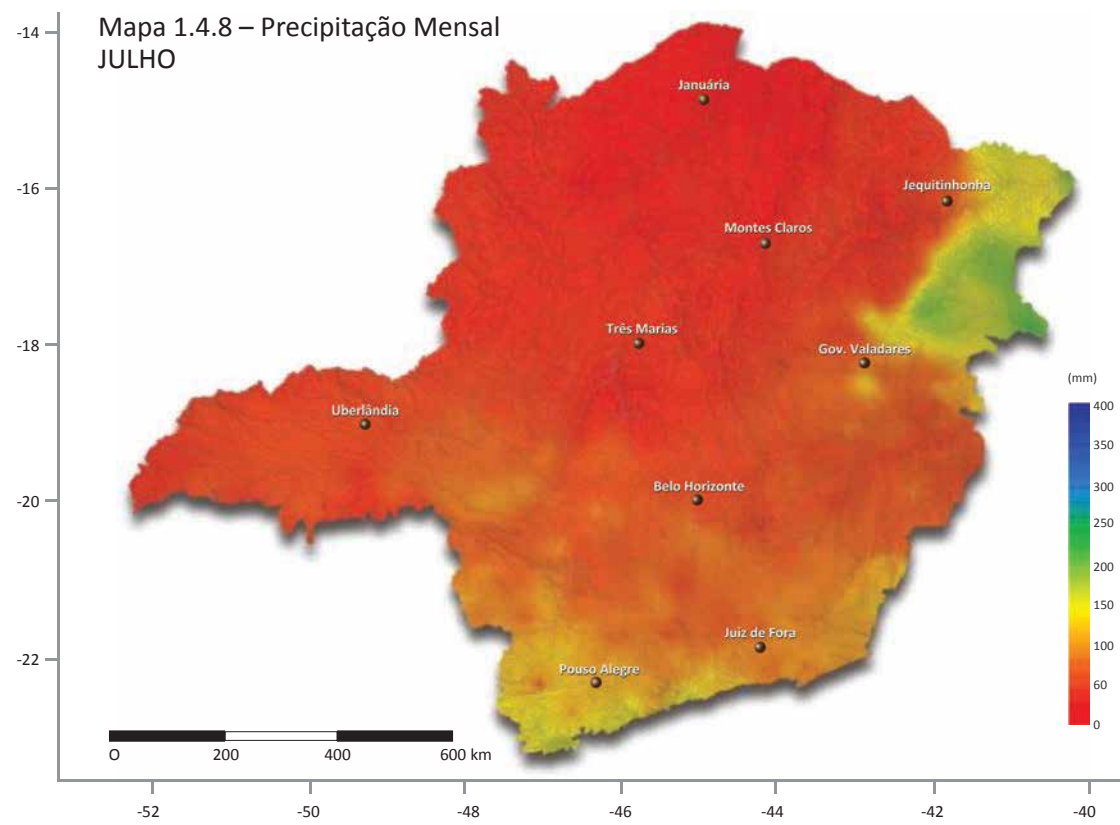
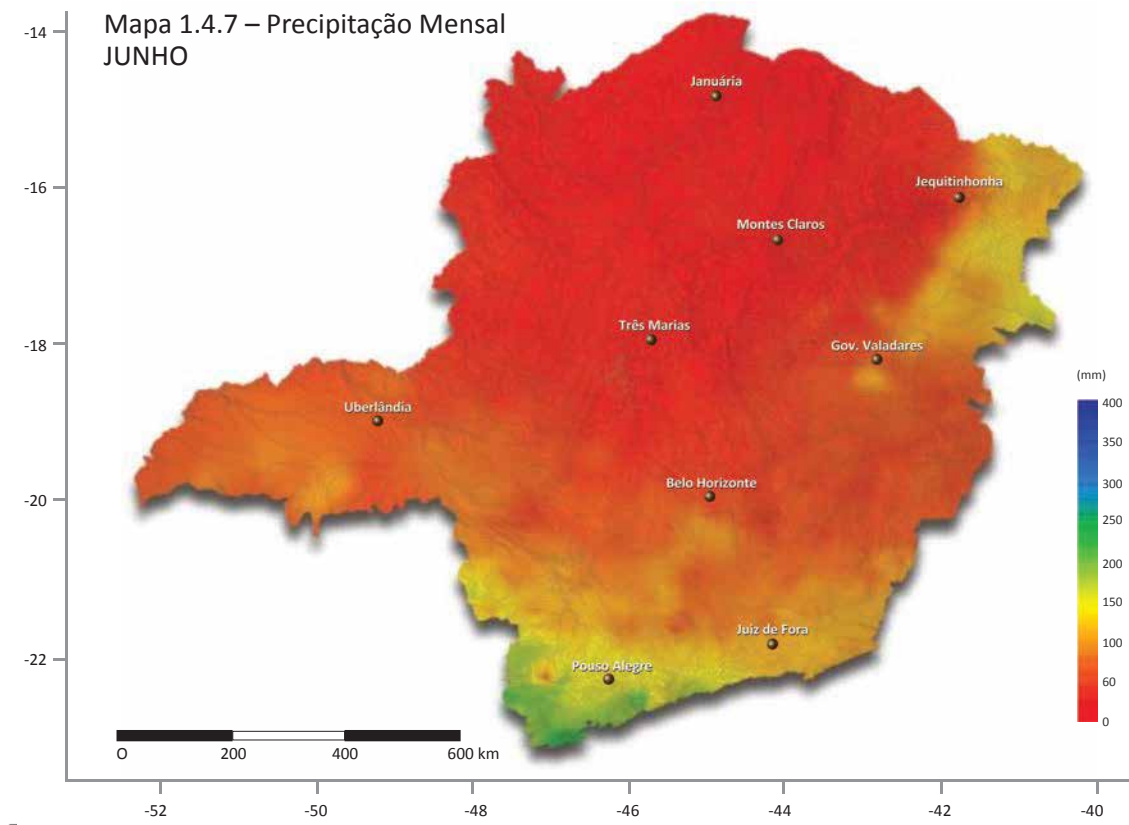
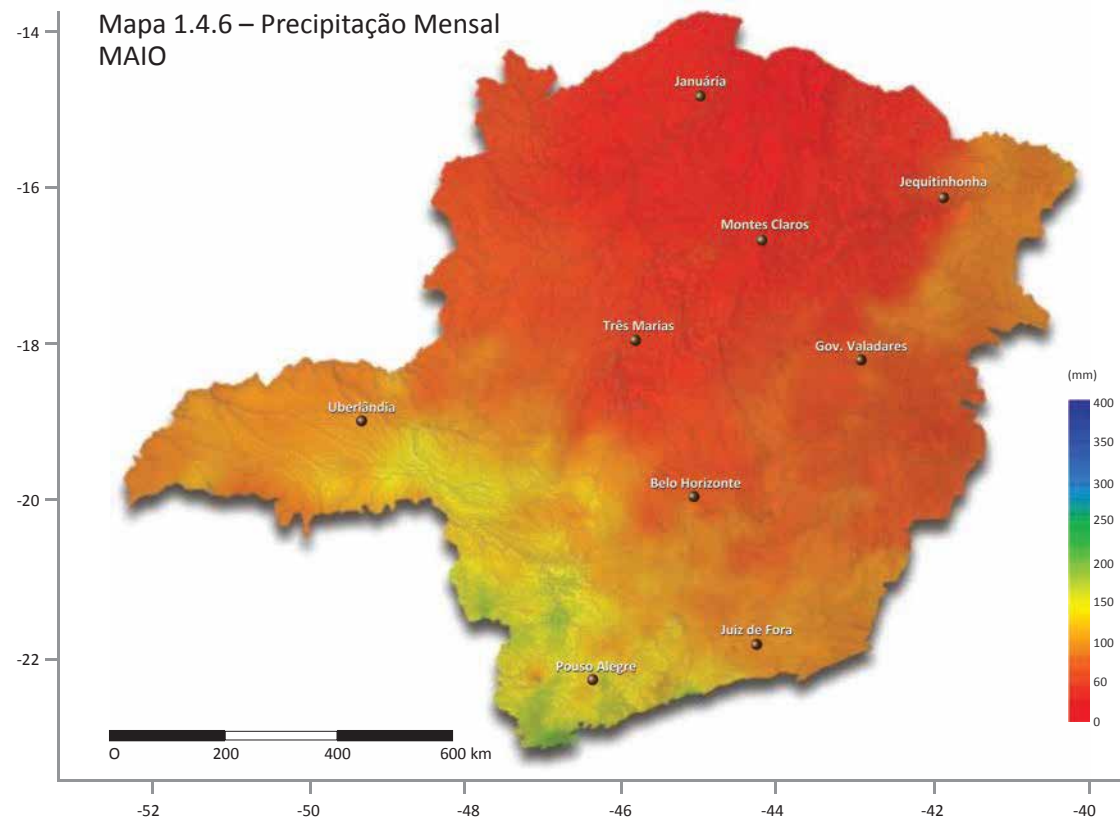
Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



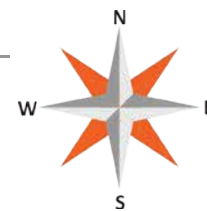
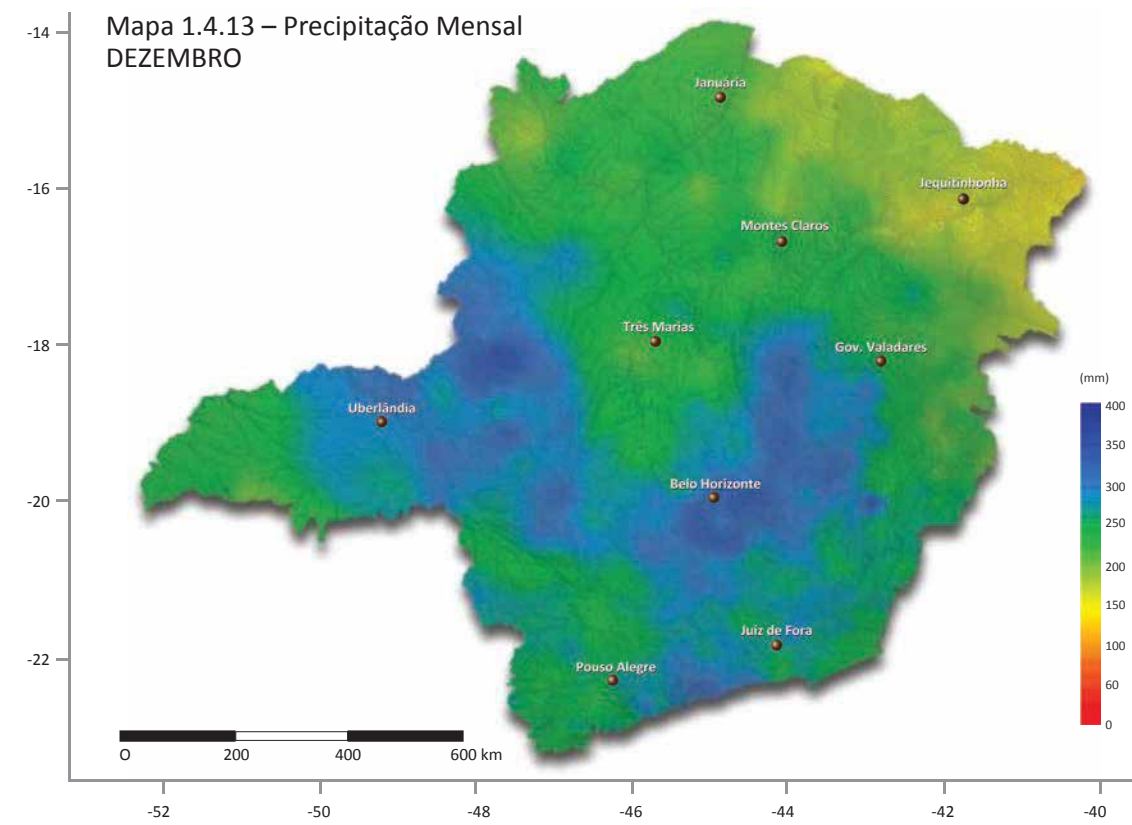
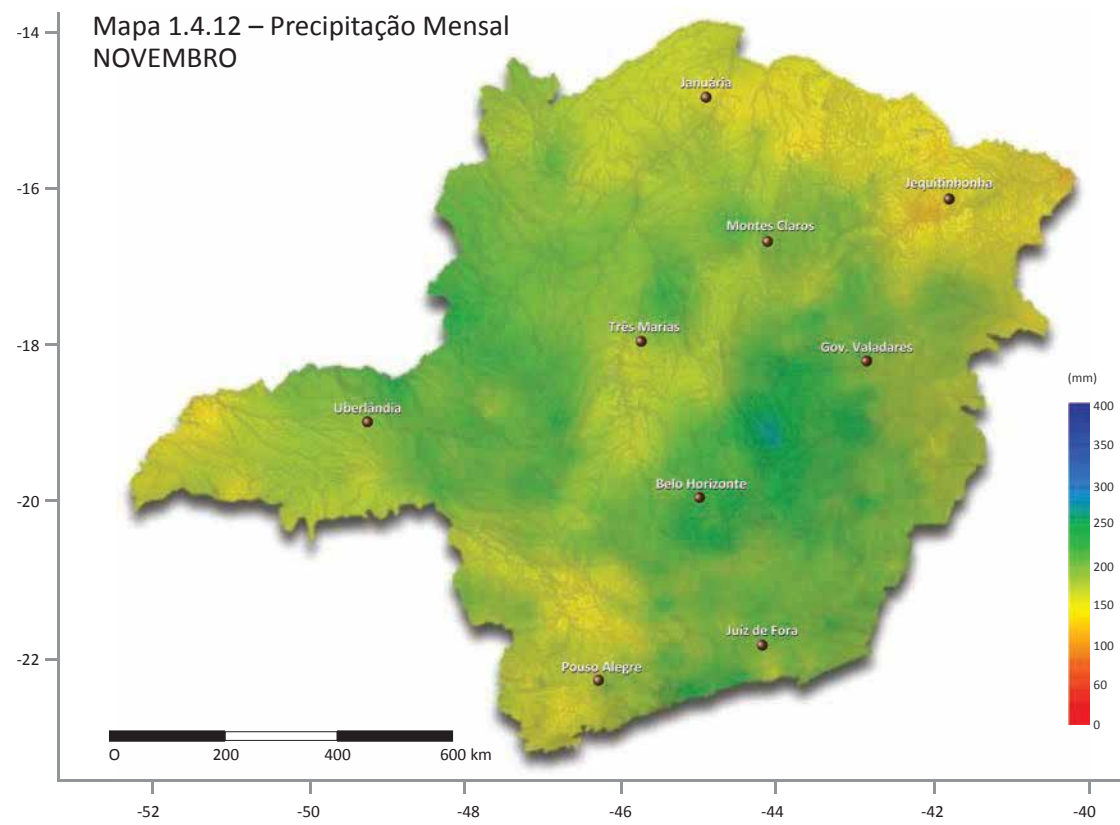
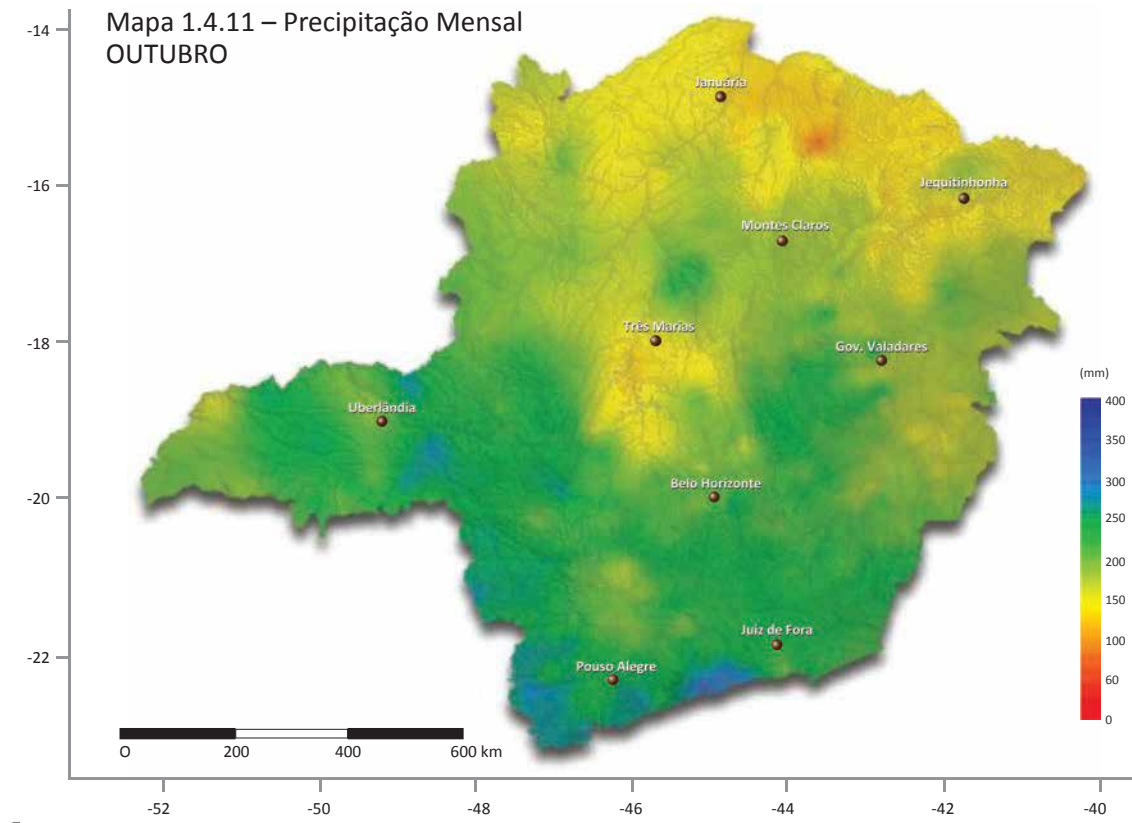
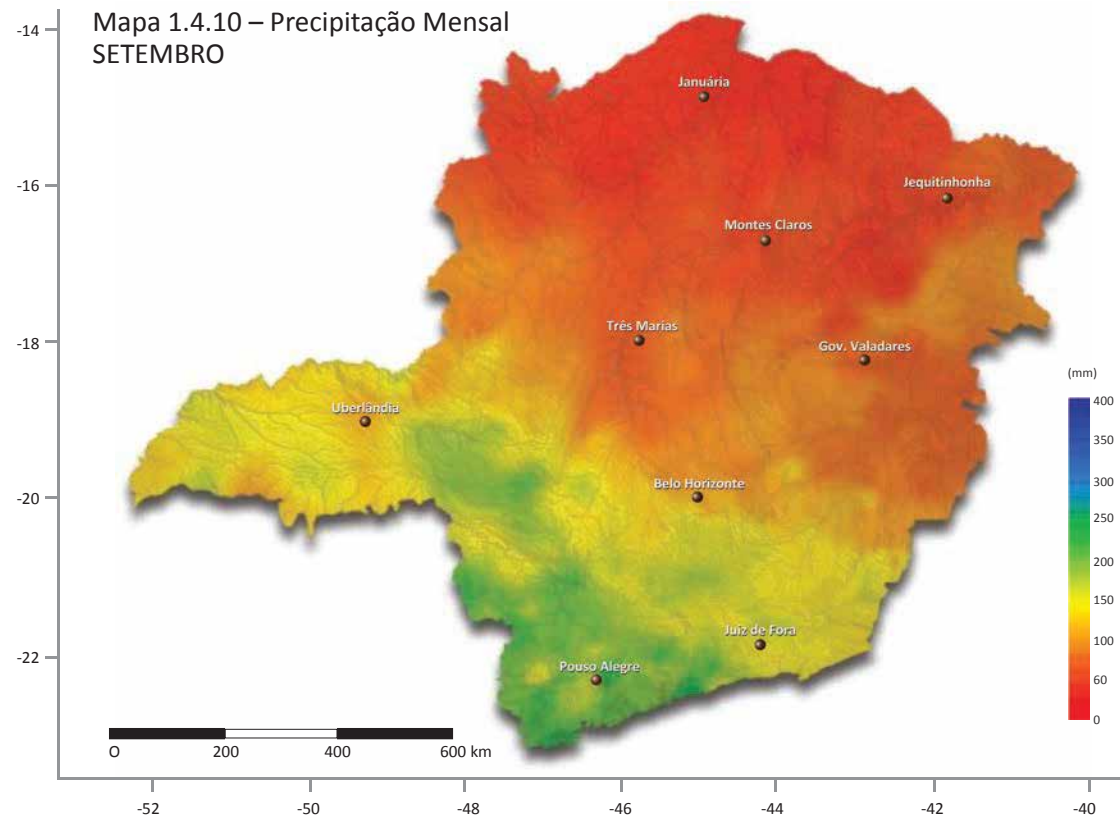
1.4 – Clima



1.4 – Clima



1.4 – Clima



1.4 – Clima

Temperatura

A espacialização das temperaturas máximas e mínimas mensais no estado de Minas Gerais baseou-se nas séries históricas de 52 estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pertencentes ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) recentemente disponibilizado para uso.

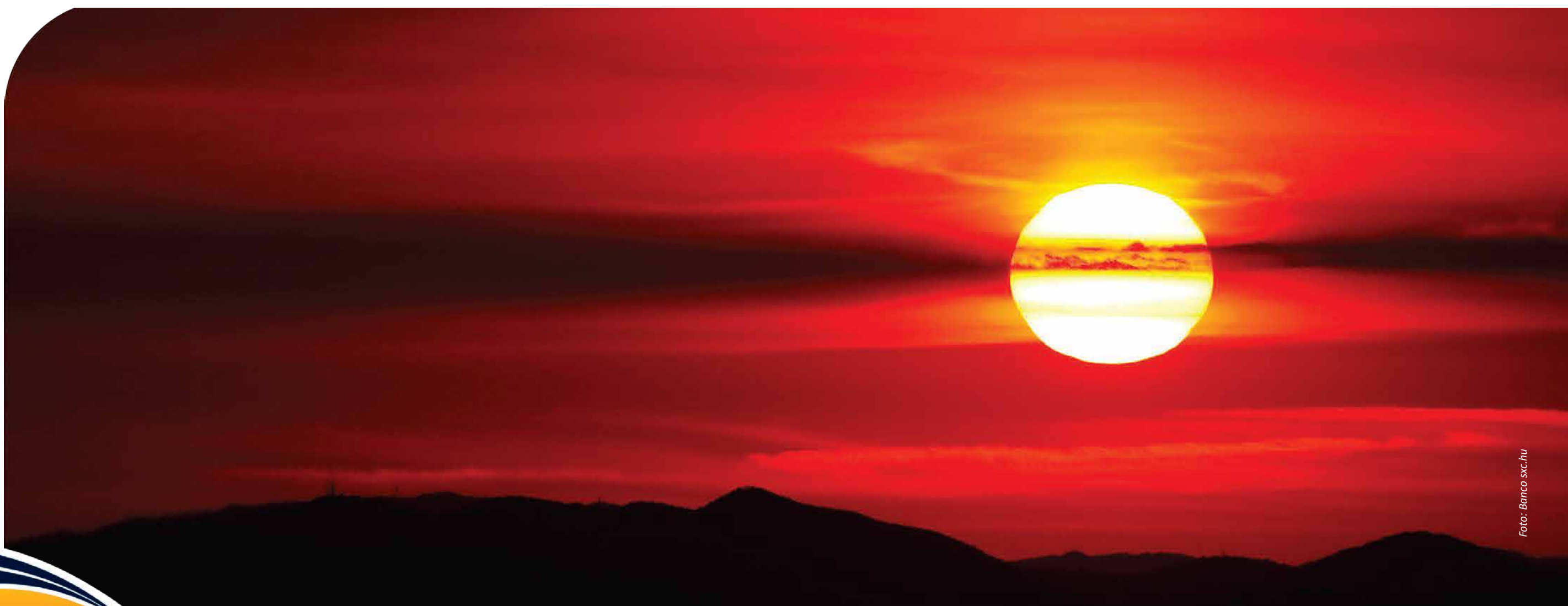
A espacialização da temperatura foi efetuada a partir do estabelecimento de relações funcionais entre a temperatura mensal e a altimetria local obtida pelo modelo de elevação digital do terre-

no SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission: Missão Topográfica Radar Shuttle*), disponibilizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration: Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço*).

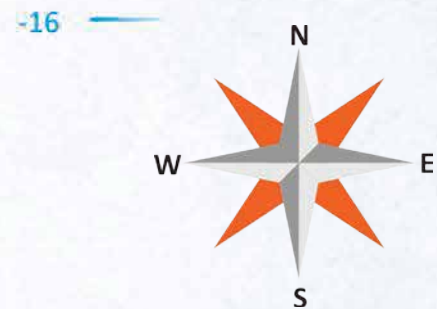
A localização geográfica e o tipo de relevo exercem influência nas temperaturas em Minas Gerais, onde predominam as maiores médias de temperatura máxima e mínima nas regiões

Centro-Oeste, Noroeste e Triângulo. A variação da temperatura média anual nas áreas mais elevadas varia entre 17°C a 20°C. Já nas áreas de menor altitude, a temperatura média anual varia de 20°C a 23°C.

Os Mapas 1.4.14 e 1.4.15 apresentam a média das temperaturas médias máximas e mínimas anuais no estado de Minas Gerais com base nos dados obtidos.



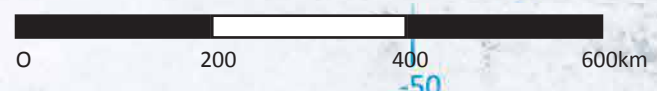
Temperatura Máxima Média Anual



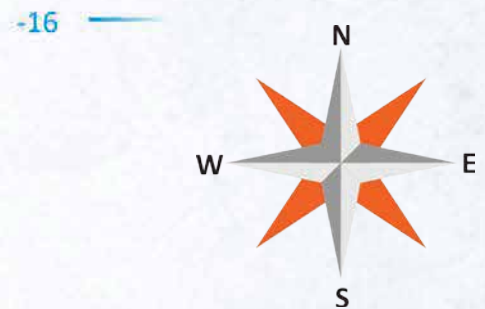
Mapa 1.4.14: Temperatura Máxima Média Anual
Fonte: INMET(1961 – 1990)
Projeção: WGS, 84



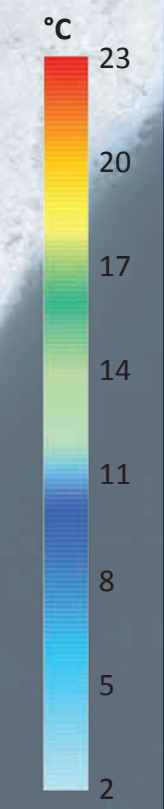
Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



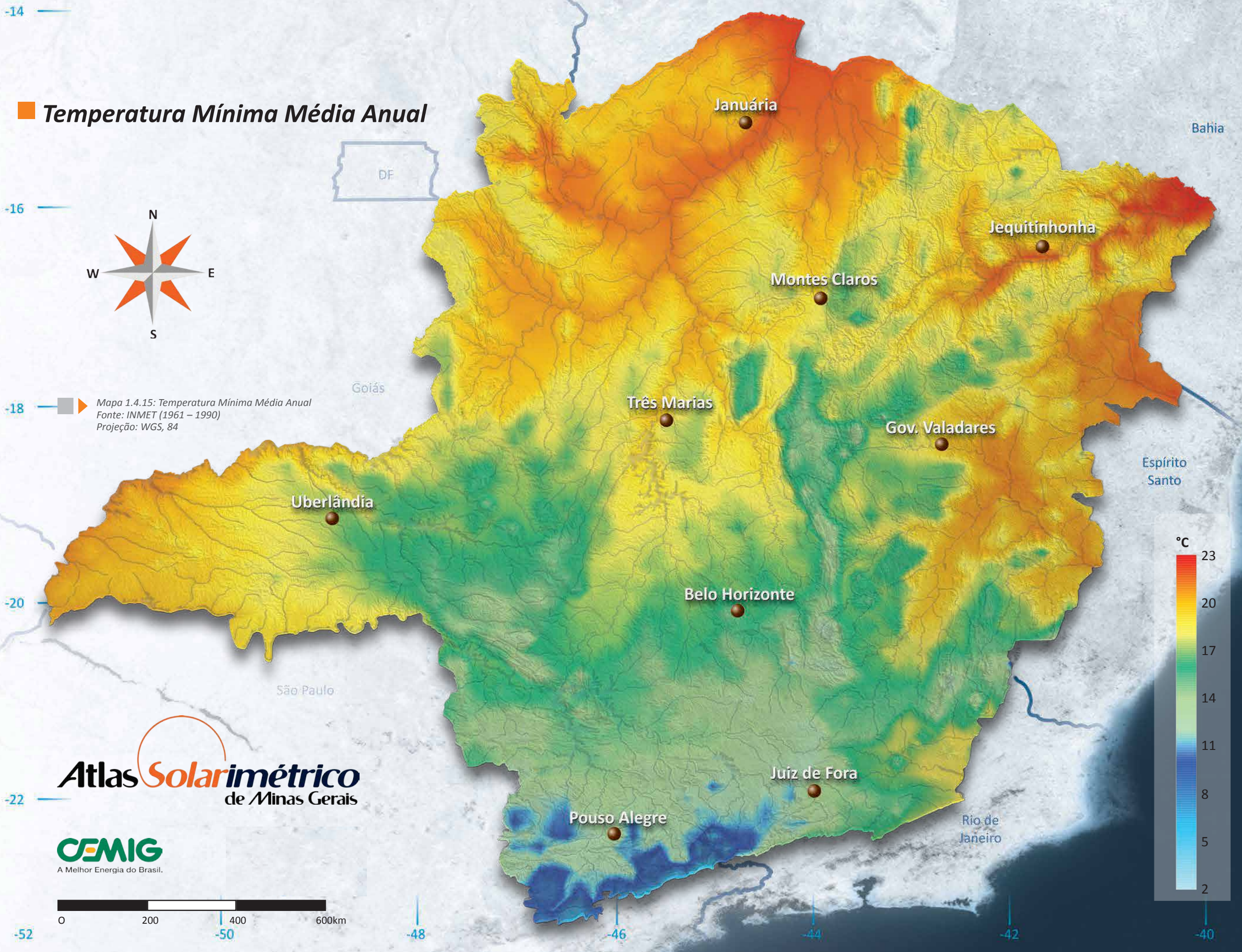
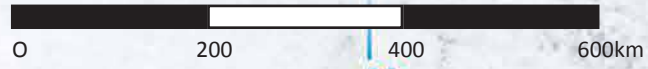
Temperatura Mínima Média Anual



Mapa 1.4.15: Temperatura Mínima Média Anual
Fonte: INMET (1961 – 1990)
Projeção: WGS, 84



Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



1.5 – Infraestrutura

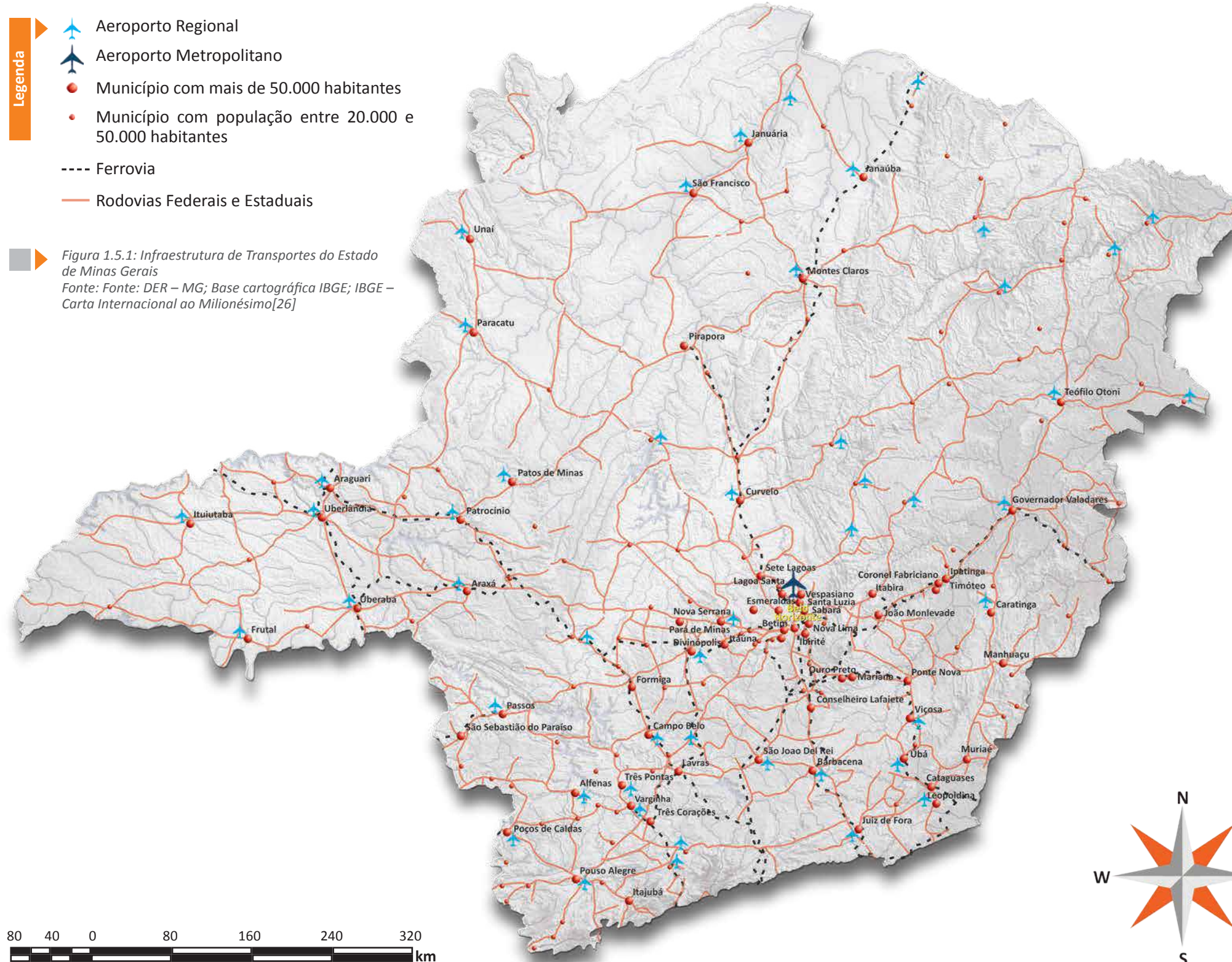
Vias de acesso

De acordo com o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER/MG-nov./2010), o Estado tem 8.957 km de rodovias federais (apenas 667 km não pavimentados) e 26.604 km de rodovias estaduais (7.238 km não pavimentados). Já no que diz respeito à malha ferroviária, Minas Gerais conta com 5.080 km de ferrovias e as principais empresas que atuam no setor são a Ferrovia Centro-Atlântica, a MRS Logística S.A. e a Estrada de Ferro Vitória-Minas (Figura 1.5.1). Ainda, Minas Gerais apresenta rios navegáveis, a exemplo dos rios Paranaíba, Paracatu, das Velhas, Paraopeba e São Francisco.

Sistema elétrico

Minas Gerais possui 372 empreendimentos em operação, com uma potência instalada de 19.595 MW. Nos próximos anos, o Estado terá uma adição de 1.391 MW na capacidade de geração, resultado dos 7 empreendimentos em construção (454 MW) e mais 73 outorgados (937 MW). As Tabelas 1.5.1 e 1.5.2 apresentam o número e a potência das CGH (Central Geradora Hidrelétrica), PCH (Pequena Central Hidrelétrica), UHE (Usina Hidrelétrica de Energia) e UTE (Usina Termelétrica de Energia) em Minas Gerais. As Tabelas 1.5.3 e 1.5.4 demonstram as usinas hidrelétricas e termelétricas em operação.

O Estado ainda conta com uma usina eólica e uma usina solar que será instalada em Sete Lagoas. A CEMIG, como principal concessionária estadual, distribui energia para 805 dos 853 Municípios mineiros, o que representa o gerenciamento de uma rede de distribuição acima de 400 mil km de extensão, considerada a maior da América Latina. O Mapa 1.5.1 ilustra o sistema elétrico de Minas Gerais.



Empreendimentos em Operação em Minas Gerais

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	%
CGH	84	48.694	0,25
PCH	87	719.189	3,67
UHE	63	16.968.175	86,59
UTE	138	1.859.052	9,49
Total	372	19.595.110	100,00

Tabela: 1.5.1: Empreendimentos em Operação em Minas Gerais, 2011

Fonte: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.asp?cmbEstados=MG:MINASasp?cmbEstados=MG:MINAS>

Empreendimentos em Construção em Minas Gerais

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	%
CGH	1	848	0,19
PCH	3	36.500	8,05
UHE	2	386.200	85,15
UTE	1	30.000	6,61
Total	7	453.548	100,00

Tabela: 1.5.2: Empreendimentos em Construção em Minas Gerais, 2011

Fonte: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/CapacidadeEstado.asp?cmbEstados=MG:MINASasp?cmbEstados=MG:MINAS>

Usinas Hidrelétricas em Operação em Minas Gerais

Usina Hidrelétrica	MW	RIO
Itumbiara	2.081	Paranaíba
São Simão	1.710	Paranaíba
Marimbondo	1.440	Grande
Água Vermelha (José Ermírio de Moraes)	1.396	Grande
Furnas	1.216	Grande
Emborcação	1.192	Paranaíba
Estreito (Luiz Carlos Barreto de Carvalho)	1.048	Grande
Cachoeira Dourada	658	Paranaíba
Nova Ponte	510	Araguari
Marechal Mascarenhas de Moraes (Ex-Peixoto)	492	Grande
Jaguara	424	Grande
Miranda	408	Araguari
Três Marias	396	São Francisco
Volta Grande	380	Grande
Irapé	360	Jequitinhonha
Aimorés	330	Doce
Porto Colômbia	319	Grande
Amador Aguiar I (Ex - Capim Branco I)	244	Araguari
Igarapava	210	Grande
Amador Aguiar II (Ex - Capim Branco II)	210	Araguari
Mascarenhas	189	Doce
Ilha dos Pombos	187	Paraíba do Sul
Funil	180	Grande

Cont. Usinas Hidrelétricas em Operação em Minas Gerais

Baguari	141	Doce
Guilman-Amorim	140	Piracicaba
Risoleta Neves (Ex-Candongá)	140	Doce
Porto Estrela	112	Santo Antônio
Queimado	105	Preto
Salto Grande	102	Santo Antônio
Retiro Baixo	82	Paraopeba
Sá Carvalho	78	Piracicaba
Santa Clara	60	Mucuri
Sobragi	60	Paraibuna
Itutinga	52	Grande
Picada	50	Peixe
Camargos	46	Grande
Barra do Braúna	39	Pomba
Santa Fé I	30	Matipó
Nova Maurício	29	Piau
Cachoeirão	27	Manhuaçu
Unai Baixo	26	Pará
São João	25	Piranga
Ivan Botelho III (Ex-Triunfo)	24	Glória
Ivan Botelho I (Ex-Ponte)	24	Pomba
Pai Joaquim	23	Araguari
Barra da Paciência	23	Corrente Grande
Ormeo Junqueira Botelho (Ex-Cachoeira Encoberta)	23	Glória
Funil	23	Guanhães
João Camilo Penna (Ex-Cachoeira do Emboque)	22	Matipó
Pipoca	20	Manhuaçu
Paíol	20	Suaçuí Grande
Areia Branca	20	Manhuaçu
Malagone	19	Uberabinha
Piau	18	Piau/Pinho
Antas II	17	Antas
Túlio Cordeiro de Mello (Ex-Granada)	16	Matipó
Carangola	15	Carangola
Gafanhoto	14	Pará
Corrente Grande	14	Corrente Grande
Ivan Botelho II (Ex-Palestina)	12	Pomba
Brecha	12	Piranga
Glória	11	Glória
São Gonçalo (Ex-Santa Bárbara)	11	Santa Bárbara
Fumaça	10	Gualaxo do Sul
Ninho da Água	10	Santo Antônio
Cocais Grande	10	Ribeirão Grande
Outras usinas hidrelétricas menos de 10 MW de potência	378	
Total	17.736	

Tabela: 1.5.3: Usinas Hidrelétricas em Operação

Fonte: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/ResumoEstadual.asp> consulta em 10/05/2012

Usinas Termelétricas em Operação em Minas Gerais

Usina Termelétrica	MW	Combustível	Classe
Aureliano Chaves (Ex-Ibirité)	226	Gás Natural	Fóssil
Igarapé	131	Óleo Ultraviscoso	Fóssil
Açominas	103	Gás de Alto Forno	Outros
Cenibra	89	Licor Negro	Biomassa
Santa Juliana	88	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Juiz de Fora	87	Gás Natural	Fóssil
Usiminas 2	63	Gás de Alto Forno	Outros
São Judas Tadeu	56	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Ituiutaba	56	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Vale do São Simão	55	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Bioenergética Vale do Paracatu - BEVAP	55	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Volta Grande	55	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Vale do Tijuco	45	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Vale do Tijuco II	40	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Ipatinga	40	Gás de Alto Forno	Outros
LDC Bioenergia Lagoa da Prata (Ex-Louis Dreyfus Lagoa da Prata)	40	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Delta	32	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Campo Florido	30	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Coruripe Energética - Filial Campo Florido	30	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
DVPA	28	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Cerradão	25	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Total	25	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Cabrera	25	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Cargill Uberlândia	25	Resíduos de Madeira	Biomassa
Fosfertil (Expansão do Complexo Industrial Uberaba)	24	Gás de Processo	Outros
Coruripe Iturama	24	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Carneirinho	24	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Bunge Araxá	23	Enxofre	Outros
Usina Coruripe Açúcar e Álcool	20	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Contagem	19	Gás Natural	Fóssil
Usiminas	19	Gás de Alto Forno	Outros
Usina Monte Alegre	19	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Frutal	16	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Triálcool	15	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Passos	14	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Barreiro	13	Gás de Alto Forno	Outros
Uberaba	12	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Santo Ângelo	12	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Selecta	11	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Demais usinas com menos de 10 MW	120		
Total	1.816		

Tabela: 1.5.4: Usinas Termelétricas em Operação

Fonte: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/ResumoEstadual.asp> consulta em 10/05/2012

-14

-23

Linhas de Transmissão

- Legenda**
-  LT 500kV
 -  LT 345kV
 -  LT 230 - 161kV
 -  LT 138kV
 -  LT 69kV
 -  LT ≤ 34.5 kV
 -  UHE em operação
 -  SE existente
 -  SE planejada / em construção

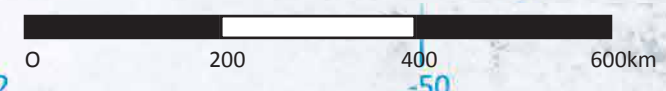
Mapa 1.5.1: Linhas de Transmissão do Estado de Minas Gerais
 Fontes: Base Cartográfica do DER – MG; IEF e IBGE[26]
 Projeção: WGS, 84

-18

-20

-22

Atlas Solarimétrico
 de Minas Gerais



-52

0

200

400

600km

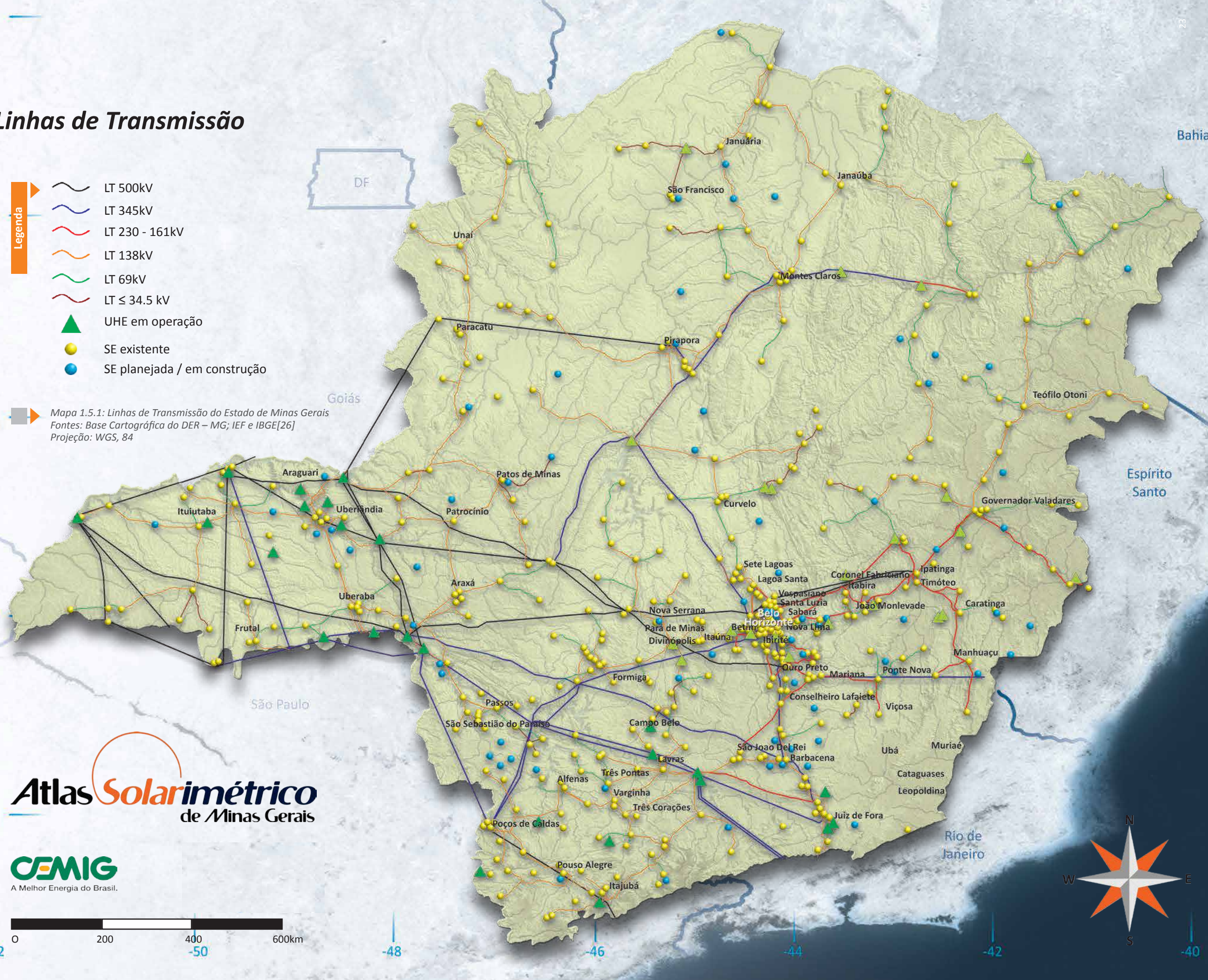
-48

-46

-44

-42

-40



1.6 – Demografia e consumo de energia



Foto: Banco sxc.hu

Os dados do Censo Demográfico (IBGE, 2010) revelam que a população de Minas Gerais era de 19.597.330 em 2010, sendo que 16.715.216 pessoas residiam na área urbana e 2.882.114 na área rural. Assim, o grau de urbanização de Minas Gerais era de 85,29% em 2010. A população estadual era formada por 9.641.877 homens e 9.955.453 mulheres.

A taxa média geométrica de crescimento anual da população de Minas Gerais, entre 2000 e 2010, foi de 0,91% a.a. contra 1,44% a.a. registrada entre 1991-2000. O crescimento da população é explicado pela evolução dos componentes da dinâmica demográfica: fecundidade, mortalidade e migração.

Assim, a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) do IBGE mostra que Minas Gerais, em 2009, tinha a segunda menor Taxa de Fecundidade Total (TFT) do país: 1,67 filho por mulher, atrás apenas do Rio de Janeiro (1,63). A TFT do Brasil era de 1,94 filho por mulher em 2009. Em 2000, o Censo Demográfico do IBGE indicava que a TFT mineira era de 2,23, o que indica o franco declínio deste indicador no Estado. A fecundidade mineira está abaixo do nível de reposição populacional (2,1), o que significa que, do ponto de vista apenas do crescimento vegetativo, que não considera os movimentos migratórios, a população deverá diminuir nas próximas décadas, caso os níveis de fecundidade se mantenham abaixo de 2,10 filho por mulher, hipótese bem plausível (IBGE, 2000; IBGE, 2009).

A análise da Expectativa de Vida ao Nascer (e_0) é importante para ter uma boa noção do comportamento da mortalidade no Estado. Em 2009 a e_0 de Minas Gerais era de 75,1 anos. Para que se tenha uma base comparativa, o Distrito Federal e Santa Catarina ocupam o 1º lugar (75,8 anos) enquanto Alagoas (67,6 anos) aparece na última posição. Isto demonstra que um brasileiro nascido e residente em Minas Gerais, em 2009, tende a viver, em média, 7,5 anos a mais que um nascido em Alagoas e apenas 0,7 ano a menos do que um nascido nas duas unidades da federação que ocupam o topo do ranking (IBGE, 2009).

De acordo com a PNAD 2009, das 17.332.000 pessoas que residiam em Minas Gerais nesse ano, 1.440.000 pessoas não eram naturais do Estado. Ainda, 6.839.000 não eram naturais do município de residência no ano da pesquisa (IBGE, 2009).

O Mapa 1.6.1 demonstra que, em 2010, a população mineira não está distribuída de maneira uniforme no território, uma vez que a microrregião de Belo Horizonte concentra 24,35% da população total de Minas Gerais. Outras microrregiões merecem destaque, sobretudo aquelas que abrigam as cidades médias mais dinâmicas

do Estado. A microrregião de Uberlândia, no Oeste Mineiro, é a segunda mais populosa de Minas Gerais, com 820.245 pessoas, o que corresponde a 4,19% do total.

Nessa porção do Estado, a microrregião de Uberaba também merece destaque, com 346.024 pessoas (1,77%) (IBGE, 2010). Na Zona da Mata, a microrregião de Juiz de Fora abriga o terceiro maior contingente populacional do Estado, com 728.602 pessoas (3,72%). No Sul, as microrregiões de Varginha e Poços de Caldas se destacam com uma população de 441.060 (2,25%) e 342.055 (1,75%) respectivamente (IBGE, 2010). No Norte mineiro, o Censo Demográfico (IBGE, 2010) revela que apenas a microrregião de Montes Claros apresenta expressivo contingente populacional, com 601.867 pessoas (3,07%). No vale do rio Doce, as microrregiões de Ipatinga (526.781) e Governador Valadares (415.696) também possuem estoques populacionais significativos. Segundo o balanço energético publicado em 2010 para o Estado com ano base 2009 (CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais – 25º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG/2010 – ano base 2009), o consumo de energia elétrica cresceu progressivamente a partir de 2002. Destaca-se um aumento significativo da participação das fontes alternativas de energia. Do total da demanda estadual de energia, 55,2% referem-se a fontes renováveis de energia e o restante a fontes não renováveis. Em 2009 houve um crescimento de 9,5% em relação a 2008 na produção de energia hidráulica – 63.300 GWh (5.444 mil tep). Foi observado que em 2009, 58,8% da demanda de energia no Estado foi destinada ao setor industrial, enquanto o setor residencial representou 11,3%. O estado de Minas Gerais possui uma posição de destaque no cenário nacional quanto ao aproveitamento de energia solar. Em termos energéticos, a instalação de 1,58 milhões de m^2 de coletores solares em Minas Gerais representou uma capacidade instalada em 2009 de 1.105 MW_{th} (1 m^2 de coletor instalado gera 0,7 kW_{th} , que é a potência térmica aproveitada), o que significa uma economia, ou seja, energia elétrica evitada, de 1.327 GWh, ou um percentual de economia de 8,3% no ano de 2009. O Mapa 1.6.1 ilustra a distribuição da população residente em Minas Gerais por microrregião e do consumo de energia elétrica faturado no Estado em 2010. Observa-se que as microrregiões menos povoadas e com menor consumo estão localizadas no Norte, Noroeste e parte do Nordeste mineiro. Os principais centros consumidores e com maior população situam-se na região metropolitana de Belo Horizonte e seu entorno, na Zona da Mata em Juiz de Fora, no Triângulo Mineiro em Uberlândia, Uberaba e Araxá, destacando-se também as microrregiões do setor siderúrgico mineiro como Ipatinga, Itabira, Ouro Preto e Conselheiro Lafaiete.

-14

-25

População e Consumo de Energia

-16

Legenda

- Consumo de Energia (MWh) em 2010
- População
- Limites entre as microrregiões

-18

Mapa 1.6.1: População e Consumo de Energia por Microrregiões* do Estado de Minas Gerais
 Fontes: IBGE, 2010, CEMIG, 2010, ENERGISA, 2011, Empresa Elétrica Bragantina, 2011 e Departamento Municipal de Eletricidade de Poços de Caldas, 2011
 Projeção: WGS, 84

-20

-22

Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



-52

-48

-46

-44

-42

DF

Bahia

Espírito Santo

São Paulo

Rio de Janeiro



*A divisão territorial do Brasil em microrregiões adotada pelo IBGE tem fins de uso prático em estatística, agrupando municípios limítrofes com base em similaridades econômicas e sociais.



2. Energia Solar e Tecnologia



2.1	ENERGIA SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE	27	2.3.3	Tecnologia solar térmica	37
2.1.1	Introdução	27	2.3.4	Coletor solar plano, tecnologia e mercado no mundo e no Brasil	37
2.1.2	Mensuração da radiação solar na superfície terrestre	28	2.3.5	Coletor solar concentrador para produção de energia elétrica, tecnologia e mercado.....	38
2.1.3	Estimação da radiação solar na superfície terrestre	31	2.3.6	Evolução recente da tecnologia e mercado	40
2.1.4	Informações solarimétricas atualmente existentes no Brasil.....	32	2.3.7	Quantidade acumulada instalada por tecnologia e país	41
2.2	HISTÓRICO	32	2.4	DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA EM MINAS GERAIS	43
2.2.1	Linha de Tempo da Tecnologia Solar Fotovoltaica e Térmica	32			
2.3	TECNOLOGIA.....	34			
2.3.1	Tecnologia solar fotovoltaica.....	34			
2.3.2	Estado da arte das eficiências	34			

2.1 – Energia Solar na Superfície Terrestre

2.1.1 Introdução

Porquê da necessidade do conhecimento do recurso solar

A previsão da produção de energia anual é crucial para o cálculo do custo da energia gerada, considerando as variabilidades estocásticas interanuais da radiação solar e repercute diretamente na viabilidade econômica do empreendimento. Os cálculos sazonais são importantes para traçar as estratégias operacionais do sistema energético, por exemplo, a clássica complementaridade da energia eólica e também da energia solar com a energia hidráulica da bacia do rio São Francisco. Em escala de tempo mais curto (horas), são importantes para subsidiar estratégias de sistemas de armazenamento.

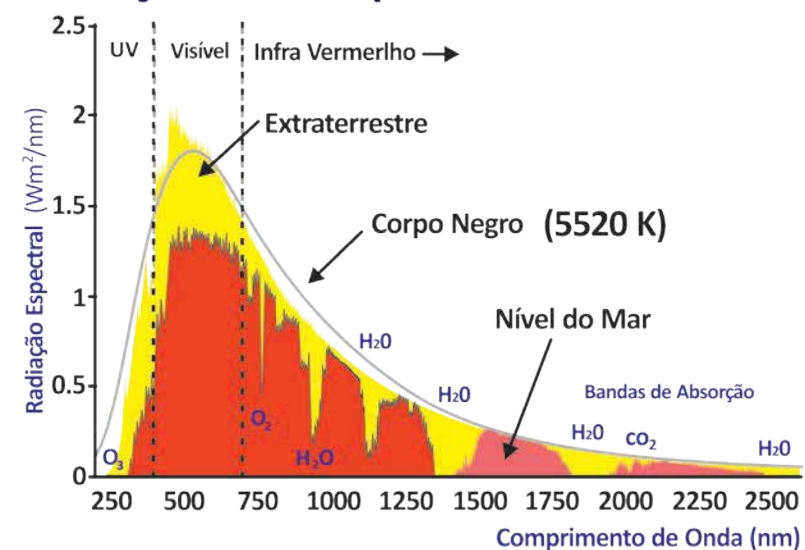
Após a construção da usina, uma das etapas do comissionamento e aceitação da usina requer testes operacionais (pelo menos de curta duração) para verificar se a usina está dentro das especificações e parâmetros do projeto e fazer a inferência da produção anual de energia. Durante a vida da usina, a radiação solar deverá ser monitorada continuamente e o desempenho deverá ser calculado simultaneamente para detectar possíveis quedas de desempenho por envelhecimento de componentes (perda de refletividade nos espelhos refletoras, de vácuo nos tubos coletores ou degradação da camada de proteção de células fotovoltaicas) ou necessidade de limpeza (lavagem da superfície de espelho, módulo fotovoltaico ou de tubos coletores).

Radiação solar extraterrestre

A radiação solar pode ser modelada com boa precisão considerando o Sol como corpo negro que emite uma temperatura de 5.860 K. Embora o Sol emita radiação em todo o espectro (de raios gama até ondas de rádio), cerca de 97% compreendem o comprimento de onda de 290 a 3000 nm, ou seja, na região ultravioleta (UV) e infra-vermelho próximo (IV_{prox}). O espectro solar (extraterrestre) no topo da atmosfera terrestre é muito bem definido dada a temperatura do corpo (Lei de Stefan-Boltzmann) e a distância Terra-Sol (atenuação seguindo a lei do inverso do quadrado da distância). Na Figura 2.1.1 pode ser visto o espectro solar extraterrestre (amarelo), o espectro solar modelado como corpo negro e o espectro solar na superfície terrestre (vermelho). Observa-se na região do UV e IV_{prox} a forte absorção do ozônio (O₃) na região do UV e absorções ressonantes nas regiões IV e IV_{prox} devido ao vapor d'água e ao dióxido de carbono.

Figura 2.1.1: Espectro solar extraterrestre e na superfície terrestre

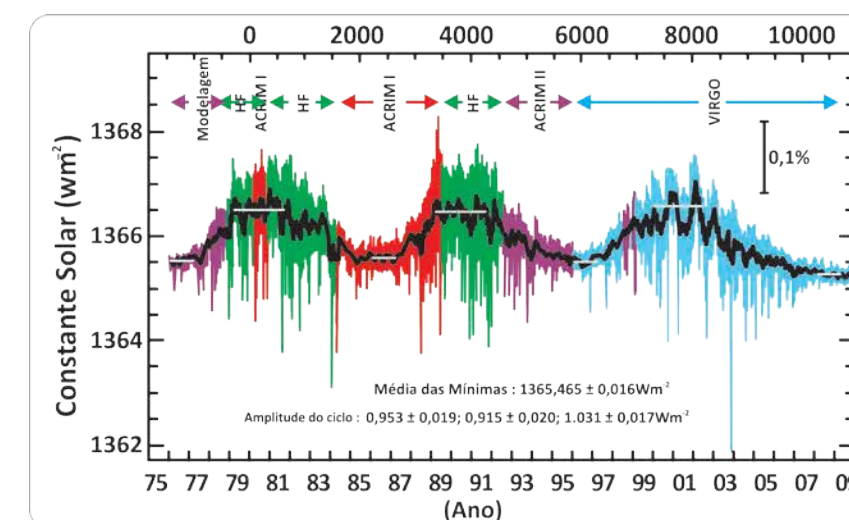
Radiação Solar Espectral



Constante solar

Medidas realizadas com satélites, Figura 2.1.2, mostram que a radiação solar extraterrestre é muito estável e tem o valor aproximado de 1366 W/m², a uma distância Sol-Terra igual a 1 UA (unidade astronômica), que é igual a 149.598.106 km. As variações decorrentes de manchas solares com periodicidade de 11 anos fazem esse valor oscilar de 0,1%, sendo 1367 W/m² em períodos com muitas manchas e 1365 W/m² em caso contrário. Em termos sazonais, a excentricidade da órbita terrestre provoca uma variação aproximada de 3%, resultando em 1.415 W/m² em 3 de janeiro e 1321 W/m² em 4 de julho.

Figura 2.1.2: Variabilidade da constante solar
Fonte: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/17jan_solcon/

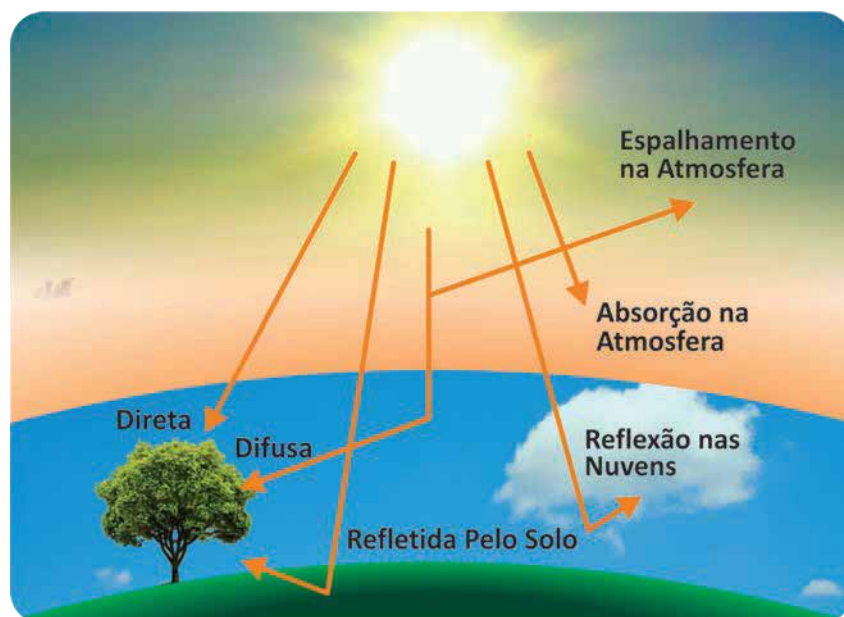


2.1 – Energia solar na superfície terrestre

Atenuação pela atmosfera, componentes na superfície terrestre

A interação da radiação solar extraterrestre com a atmosfera provoca reações de absorção e espalhamento de fótons com os constituintes da atmosfera. Assim, o espectro solar resultante na superfície terrestre dependerá da concentração, configuração espacial e temporal desses constituintes e será de natureza estocástica. Na Figura 2.1.3 estão mostradas esquematicamente as reações de espalhamento e absorção na atmosfera e, como resultado, a desagregação da radiação solar em componentes direta e difusa, entendendo como difusa a radiação solar que sofre um ou mais processos de espalhamento.

Figura 2.1.3: Componentes direta e difusa da radiação solar na superfície terrestre



2.1.2 Mensuração da radiação solar na superfície terrestre

Sensores e princípios das medições solarimétricas

Os instrumentos solarimétricos medem a potência incidente por unidade de superfície, integrada sobre os diversos comprimentos de onda. A radiação solar cobre toda a região do espectro visível, 0,4 a 0,7 m, uma parte do ultravioleta próximo de 0,3 a 0,4 m, e o infravermelho no intervalo de 0,7 a 5 m. As medições padrões são a radiação total e a componente difusa no plano horizontal e a radiação direta normal. 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. A vantagem principal da termopilha é a sua resposta uniforme em relação ao comprimento de onda. Por exemplo, o piranômetro Eppley, modelo 8-48, apresenta essa característica no intervalo de 300 a 3000 nm.

Os sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico, provocado por uma diferença de temperatura entre duas superfícies de cor preta e branca, foram também utilizados em instrumentos solarimétricos (actinógrafos tipo Robitzch-Fuess). A expansão do sensor movimentava uma pena que registra o valor instantâneo da radiação solar. São instrumentos analógicos e hoje só têm interesse histórico.

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 interrelação entre ambos os tipos de sensores.

Se o espectro solar tivesse sempre a mesma distribuição, bastaria uma calibração destes 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%.

Instrumentos solarimétricos

A radiação total I_h que atinge um plano horizontal localizado na superfície terrestre é a soma de duas componentes, a saber:

$$I_h = I_{bn} \cos(z) + I_d$$

em que:

I_{bn} é a radiação solar direta normal,

z é o ângulo formado pelos raios com o plano horizontal

I_d é a radiação solar difusa que incide sobre o plano horizontal

Quando o plano coletor 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 se destinam à medição ou estimativa da radiação total ou de uma das suas componentes ou, o que é mais comum, da sua integral ao longo de um dia. A medição do albedo, quando necessária, é realizada pelos mesmos instrumentos de medição de radiação total, sendo estes, porém, voltados para o solo.

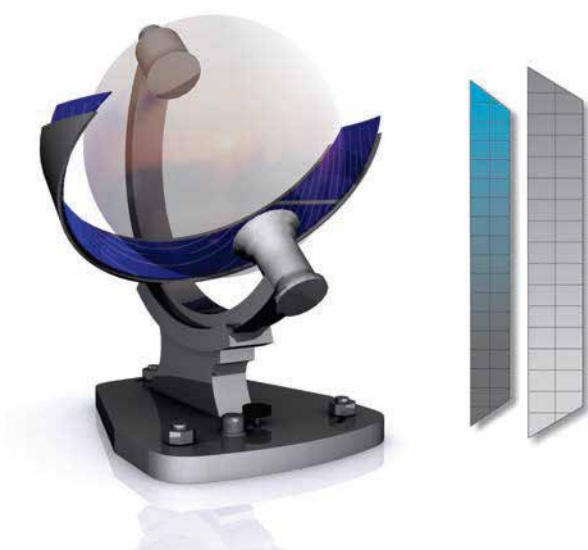
2.1 – Energia solar na superfície terrestre

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. São instrumentos ainda de muita importância na agricultura, além de existir um grande número deles instalados em todo o mundo, já há bastante tempo. 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/m². Entretanto, uma recomendação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) estabelece que o valor do limiar deve ser de 120 W/m² (WMO, 2003).

O instrumento recomendado para medição da insolação (número de horas de brilho do Sol) é o heliógrafo do tipo Campbell-Stokes, com as cartas especificadas pelo Serviço Meteorológico Francês, em conformidade com a OMM. Este equipamento consiste de uma esfera de vidro polida, que se comporta como uma lente convergente montada de maneira tal que, em seu foco, se coloca a carta de papel para registro diário. Na Figura 2.1.4 pode ser observado um heliógrafo Campbell-Stokes e as respectivas cartas de registro.

Figura 2.1.4: Heliógrafo Campbell-Stokes e cartas de registro



Actinógrafo

Este instrumento, também conhecido como piranógrafo, foi muito utilizado devido ao seu baixo custo. O actinógrafo é utilizado para medição da radiação solar total 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. Um actinógrafo bimetálico tipo Robitzsch-Fuess é mostrado a seguir, na Figura 2.1.5. Os actinógrafos só devem ser utilizados para medição de totais diários de radiação, sendo para isso necessária a planimetria da carta com o registro. As características do instrumento, incluindo a própria planimetria do registro, levam a erros na faixa 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. Entretanto, estudos recentes mostram a possibilidade de melhorar consideravelmente a precisão dos resultados, reduzindo o erro para cerca de 4% (ESTEVES, 1989). Estes instrumentos têm boa linearidade e boa resposta espectral, mas não há boa compensação de temperatura e o tempo de resposta é lento. Seu custo estimado é da ordem de US\$ 500,00; porém, é necessária a aquisição de um planímetro para totalização de registro obtido na carta.

Figura 2.1.5: Actinógrafo bimetálico do tipo Robitzsch-Fuess



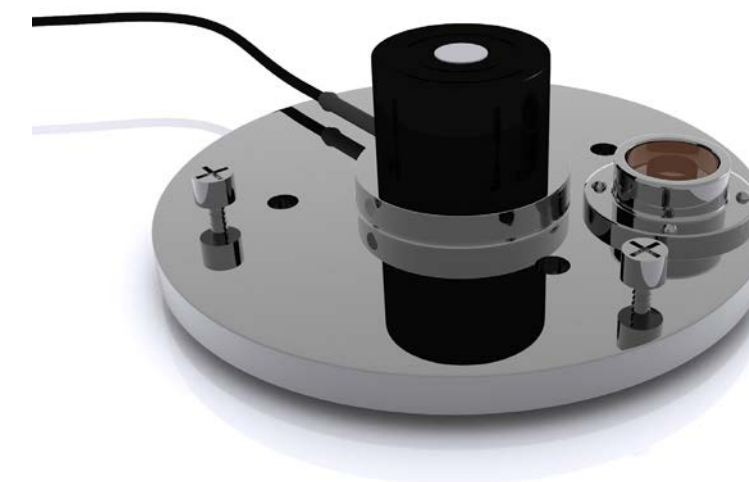
Piranômetro fotovoltaico

O custo dos piranômetros de primeira e segunda classe, que serão descritos a seguir, tem promovido o interesse pelo desenvolvimento e utilização de instrumentos com sensores fotovoltaicos, de custos mais reduzidos. Trabalhos publicados mostram as possibilidades destes instrumentos, seja para usos isolados ou como integrantes de uma rede solarimétrica (MICHALSKY, 1987 e GALLEGOS, 1987). 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. Outras questões, como a refletividade das células e dependência da resposta com a temperatura, já possuem soluções plenamente satisfatórias (ATIENZA, 1993). 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 s.

Tal sensor, mostrado na Figura 2.1.6, é bastante estável, com uma degradação de sensibilidade menor que 2% ao ano. Os custos destes instrumentos estão na faixa de US\$ 130-300 (MICHALSKY, 1987 e GALLEGOS, 1987).

Figura 2.1.6: Sensor piranométrico fotovoltaico



2.1 – Energia solar na superfície terrestre

Piranômetro termoeletrico

O elemento sensível destes solarímetros é, em essência, uma pilha termoeletrica, constituída por pares termoeletricos (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 termoeletricos existem essencialmente dois tipos em uso, sendo eles (ATIENZA, 1993): a) Piranômetros com o detector pintado de branco e preto, 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 e b) Piranômetros com a superfície receptora totalmente enegrecida 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 2.1.7: Piranômetro do tipo Black & White Eppley 8-48



Os piranômetros mais difundidos dentro do tipo Black & White são: Eppley 8-48 (Estados Unidos), mostrado na Figura 2.1.7; o Cimel CE-180 (França); o Star ou Shenk (Áustria) e o M-80M (Rússia). Destes, o Eppley 8-48 e o CE-180 possuem compensação em temperatura. Entre os piranômetros com superfície receptora totalmente preta os mais usados são o Eppley PSP (Estados Unidos), visto na Figura 2.1.8, e o Kipp & Zonen CM 5, CM 10, CM 21 e CM 22 (Holanda). O CM 22 é um instrumento de grande precisão e é considerado um padrão secundário; o Eppley PSP e o CM 21 são instrumentos de precisão e considerado de primeira classe.

Os piranômetros de primeira classe têm boa precisão, na faixa de 2 a 5%, dependendo do tipo utilizado. Tais instrumentos podem ser usados para medir radiação em escala diária, horária ou até menor, o que vai depender mais da programação do equipamento de aquisição de dados associado (LYRA, FRAIDENRAICH e TIBA, 1993).

Figura 2.1.8: Piranômetro de precisão de primeira classe



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. Em geral, se utiliza uma montagem equatorial com movimento em torno de um único eixo, que é ajustado periodicamente para acompanhar a mudança do ângulo de declinação do Sol. O fato do pireliômetro ter um ângulo de aceitação que permite medir a radiação circunsolar pode levar a certos equívocos com relação à intensidade da radiação direta que incide e é aceita por coletores concentradores, cujo ângulo de aceitação habitualmente é menor que o ângulo de aceitação do instrumento. Esta diferença requer e pode ser objeto de correção.

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.

Os pireliômetros de termopares são os equipamentos normalmente utilizados para medições em campo da radiação solar direta normal. Neste tipo de pireliômetros, o princípio operacional é semelhante ao dos piranômetros termoeletricos. Os mais difundidos são o Eppley N.I.P. (*Normal Incidence Pyrheliometer*: Pireliômetro de Incidência Normal) e o Kipp & Zonen, respectivamente fabricados nos Estados Unidos e na Holanda. Um pireliômetro Eppley N.I.P. pode ser visto na Figura 2.1.9.

Figura 2.1.9: Pireliômetro de incidência normal (NIP) Eppley



2.1 – Energia solar na superfície terrestre

Medição da radiação solar difusa

As medições de radiação difusa são realizadas com piranômetros ou mesmo actinógrafos cujos sensores se encontram 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 semiaro, colocada em paralelo com a eclíptica. Desta forma, o sensor estará sombreado durante todo o dia conforme a Figura 2.1.10. Se, simultaneamente mediante o uso de outro piranômetro for medida a radiação global no plano horizontal, será possível mediante uma simples subtração estimar a radiação solar direta no plano horizontal e posteriormente a sua conversão para incidência normal.

Fig. 2.1.10: Piranômetro com banda de sombra para medição de radiação difusa



2.1.3 Estimação da radiação solar na superfície terrestre

A escassez de informações precisas sobre a radiação solar disponível em uma determinada localidade é um dos fatores limitativos no desenvolvimento de áreas como agropecuária, meteorologia, engenharia florestal, recursos hídricos e particularmente para a área da conversão da energia solar. No Brasil Tiba e outros (TIBA *et al*, 2001), fizeram um levantamento das informações solarimétricas terrestres existentes, constatando a grande escassez dessas informações (principalmente na escala diária) para a maioria das localidades brasileiras, provavelmente explicada tanto pelos altos custos dos equipamentos utilizados na obtenção desses dados como também pela grande extensão territorial. A mesma situação ocorre em outras localidades do mundo e, mesmo em países dotados de boas redes solarimétricas, a complementação das informações é feita mediante modelagens. Os principais tipos de modelagens são: correlações ou modelagem estatísticas estacionárias ou seqüenciais e estimação via imagens de satélites ou mediante o uso de redes neurais artificiais.

A correlação estatística experimental entre a radiação solar total e outras variáveis medidas rotineiramente em estações meteorológicas convencionais permite estabelecer modelos polinomiais ou com múltiplas variáveis (ANGSTRÖM, 1924. AKINOGLU e ECEVIT, 1990. YANG; HUANG e TAMAI, 2001). A mais conhecida e utilizada é um modelo linear denominado correlação de Angström. A modelagem estatística seqüencial – geração de séries temporais sintéticas da radiação solar diária, que reproduzam as principais características estatísticas das séries históricas, viabilizando a simulação e a avaliação de desempenho dos sistemas solares a longo prazo – é baseada no conceito da cadeia de Markov. Estes modelos podem ser divididos em duas subclasses: os modelos em que os choques aleatórios, parte não-controlável do modelo normalmente chamada de ruído branco, que fazem evoluir o sistema de um estado ao seguinte são introduzidos explicitamente na equação que calcula o estado a cada instante, denominados modelos Autorregressivos de Média Móvel (ARMA) e aqueles em que esses choques são introduzidos implicitamente, via um algoritmo que descreve a evolução de um estado a outro, de acordo com certas probabilidades de transição. Este último método é conhecido como modelo baseado na Matriz de Transição de Markov – MTM (AGUIAR; COLLARES-PEREIRA e CONDE, 1988). Essas metodologias requerem como dados de entrada o valor da radiação solar média mensal e somente produzem séries temporais univariadas.

O sinal registrado por um radiômetro a bordo de uma satélite é decorrente do fluxo de radiação solar refletido pela atmosfera

terrestre ao espaço. O princípio da conservação de energia aplicado no sistema Terra-atmosfera resulta que a radiação solar incidente no topo da atmosfera é igual à soma da radiação refletida (medida pelo satélite), absorvida pela atmosfera e pela superfície da Terra. A radiação solar na superfície da Terra está relacionada com a radiação absorvida de forma direta e pode ser facilmente calculada dado o albedo (refletividade da superfície terrestre). Porém, devido à dificuldade de estimar a radiação solar absorvida pela atmosfera e o albedo, dois métodos foram desenvolvidos para contornar esse problema: o estatístico e o físico. O método estatístico trata-se da medição experimental simultânea do radiômetro do satélite e a radiação solar total local na superfície terrestre (TARPLEY, 1979). O método físico é baseado na modelagem física dos processos radiativos decorrentes da passagem da luz solar na atmosfera (GAUTIER; DIAK e MASSE, 1980. STUHLMANN; RIELAND e RASCHKE, 1990. JANJAI; PANKAEW e LAKSANABOONSONG, 2009).

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) têm sido aceitas como uma tecnologia alternativa para a análise de problemas de engenharia de grande complexidade e imprecisamente definidos. A radiação solar pode ser considerada um problema clássico a ser abordado por RNAs pelas seguintes considerações: a) Robustez, devido a sua capacidade de manejar bem as seqüências temporais de radiação solar com falhas (é frequente a ocorrência de falhas na seqüência temporal); b) O sistema climático no qual está inserida a radiação solar é complexo, imprecisamente definido e tem muitos parâmetros físicos interrelacionados; c) Existe uma quantidade muito grande de informações meteorológicas em nível espacial e temporal rotineiramente medidas em estações meteorológicas. Os estudos referentes à aplicação da metodologia das RNAs para geração das séries sintéticas da radiação solar estão agrupados de acordo com duas abordagens distintas: trabalhos que realizam a interpolação espacial mediante a utilização de dados referentes a várias localidades situadas dentro de uma determinada região e uma segunda abordagem em que estão agrupados os trabalhos que realizam a interpolação temporal baseada no conhecimento da correlação existente entre a radiação solar e outras variáveis meteorológicas, medidas simultaneamente (SIQUEIRA; TIBA e FRAIDENRAICH, 2010. MELLIT; BENGHANEM; HADJ; GUESSOUM, 2005. TYMVIOS; JACOVIDES; MICHAELIDES e SCOUTELI, 2005). A grande vantagem dessa metodologia é a sua capacidade de produzir facilmente séries temporais multivariadas.

2.1 – Energia solar na superfície terrestre

2.1.4 Informações solarimétricas atualmente existentes no Brasil

As informações solarimétricas mais antigas do Brasil referem-se a dados sinópticos de horas de brilho do Sol de uma extensa rede de medidas meteorológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Historicamente as medições de horas de brilho solar foram realizadas para fins agrícolas e não energéticos. Existe um banco de dados digital com 291 estações meteorológicas convencionais que cobre o período de 1961 a 2010. Na segunda metade da década de 1970 o INMET instalou 21 estações de medições piranométricas que funcionaram aproximadamente 10 anos (1978-1990). Cabe ressaltar também esforços regionais e locais de inúmeros pesquisadores que fizeram medição das horas de brilho solar e radiação solar com actinógrafos (TIBA *et al*, 2001).

Na segunda metade da década de 1980 a CEMIG estabeleceu uma rede piranométrica de 15 estações e mediu aproximadamente durante quatro anos.

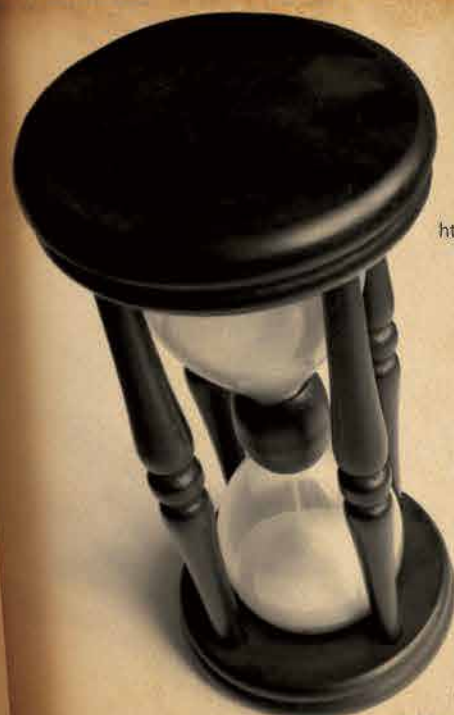
Em 2001 Tiba e outros (TIBA *et al*, 2001) lançaram o *Atlas Solarimétrico do Brasil* com dados terrestres. Tratou-se da elaboração de um atlas solarimétrico preliminar para o Brasil, a partir do levantamento de dados solarimétricos já existentes, não sendo previsto nenhum tratamento adicional de dados actinográficos ou heliográficos. O Atlas é uma síntese dos diversos levantamentos solarimétricos locais, realizados anteriormente por diferentes pesquisadores. Este conjunto de dados exibiu uma fragmentação

espacial, temporal e problemas de padronização. Neste atlas os dados foram analisados, harmonizados e organizados em um banco de dados de informações solarimétricas. Foram elaborados 12 mapas mensais e um anual das horas de brilho solar e radiação solar global, além de um banco de dados de mais de 570 locais no Brasil e países limítrofes.

Em 1998 foi lançado o *Atlas de Irradiação Solar do Brasil*, de Colle e Pereira (COLLE e PEREIRA, 1998) com modelagem da radiação solar mensal total via imagens de satélite. O referido atlas é uma consolidação da radiação global, computadas com o algoritmo do modelo físico BRAZILSR, com base em dados de satélite geostacionário.

2.2 – Histórico

2.2.1 Linha do tempo da tecnologia solar fotovoltaica e térmica



1767

Horace de Saussure construiu o primeiro coletor solar.
<http://solarcooking.org/saussure.htm>



1816

Robert Stirling constrói uma máquina térmica cujos modelos evoluídos são aplicados hoje em dia nos discos parabólicos para conversão da energia térmica em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica.

1839

Edmond Becquerel descobre o efeito fotovoltaico enquanto testava uma célula eletrolítica composta de dois eletrodos metálicos posicionados numa solução condutora de eletricidade – a geração de eletricidade aumentava quando o experimento era exposto à luz solar.



1860

August Mouchet propõe um motor a vapor com energia solar. Abel Piñre, seu assistente, constrói o primeiro motor térmico solar nas duas décadas seguintes, que foi o predecessor dos modernos discos parabólicos.

1876

William Grylls Adams e Richard Evans Day descobrem que o selênio produz eletricidade quando exposto à luz.



1883

Charles Fritts desenvolve uma célula solar de selênio, envolvendo-a com uma fina camada de ouro. A fotocélula tem menos de 1% de eficiência.

1891

Clarence Kemp patenteou o primeiro coletor solar para aquecimento de água.
http://californiasolarcenter.org/history_solarthermal.html (California Solar Center).



1904

Wilhem Hallwachs descobre que uma combinação de cobre e óxido de cobre é fotossensível.

1905

Albert Einstein publica paper sobre o efeito fotoelétrico.



1908

William J. Bailey, do Carnegie Steel Company, inventa um coletor solar com tubos de cobre em espiral e caixa isolante, conceitualmente o projeto usado atualmente.

1912

Frank Shuman constrói no Egito um sistema solar cilíndrico parabólico para irrigação que poderia gerar mais que 55 hp.



1918

Jan Czochralski desenvolve um método para crescimento de silício mono-cristalino.

2.1 – Energia solar na superfície terrestre

O modelo BRAZILSR foi baseado no modelo físico IGMK (Alemanha) transferido ao LABSOLAR (UFSC) no contexto de um acordo de cooperação. O algoritmo mencionado utilizou os dados do satélite GOES. Os dados calculados foram validados com dados coletados pela rede de estações do INMET (1985-1986) do LABSOLAR e ABRACOS-INPE (1995-98). Mais recentemente, em 2007, dentro do contexto do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment: Avaliação de Recursos Energéticos Solar e Eólico*), o atlas citado foi atualizado e ampliado. O projeto SWERA foi executado no Brasil por meio de cooperação entre diversas instituições do setor energético e institutos de pesquisa nacionais e internacionais (LABSOLAR/UFSC, CEPEL, NREL, CBEE, ELETROBRÁS, ONS etc.) sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de

Previsão do Tempo e Estudos Climáticos ligado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE) e financiamento do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF).

Este esforço coletivo para melhorar a base de dados solarimétricos, cujo renascimento ocorre na segunda metade da década de 1990, também provoca o ressurgimento de redes de medições de qualidade. A rede de medição chamada Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA), coordenada pelo CPTEC, começou a operar em 2003 e consta de 12 estações terrestres espalhadas pelo Brasil: 1 no Norte, 4 no Nordeste, 4 no Centro Oeste, 1 no Sudeste e 2 no Sul. As estações medem as seguintes variáveis

solarimétricas em escala de minuto: radiação solar global, difusa e direta normal. Atualmente a rede SONDA continua operacional e produzindo informações de qualidade. O Grupo FAE-DEN-UFPE em colaboração com UFAL instalou uma rede de mediação de radiação solar global, com 9 estações no estado de Alagoas e 3 em Pernambuco. Estas estações de alta qualidade, cuja calibração dos sensores é anual, são operacionais desde 2008. Em julho de 2011 completou uma série histórica de 4 anos, em escala de minutos.

A CEMIG instalou em 1998 uma rede de pironômetros composta por equipamentos distribuídos no Estado. O INMET, no ano de 2008, começou a operar estações automáticas com medições de radiação solar global em Minas Gerais.

2.2 – Histórico

1954

1954 Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson desenvolvem no Lab. da Bell Telephone a primeira célula fotovoltaica de silício. A célula tem uma eficiência de 4% e mais tarde atinge 11%.
http://www.californiasolarcenter.org/history_pv.html



1958

1958 T. Mandelkorn, U.S. Signal Corps Laboratories, cria uma célula de silício resistente à radiação extraterrestre. O satélite Vanguard I é lançado e trata-se do primeiro satélite suprido por energia solar, um arranjo pequeno de 100 cm² e 0,1 W.

1969

Construído o primeiro forno solar denominado Odeillo, na França.



1970

Elliot Berman, da ajuda da Exxon Corporation, projeta uma célula solar com uma redução importante de custo, de US\$100/W para US\$20/W. A energia solar fotovoltaica para aplicações terrestres começa a se difundir para nichos industriais em locais remotos.

1976

David Carlson e Christopher Wronski, da RCA Laboratories, criam a primeira célula fotovoltaica de silício amorfo, com eficiência de 1,1%.

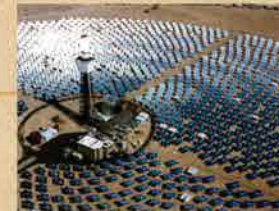


1982

Um projeto de demonstração de torre solar de 10 MW, denominado Solar One, entra em operação e demonstra a viabilidade técnica do conceito.

1985

A Universidade de New South Wales, Austrália, cria uma célula FV de Si com eficiência de 20%.



1983

A usina solar SEGS I (Solar Electric Generation System) de 13,8 MW foi instalada. O sistema concentrador cilíndrico-parabólico produz vapor, que é fornecido a um sistema Rankine convencional. Seguem nesta década as construções de SEGS II a IX, todos na Califórnia, totalizando 450 MW. Até hoje são operacionais em bases comerciais.

1996

O Departamento de Energia dos Estados Unidos, juntamente com um consórcio de empresas, começa a operar o Solar Two, uma versão aperfeiçoada do Solar One e que tem demonstrado a tecnologia de armazenamento com sal fundido.



2000

Na estação espacial internacional, os astronautas começam a instalar o que será o maior arranjo de painéis fotovoltaicos no espaço. Cada asa do arranjo consiste de 32.800 fotocélulas, com uma potência de 32,8 MW.

2001 - 2010

Fotovoltaico - Redução nos custos de fabricação de células FV, diversificações na tecnologia de células (materiais) e de fabricantes (quase todos os continentes). Introdução de conceitos emergentes como alta concentração, células orgânicas e outros na tecnologia de células (materiais) e de fabricantes (quase todos os continentes).

Térmico - Inserção massiva de coletores plano para aquecimento de água doméstico. Redução nos custos de implantação de usinas solares com concentração para geração de eletricidade, diversificação de fabricantes e países com instalações. Surgimento de conceitos emergentes (concentradores do tipo Fresnel).

Figura 2.2.1: Linha do tempo da tecnologia solar fotovoltaica e térmica / Fonte: (Adaptado de "History of Solar Energy, DOE, www1.eere.energy.gov")

2.3 – Tecnologia

2.3.1 Tecnologia solar fotovoltaica

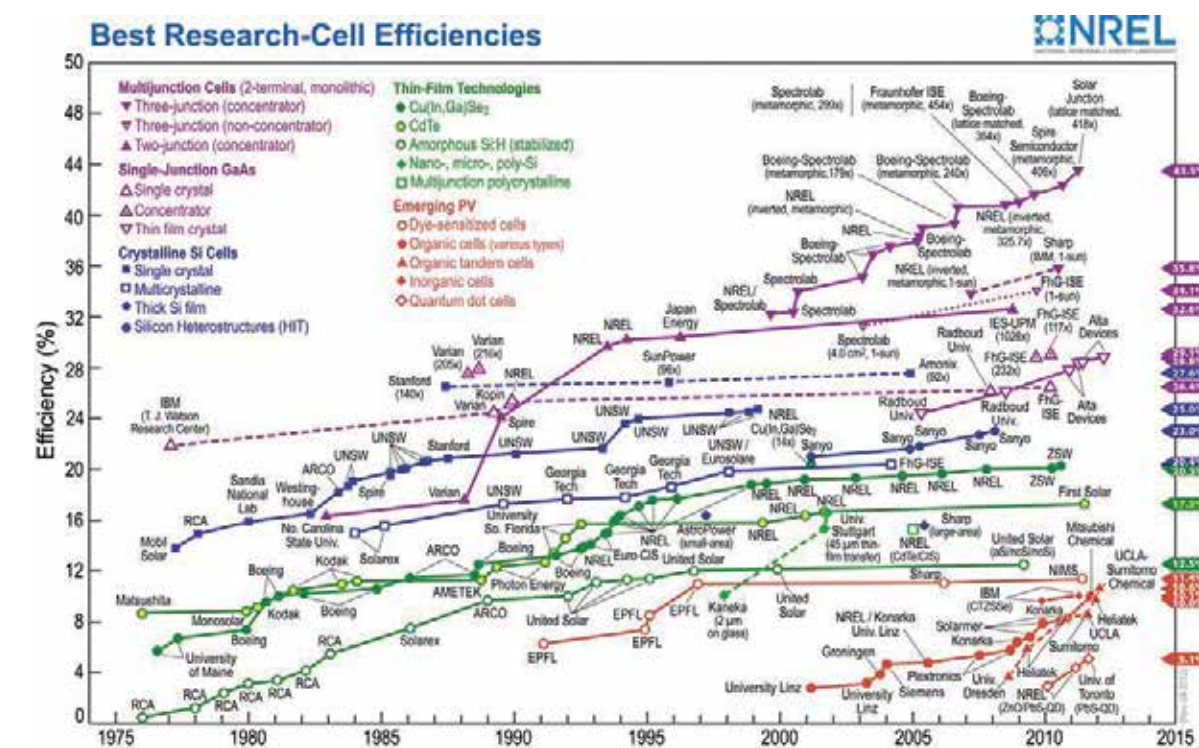
Existem muitas formas de classificação das células fotovoltaicas: quanto a sua espessura, aos materiais utilizados e ao ambiente de uso (uso espacial ou terrestre). As principais células fotovoltaicas classificadas quanto a espessura e materiais utilizados são mostradas na Figura 2.3.1. A idéia básica do desenvolvimento de células solares de filmes finos é de que, com a utilização menor de material semiconductor, elas seriam mais baratas. Normalmente esse fato é verdadeiro; porém, elas são menos eficientes, o que torna o custo unitário da energia elétrica gerada mais elevado, ou na melhor das hipóteses, próximo do custo das fotocélulas de silício cristalino.

Figura 2.3.1: Classificação das principais células fotovoltaicas
Fonte: Chigueru Tiba



As condições ambientais do espaço extraterrestre requerem mais exigências na construção das células fotovoltaicas, entre outras, pelos seguintes fatores: radiação solar maior (espectro AM0), alta temperatura operacional (o calor produzido é dissipado no vácuo somente por meio radiativo), ciclagem de temperatura, partículas carregadas altamente energéticas e raios ultravioleta. Tais requisitos tornam o projeto e a técnica de fabricação diferentes daqueles das células terrestres, o que, por sua vez, encarece as células solares de uso espacial. Mesmo assim, historicamente as células solares foram usadas primeiro na aplicação espacial, porque a sua autonomia em relação ao “combustível” a tornavam a opção de melhor custo-benefício.

Figura 2.3.2: Evolução tecnológica das diversas tecnologias segundo a eficiência
Fonte: National Renewable Energy Laboratories



metamorphic: metamórfico
lattice matched: entrelaçado
inverted, metamorphic: invertido, metamórfico
small area: área pequena
large area: área grande

1-sun: a um sol
4 μm thin-film transfer: transferência em película fina de 4 μm
2 μm on glass: 2 μm em vidro
aSi/ncSi/ncSi: silício amorfo/silício nanocristalino/silício nanocristalino

ZnO/PbS-QD: Óxido de zinco/Sulfeto de chumbo-Pontos Quânticos
IMM: multijunção metamórfico invertido
CTZSSe: Cu₂ZnSn(S,Se)₄ (kesterite)
CdTe/CIS: telureto de cádmio/Cobre Índio Selênio

2.3.2 Estado da arte das eficiências

A Figura 2.3.2 mostra a evolução tecnológica das diversas tecnologias fotovoltaicas em termos de eficiência. Também são mostradas algumas tecnologias emergentes.

Melhores Eficiências de Células de Pesquisa

Células de Multijunção (terminal duplo, monolítico)
Junção tripla (concentrador)
Junção tripla (não concentrador)
Junção dupla (concentrador)

GaAs (arsenieto de gálio) de Junção Simples
Cristal simples
Concentrador
Cristal de película fina

Células de Silício Cristalino
Cristal simples
Multicristalina
Película fina de silício
Heteroestruturas de silício

Tecnologias de Película Fina
Cu(In,Ga)Se₂ (seleneto de cobre-índio-gálio)
CdTe (telureto de cádmio)
Si:H (silício hidrogenado) amorfo (estabilizado)
Nano-, micro-, polissilício
Policristalino de multijunção

Fotovoltaicas Emergentes
Células sensibilizadas por corante
Células orgânicas (vários tipos)
Células orgânicas em tandem
Células inorgânicas
Células de pontos quânticos

2.3 – Tecnologia

A eficiência teórica de uma célula solar de junção simples é da ordem de 31%. As células de junções múltiplas aproveitam melhor o espectro solar sobrepondo duas ou mais junções com largura de banda diferentes, ligadas em série. Um célula de duas junções combina os semicondutores, GaAs e GaSb, enquanto uma célula de três junções resulta na combinação InGaP/InGaAs/Ge. Normalmente essas células de múltiplas junções são muito caras e assim são projetadas para utilização em alta concentração da luz solar, mediante o uso de sistemas óticos adequados (guias de luz). O resultado líquido que se espera é que o custo unitário da energia elétrica seja competitivo com as outras alternativas de geração fotovoltaica.

Tabela 2.3.1: Quadro atual das eficiências dos módulos fotovoltaicos comerciais
Fonte: EPIA 2010. Photon international, March 2010, EPIA analysis. Efficiency based on Standard Test conditions

EFICIÊNCIA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COMERCIAIS								
Tecnologia	Filme Fino					C-Si		CPV
	a-Si	CdTe	Cl(G)S	a-Si/ μ c-Si	Eletro- química	Mono	Poli	Multi- Junção
Célula						16-22%	14-18%	30-38%
Módulo	4-8%	10-11%	7-12%	7-9%	2-4%	13-19%	11-15%	~ 25%
Área/kWp	~ 15 m ²	~ 10 m ²	~ 10 m ²	~ 12 m ²	~ 15 m ²	~ 7 m ²	~ 8 m ²	

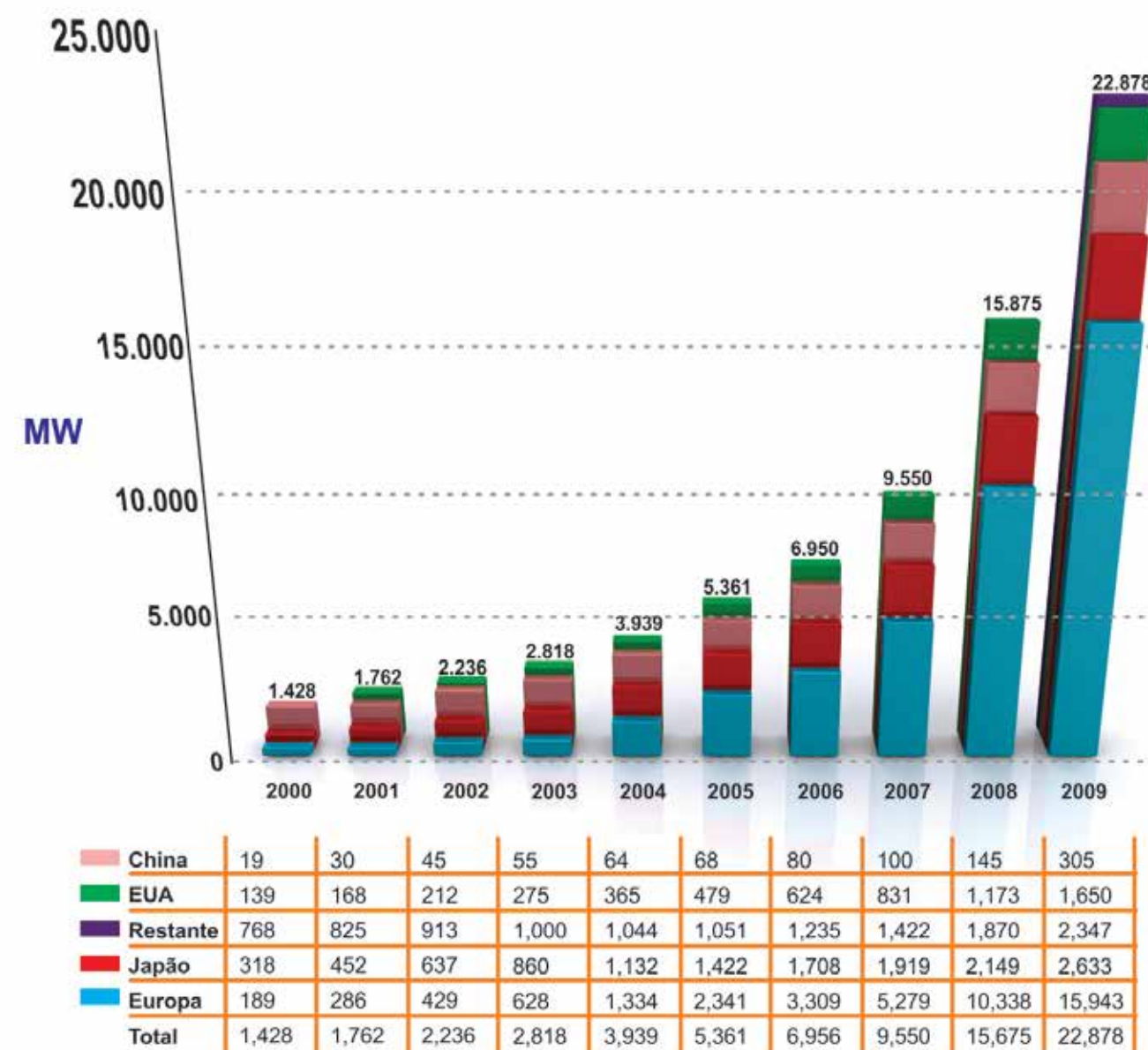
As eficiências dos módulos comerciais são menores que das células fotovoltaicas que são medidas em laboratórios e não em condições operacionais. A Tabela 2.3.1 resume o quadro atual das eficiências dos módulos fotovoltaicos comerciais.

Quantidade Acumulada Instalada por Tecnologia, Tecnologia Dominante, Custos e Curva de Aprendizado

De 2004 a 2009, a indústria fotovoltaica cresceu em média 40% ao ano e o perfil da aplicação mudou radicalmente de 39% de conexão à rede elétrica (residencial e prédios comerciais individuais e empresas de energia elétrica) em 2004 para 95% em 2009 (EPIA, 2001).

O Gráfico 2.3.1 mostra a quantidade acumulada de sistemas fotovoltaicos instalados até 2009 no mundo e a distribuição pelos países.

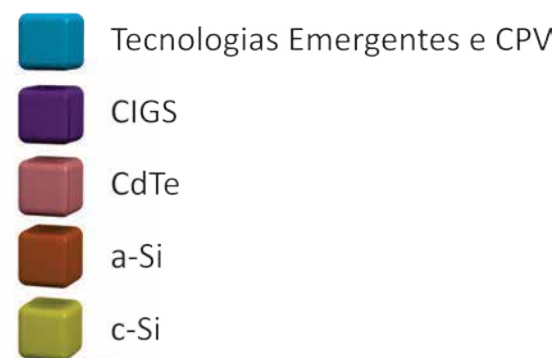
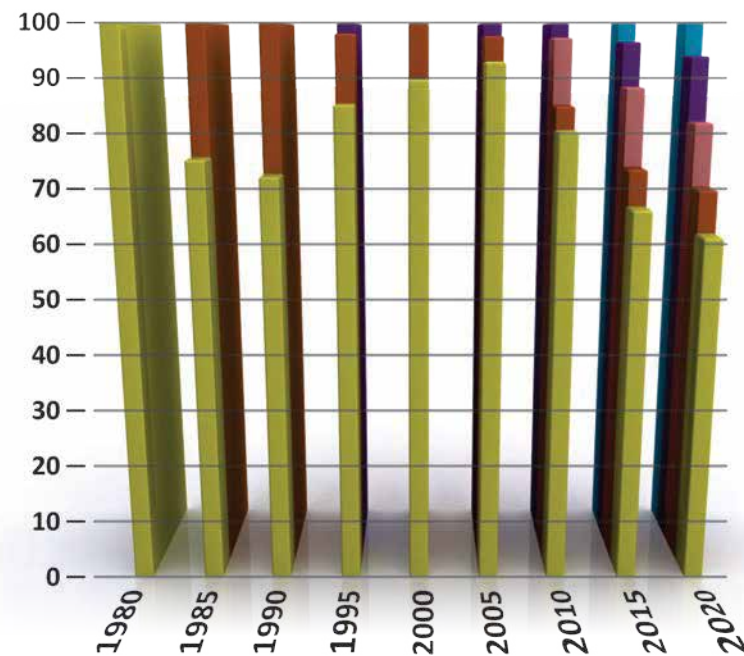
Gráfico 2.3.1: Quantidade acumulada de sistemas fotovoltaicos instalados até 2009 no mundo e a distribuição pelos países
Fonte: Global Market Outlook for Photovoltaics in 2014, maio 2010, EPIA



2.3 – Tecnologia

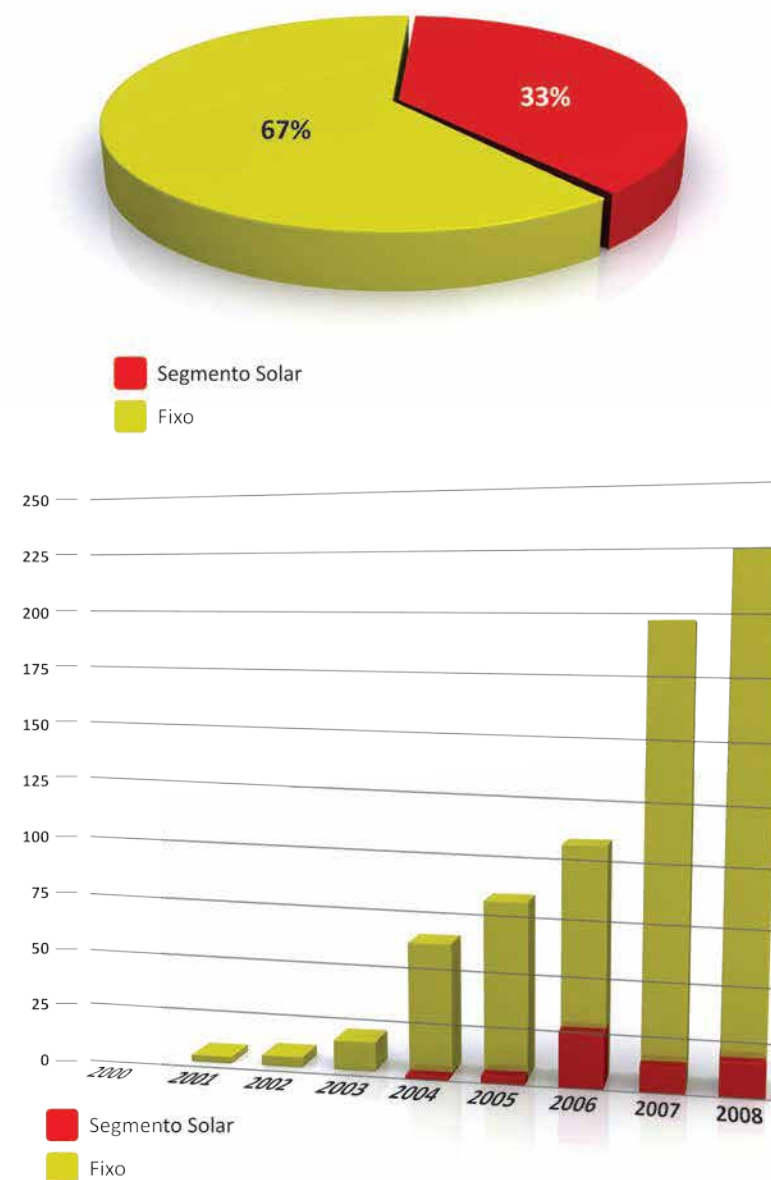
A tecnologia dominante continua sendo o Si (mono e poli), com uma participação de 80% (<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>, abr./2011), conforme o Gráfico 2.3.2. Os preços dos módulos estão na faixa de US\$ 3.0–4.5/Wp e o custo do sistema instalado na faixa de US\$ 5–7/Wp, conforme a tecnologia e o tamanho.

Gráfico 2.3.2: Tecnologia solar fotovoltaica predominante



Os sistemas fixos continuam a ser dominantes nos sistemas fotovoltaicos instalados, embora com seguimento solar tenham sofrido um notável avanço: de 10% em 2004 para 33% em dezembro de 2008, conforme o Gráfico 2.3.3.

Gráfico 2.3.3: Evolução do Uso de Sistemas Fixos e com Seguimento Solar em Sistemas Fotovoltaicos



O tamanho dos parques solares fotovoltaicos de grande porte instalados no mundo está mudando rapidamente. Em outubro de 2009 os oito maiores empreendimentos tinham uma potência entre 40 a 97 MW: Sarnia (Canadá, 97 MW), Montalto di Castro PV (Itália, 84,2 MW), Finsterwalde I,II,III (Alemanha, 80,7 MW),

Figura 2.3.3: Parques de Sarnia (a), Montalto di Castro (b)
Fonte: Enbridge Inc. e Quest point solar solutions



2.3 – Tecnologia

Rovigo (Itália, 70 MW), Olmedilla de Alarcón (Espanha, 60MW), Straßkirchen (Alemanha, 54 MW), Lieberose (Alemanha, 50 MW) e Puertollano (Espanha, 50 MW) (<http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>, abr./2011). A Figura 2.3.3 mostra alguns destes parques fotovoltaicos.

Cont. Figura 2.3.3: Rovigo (c) e Olmedilla (d)
Fonte: SunEdison e Explow



O preço atual da energia elétrica convencional para uma região de alta radiação solar dos Estados Unidos (Phoenix, 2096 kWh/ano ou 5,74 kWh/dia) é mostrado na Tabela 2.3.2. Também são apresentados os custos da geração fotovoltaica e a possível paridade com a rede em 2015 (ENERGYSOURCES, 2010). Resultados semelhantes em relação à paridade com a rede foram encontrados por Ruther e Zilles (RUTHER e ZILLES, 2011) para o Brasil.

2.3.3 Tecnologia solar térmica

Embora a conversão térmica da energia solar tenha sido aplicada historicamente de inúmeras formas, como por exemplo, de forma passiva em secagem de modo geral e aquecimento residencial, neste trabalho serão enfocados duas aplicações de grande repercussão econômica imediatas para o Brasil: o aquecimento de água para fins residenciais e a produção de eletricidade. Essas tecnologias, além de serem plenamente ou quase competitivas, têm um enorme potencial de mercado.

Setor	Preço atual da energia elétrica no mercado (10-2US\$/kWh)	Eficiência Típica (%)	Custo da Geração fotovoltaica (10-2US\$/kWh)	
			Atual	2015
Gerador/ Distribuidor	4,0-7,6	30 (CPV)	>30 (CPV)*	8-10
		15 (Si-c)	13-22	5-7
Comercial	5,4-15,0	15 (Si)	16-22	6-8
Residencial	5,8-16,7	15 (Si)	23-32	8-10

Tabela 2.3.2: Preço da energia e previsão da evolução dos custos da energia fotovoltaica
*CPV: fotovoltaico de concentração

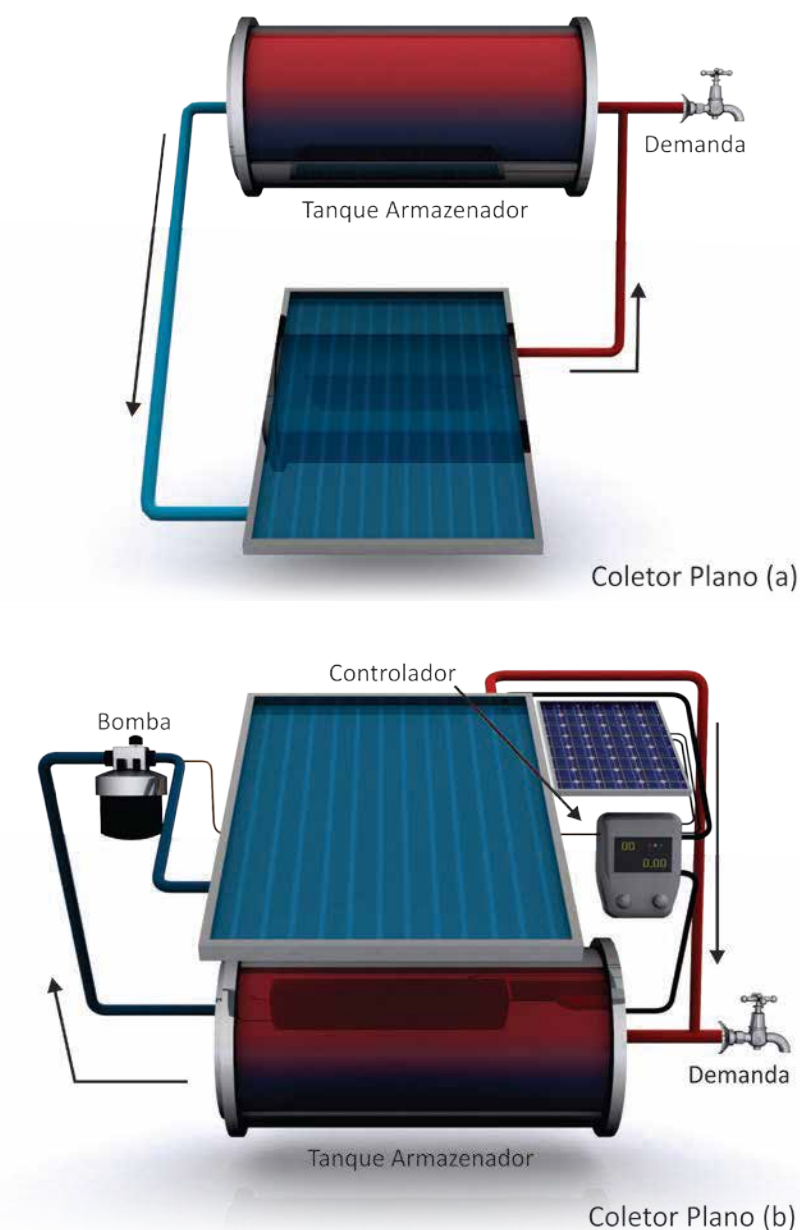
2.3.4 Coletor solar plano, tecnologia e mercado no mundo e no Brasil

O sistema solar para aquecimento de água consiste basicamente de um absorvedor da luz solar, uma caixa ou envelopamento para proteção e mitigação de perdas de calor e um armazenador de calor para deslocar a carga térmica entre a coleta e uso ou para dias de baixo nível de radiação solar.

O absorvedor consiste de uma placa absorvedora recoberta ou não com material seletivo e um sistema para transferência de calor da placa para o fluido térmico.

O conjunto descrito acima, juntamente com o envelopamento, é conhecido como coletor solar. O fluido térmico, por sua vez, normalmente supre um armazenador térmico. Existem dois tipos básicos de sistemas de aquecimento de água residencial: o sistema termo-sifão de circulação natural e o de circulação forçada, conforme pode ser visto na Figura 2.3.4.

Figura 2.3.4: Sistema Solar para Aquecimento de Água



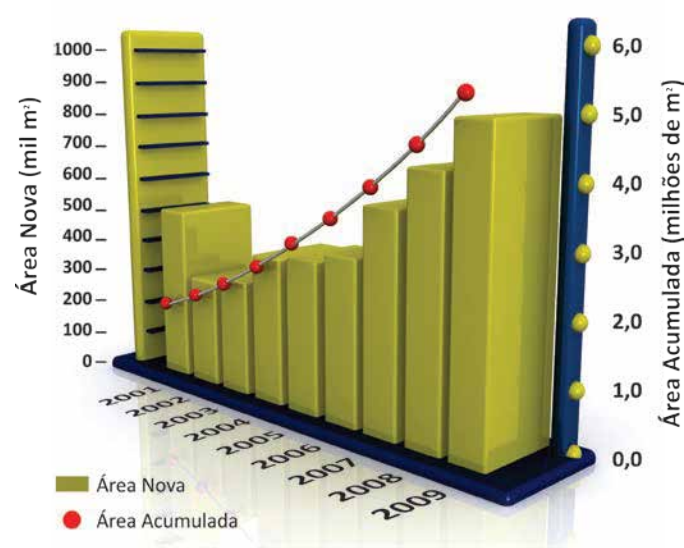
2.3 – Tecnologia

A tecnologia solar para aquecimento de água está consolidada técnica e economicamente e sua inserção no mercado já é ampla em escala mundial e nacional, conforme Tabela 2.3.3 (RENEWABLES, 2010). A instalação acumulada de 150 GWt corresponde a aproximadamente a 210.000.000 m². A tecnologia predominante é tubo evacuado (50%), seguida pelos coletores planos com cobertura (32%) e sem cobertura (17%), e por aquela cujo fluido de trabalho é o ar (1%). A evolução do mercado brasileiro pode ser visto no Gráfico 2.3.4 (DASOL, 2011).

PAÍS/REGIÃO	ADICIONADO EM 2008 (GWt)	ACUMULADO ATÉ 2008 (GWt)
China	21,7	105
Europa	3,3	18,3
Turquia	0,7	7,5
Japão	0,2	4,1
Israel	0,2	2,6
Brasil	0,4	2,4
Estados Unidos	0,2	2,0
Índia	0,3	1,8
Austrália	0,2	1,4
Coréia do Sul	0,04	1,0
Outros	<0,5	<3
TOTAL MUNDO	28	149

Tabela 2.3.3: A Produção Acumulada de Coletores Planos e a Distribuição entre Países

Gráfico 2.3.4: Evolução do Mercado de Aquecimento Solar Brasileiro



2.3.5 Coletor solar concentrador para produção de energia elétrica, tecnologia e mercado

Uma usina solar termoelétrica é formada pelos seguintes componentes principais: o coletor solar concentrador que, mediante a reflexão ou difração da luz, realiza a sua coleta e concentração, o absorvedor que absorve a luz e transfere o calor para a um fluido térmico, um sistema armazenador de calor, um sistema gerador de vapor e um sistema convencional de conversão de energia tér-

mica em eletricidade, segundo Figura 2.3.5. Nos quatro conceitos a seguir basicamente o que difere é o campo de coletores: as Figuras (a) e (b) são concentradores bidimensionais ou lineares e (c) e (d) são concentradores tridimensionais.

Existem concentradores que têm os componentes refletivos conhecidos como heliostatos em que cada espelho reflete a luz para um recipiente linear ou volumétrico, enquanto outros são formados de imagem. Em forma mais detalhada o sistema de geração solar termoelétrica com torre de potência pode ser visto na Figura 2.3.6.

Figura 2.3.5 (a): Esquema de uma Usina Solar Termoelétrica

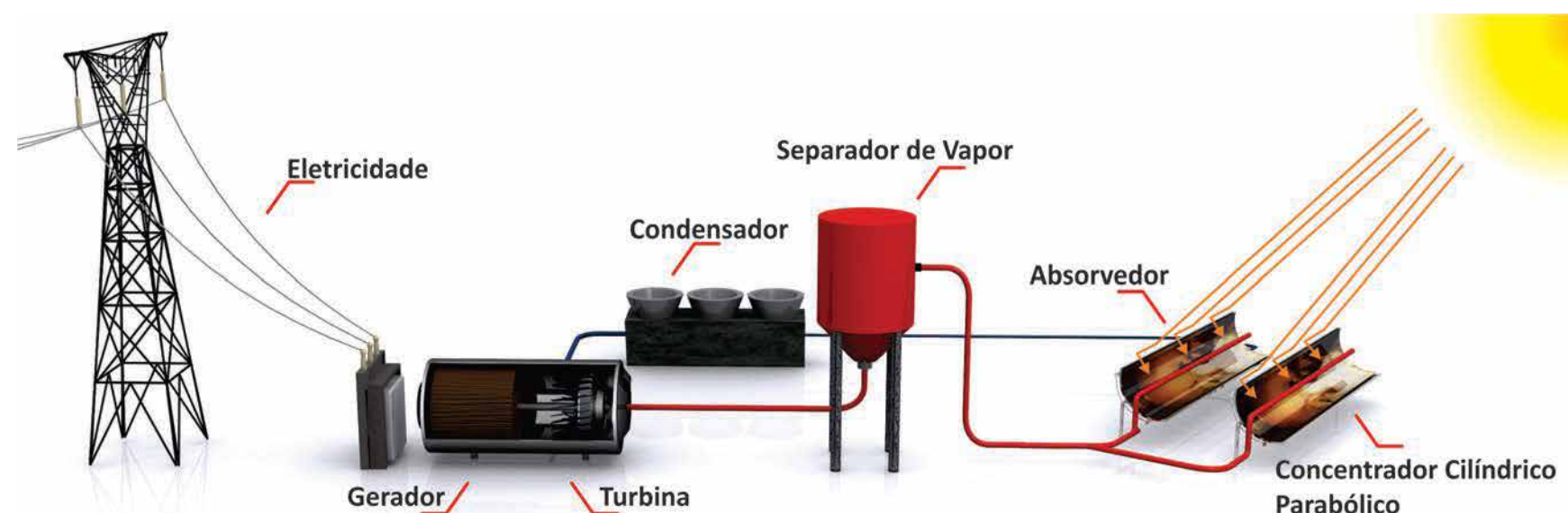


Figura 2.3.5 (b): Esquema de uma Usina Solar Termoelétrica



2.3 – Tecnologia

Figura 2.3.5 (c): Esquema de uma Usina Solar Termoelétrica

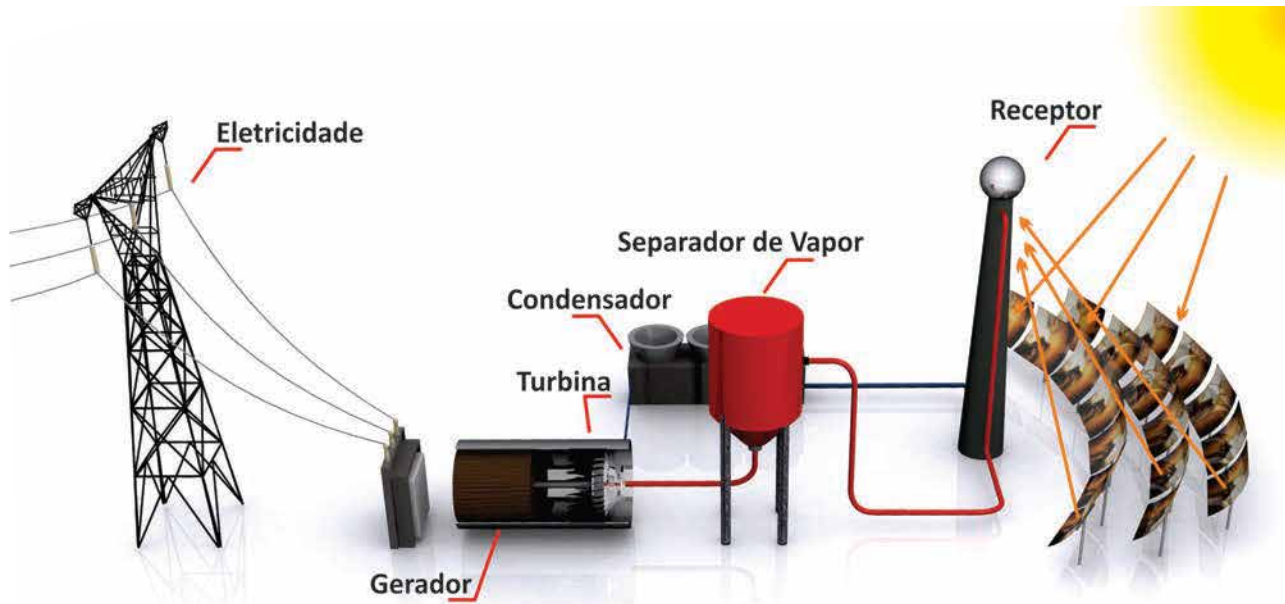


Figura 2.3.5 (d): Esquema de uma Usina Solar Termoelétrica

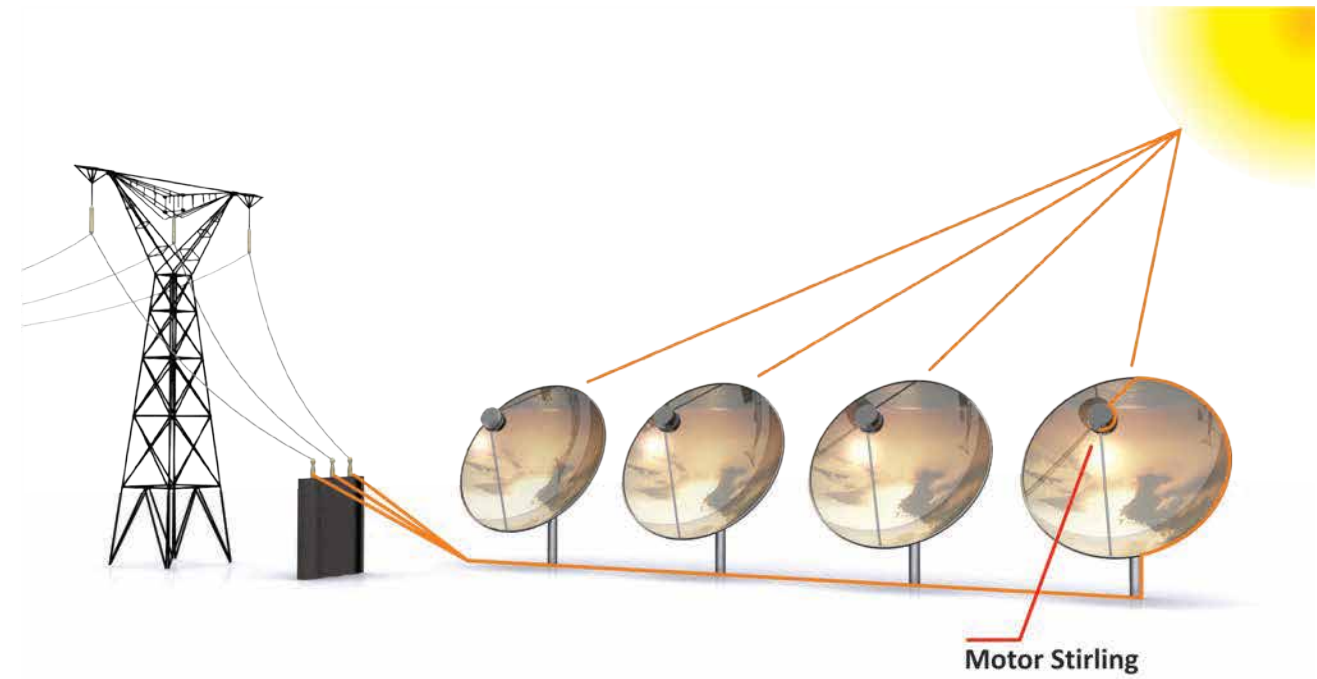
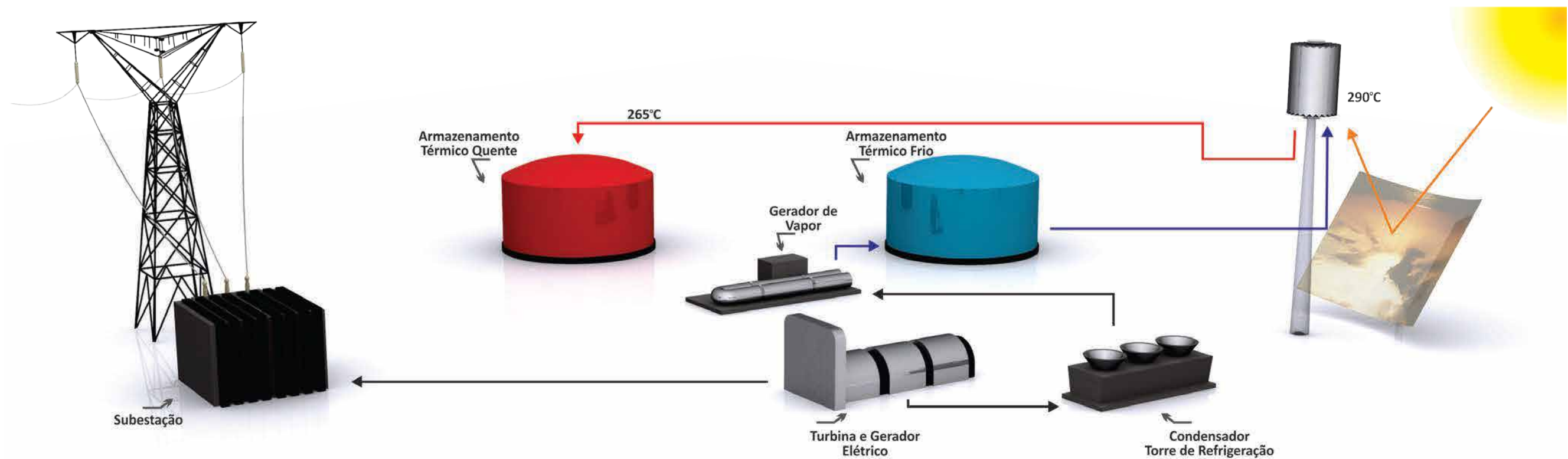


Figura 2.3.6: Esquema detalhado de uma Torre Solar Termoelétrica



2.3 – Tecnologia

2.3.6 Evolução recente da tecnologia e mercado

A história recente da evolução das usinas solares termoelétricas inicia-se na década de 1980. Os principais marcos foram:

Década de 1980

- **1981** – As torres solares conhecidas como SOLAR I (10,0, MW EUA), CESA I (1,2 MW Espanha), THEMIS (2,5 MW, França), EU-RELIOS (1,0 MW, Itália) e NIO (1,0 MW, Japão) foram conectados à rede elétrica (BRAKMANN e KEARNEY, 2002).
- **1984** – Solar Electric Generating System I (SEGS 1) uma usina solar termoelétrica com concentrador cilíndrico parabólico com potência de 13,8 MWe entra em operação comercial.

Década de 1990

- **1990** – Nove centrais tipo SEGS estavam implantados, em bases comerciais (SEGS 1, 13,8 MWe; SEGS 2, 7, 30 MWe e SEGS 8 e 9, 80 MWe) totalizando 354 MWe.
- **1991** – A principal construtora dos SEGS, a Luz Solar, entra em falência.
- **1996** – A torre solar SOLAR II de 10 MW entra em operação e demonstra a viabilidade de armazenamento com sais fundidos.
- **1990-2000** – Apesar da interrupção da instalação de sistemas comerciais de porte, as pesquisas básicas continuaram.

Década de 2000

- **2004** – Disco parabólico com motor Stirling de 150 kW foi implantado nos Laboratórios Sandia; o governo espanhol edita um decreto estimulando a compra de 200 MW de energia solar termoelétrica com tarifa garantida.
- **2006** – Implantação da usina de P&D (1 MW) da tecnologia cilíndrico parabólico em Saguaro, nos EUA.
- **2007** – Implantação da planta comercial tipo torre PS10, na Espanha e Nevada I, de 60 MW com a tecnologia de concentrador cilíndrico-parabólico. Início da rampa de crescimento da comercialização.
- **2008** – Andasol I (Espanha, 50 MW), a primeira usina termoelétrica deconcentrador cilíndrico-parabólico com armazenamento térmico, é comissionada; ademais, Kimberlina (EUA, 5 MW), a primeira usina solar termoelétrica com concentrador linear de Fresnel, foi implantada.
- **2009** – Na Espanha foram construídas PS20 (20 MW, torre solar), as usinas termoelétricas com concentradores cilíndrico-parabólicos de Puertollano, Andasol II e La Risca, todos com 50 MW, e PE1, com tecnologia de concentração linear de Fresnel, de 1,4 MW. Nos EUA, foi construída Sierra Sun Tower (5 MW).
- **2010** – Foram acrescentadas mais 5 usinas termoelétricas com concentradores cilíndrico-parabólicos de 50 MW cada na Espanha e uma usina com tecnologia de concentração cilíndrico-parabólica com ciclo combinado de 5MW e 1,5 MW de disco Stirling nos EUA.

Figura 2.3.11: Usinas Solares do Tipo Torre de Potência: Solar II e PS10 / Fonte: CEMIG



A Figura 2.3.11 mostra a torre de potência Solar II, PS10 e Sierra Sun Tower. A Figura 2.3.12 mostra as usinas solares SEGS e Andasol 1, ambas com concentradores cilíndrico-parabólicos. A Figura 2.3.13 mostra a usina solar de Kimberlina com tecnologia de concentração Fresnel linear e Maricopa, com disco parabólico e motor Stirling.

2.3 – Tecnologia

Figura 2.3.12: Vistas das Usinas Solar SEGS e Andasol 1 / Fonte: CEMIG



Figura 2.3.13: Vistas da Usina Solar de Kimberlina / Fonte: CEMIG



2.3.7 Quantidade acumulada instalada por tecnologia e país

Em 2010 a quantidade acumulada de usinas solares termoeletricas implantadas no mundo era de 941 MW, com a predominância (95%) da tecnologia de concentração cilíndrico-parabólica, conforme Tabela 2.3.5. A distribuição por país torna-se mais equilibrada, sendo 46,0% para os EUA e 51,3% para a Espanha. Convém ressaltar o avanço espetacular da Espanha, pois a distribuição em 2009 era aproximadamente 30% para Espanha e 70% para os EUA. O percentual alto dos EUA era explicado pela expressiva (354 MW) implantação das usinas SEGS entre 1985 e 1991. A capacidade acumulada das usinas em operação pode ser vista na Tabela 2.3.6.

As estimativas de usinas solares termoeletricas em construção

TECNOLOGIA	CAPACIDADE (MW)	FRAÇÃO(%)
Coletor Cilíndrico-Parabólico	893,0	94,9
Torre de Potência	37,5	4,0
Fresnel Linear	8,4	0,9
Disco Parabólico	1,5	0,2
CSP (Potência solar concentrada) – sem detalhamento	0,25	≈ 0
TOTAL	940,65	100,0

Tabela 2.3.5: Quantidade acumulada de usinas solares termoeletrica operacionais em 2010 por tecnologia

PAÍS	CAPACIDADE (MW)	FRAÇÃO(%)
EUA	432,5	46,0
Espanha	482,4	51,3
Irã	17,25	1,8
Itália	5,0	0,5
Austrália	2,0	0,2
Alemanha	1,5	<0,2
TOTAL	940,65	100,0

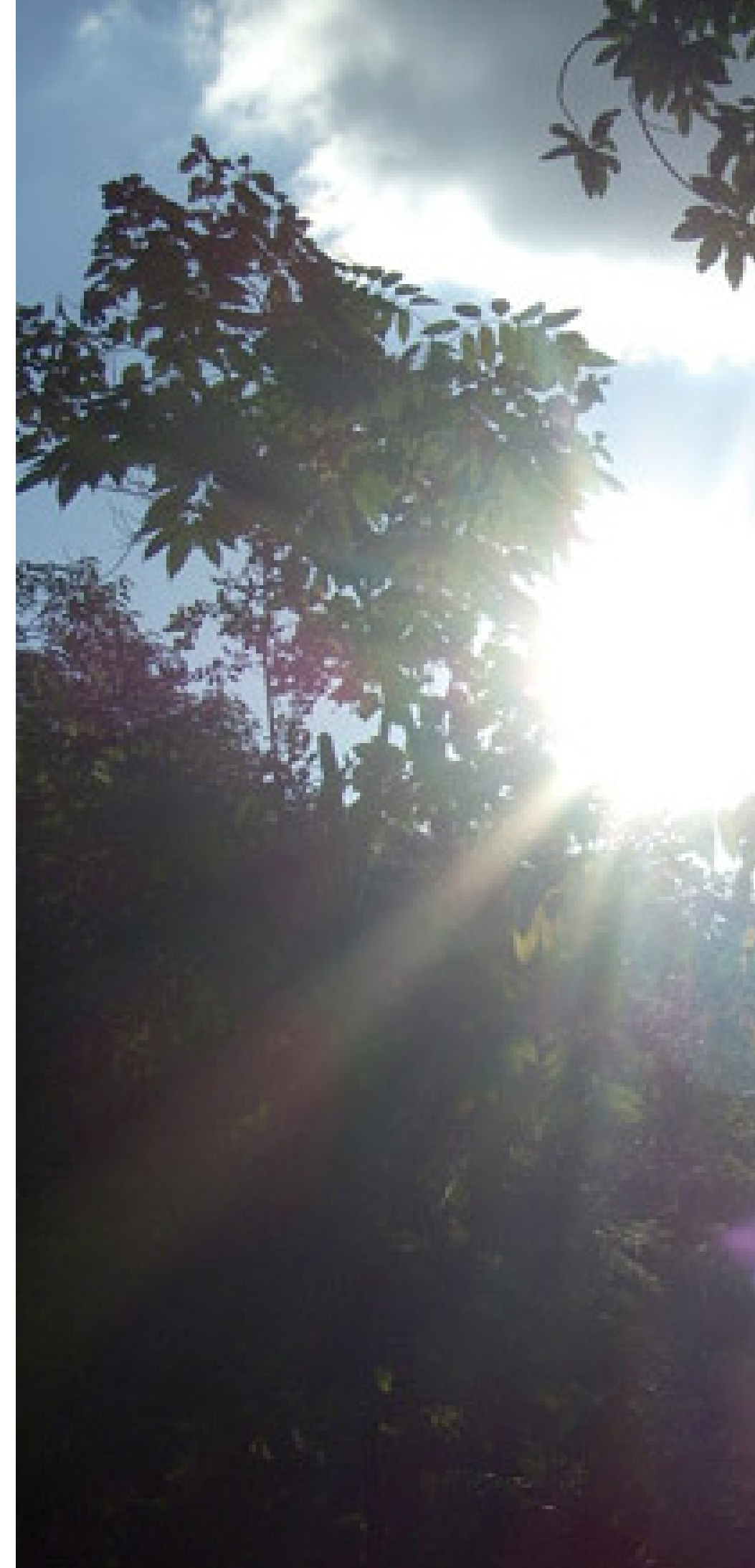
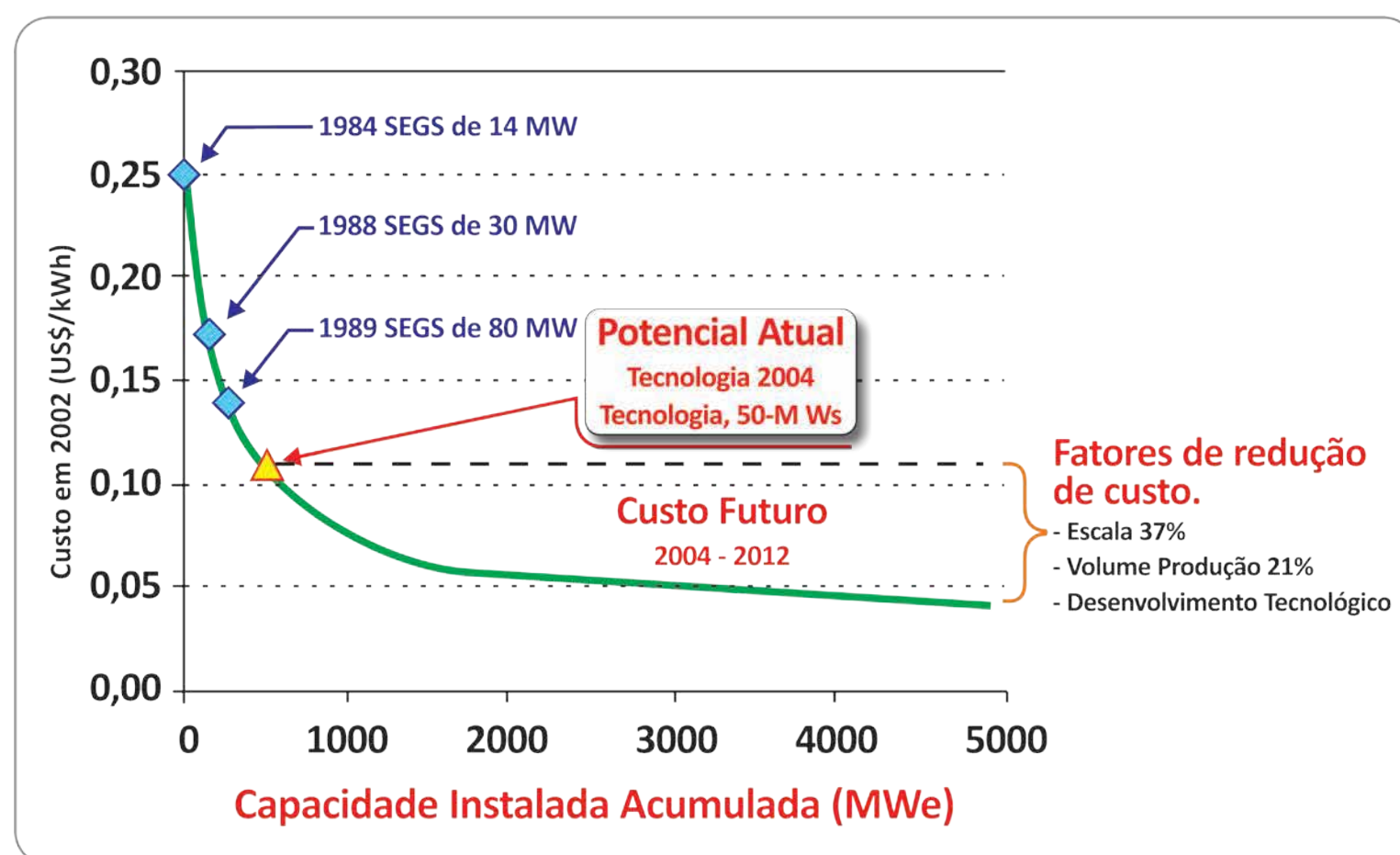
Tabela 2.3.6: Quantidade acumulada de usinas solares termoeletrica operacionais em 2010 por país

2.3 – Tecnologia

ou anunciadas publicadas mostram discrepâncias devido ao uso de critérios diferentes, períodos diferentes em consideração e a não atualização das modificações no projeto em termos de potência. Conforme Figura 2.3.14 estão em construção cerca de 1934 MW e anunciadas 9.659 MW nos EUA, 1.080 MW na Espanha e 6.800 MW no restante do mundo. GREENPEACE em uma publicação cujo ano base é 2009 relata 560 MW em operação, 964 MW em construção e 7.463 MW anunciadas. Considerando com cautela esses números é palpável que o

ritmo de crescimento e a taxa de acumulação de experiência e ganho de escala nos próximos anos serão espetaculares. Assim, considerando os valores mais conservativos, pode-se observar que nos próximos cinco anos o custo da energia solar termoelétrica poderá ser paritário com a da rede convencional de eletricidade. Cabe ressaltar a contribuição do desenvolvimento tecnológico como fator muito importante para a redução do custo da eletricidade gerada.

Figura 2.3.14: Estimativa de Redução de Custos da Eletricidade Gerada em Função da Capacidade Instalada Acumulada
Fonte: Sargent and Lundy – Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts, 2003



2.4 – Desenvolvimento da Tecnologia em Minas Gerais

Desde a década de 1980 a CEMIG, em colaboração com instituições de pesquisas tais como Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais/PUC-MINAS e Universidade Federal de Viçosa/UFV, tem realizado trabalhos pioneiros na inserção e uso da energia solar. Na área da tecnologia solar fotovoltaica as atividades focaram a mitigação das condições de pobreza e falta de infraestrutura básica (água e energia elétrica) de extensas regiões remotas do estado de Minas Gerais. Em 1986 foram iniciados os estudos de viabilidade técnica e econômica visando à preeletrificação rural de consumidores de baixo potencial de consumo em locais remoto.

A continuidade desse projeto mais recentemente insere-se como alternativa para o projeto de universalização do atendimento de energia elétrica conhecido como Luz para Todos. As instalações acumuladas de pequenos sistemas de geração fotovoltaica já totalizam 2.500 sistemas, que atendem residências, escolas e postos de saúde. Também entre 1981 e 2001 a Companhia de Saneamento de Minas Gerais/COPASA instalou cerca de 170 sistemas de bombeamento de água com tecnologia fotovoltaica. Finalmente cabe destacar a parceria entre a Cemig e a Agência de Cooperação Técnica Alemã (GTZ) para estudar a viabilidade de conversão do estádio Mineirão e do ginásio Mineirinho em edificações supridas por energia proveniente de painéis fotovoltaicos.

O local será uma das sedes da Copa do Mundo de 2014 e prevê a instalação de um sistema fotovoltaico integrado ao estádio de 640 a 1.400 kWp, dependendo da tecnologia da célula fotovoltaica a ser utilizada. Também está em fase avançada de planejamento a instalação de uma usina de energia solar fotovoltaica, com

capacidade de 3 MWp, a ser construída por meio de uma joint venture formada pela CEMIG e pela empresa espanhola Solaria Energía e Medio Ambiente S/A. O projeto está orçado em R\$ 40 milhões, a serem investidos em um período de três anos e meio.

Os chuveiros elétricos, tecnologia dominante no Brasil para aquecimento de água para banho, possuem uma contribuição negativa para o setor elétrico, elevando o pico de demanda da rede e representando um peso significativo na tarifa de energia dos consumidores de baixa renda. De modo a minimizar esses problemas, a CEMIG tem estimulado o desenvolvimento de uma cadeia produtiva de coletores solares térmicos no Estado. Para efeito demonstrativo e educacional tem instalado aquecedores solares em conjuntos habitacionais, creches, asilos e hospitais.

Esse efeito demonstrativo foi bem sucedido e hoje nas moradias populares Minha Casa, Minha Vida a instalação de coletores solares térmicos é feita rotineiramente.

Em 2002 a CEMIG e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/CEFET-MG iniciaram o desenvolvimento de um projeto experimental, nunca realizado no Brasil, visando a construir e operar uma miniusina termelétrica solar de 10 kWe.

A usina termoelétrica solar foi construída totalmente com materiais disponíveis no mercado nacional, e utilizou concentradores cilíndrico-parabólicos para a captação de energia. Esses coletores funcionam refletindo a luz do sol, que eleva a temperatura do equipamento, gerando vapor e energia. Atualmente três módulos de 12 m de comprimentos estão construídos e testados.

3. Metodologia



Foto: CEMIG

3.1	PROCESSO DE MAPEAMENTO	45	3.4.3	Interpolação Kriging	52
3.2	COLETA E AVALIAÇÃO DOS DADOS SOLARIMÉTRICOS	46	3.4.4	Mapas de contorno	52
3.2.1	Qualificação dos sensores	46	3.5	IDENTIFICAÇÃO DE LOCAIS PARA INSTALAÇÃO DE CENTRAIS ELÉTRICAS	53
3.2.2	Período de medidas	47	3.5.1	Identificação dos locais mais promissores para centrais solares concentradoras	53
3.2.3	Distribuição espacial das medidas	47	3.5.2	Recurso solar	54
3.2.4	Qualificação dos dados solarimétricos medidos para uma localidade	47	3.5.3	Disponibilidade de área e topografia do terreno	54
3.2.5	Base de dados identificados	48	3.5.4	Uso e ocupação do solo	54
3.3	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	49	3.5.5	Riscos	54
3.4	INTERPOLAÇÃO ESPACIAL	50	3.5.6	Conexão com a rede elétrica	54
3.4.1	Aplicações da interpolação	50	3.5.7	Suprimento de água	55
3.4.2	Tipos de interpolação	51	3.5.8	Disponibilidade de combustível ou outros energéticos para <i>backup</i>	55
			3.5.9	Acesso	55

3.1 – Processo de Mapeamento

As etapas percorridas ao longo do desenvolvimento do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais estão mostradas na Figura 3.1.1. De forma geral, as cores mais quentes representam trabalhos preparatórios ou produtos intermediários e os blocos em azul representam os produtos finais.

As fases de levantamento, busca de informações e análise e sistematização das informações foram as mais árduas do projeto. Constituíram-se do levantamento, localização e busca de publicações que continham dados de radiação, de insolação, mapas solarimétricos, mapas climatológicos e fitogeográficos de Minas Gerais e estados limítrofes. Tais informações encontravam-se dispersas, tanto a nível geográfico como temporal.

As fontes institucionais foram diversas, tais como: secretarias de agricultura, distritos meteorológicos, universidades, instituições energéticas, entre outras. Em função da necessidade da maior cobertura espacial e temporal possível, bases de dados com informações obtidas com sensores de diferentes classes de precisão, de distintas coberturas espaciais e períodos de medição diferentes foram consideradas, analisadas e consistidas. Essas informações foram organizadas, resultando em um banco de dados.

As informações sobre a insolação, a radiação solar global e outras variáveis meteorológicas foram interpoladas espacialmente e visualizadas através de mapas.

Esses mapas utilizados em conjunto com outros mapas temáticos e de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) permitiram identificar as localidades mais promissoras para futuras instalações de centrais solares concentradoras de grande porte.

Figura 3.1.1: Etapas de Desenvolvimento do Atlas Solarimétrico de Minas Gerais
Fonte: Azevedo, V. W. B e Tiba, C. Dissertação de Mestrado, 2008, PROTEN-UFPE



3.2 – Coleta e Avaliação dos Dados Solarimétricos

Os principais critérios para a avaliação dos dados solarimétricos foram a qualidade dos sensores, o período de medidas e a distribuição espacial das medidas.

3.2.1 Qualificação dos sensores

Os heliógrafos do tipo Campbell-Stokes produzem informações sobre a insolação diária. Nestes equipamentos, a convergência dos raios solares sobre uma faixa de papel queima, ao longo do dia, um certo comprimento que é utilizado para quantificar as horas de brilho do Sol. A queima ocorre quando a radiação solar direta supera um limiar variável de 100 a 200 W/m² que depende da localização geográfica do equipamento, do clima e do tipo da faixa de papel utilizada para o registro. Quando o equipamento está adequadamente instalado, com a utilização de faixa de papel apropriado, o limiar é igual a 120 W/m². Mediante o uso de correlações simples, com coeficientes apropriados, as séries históricas da insolação podem ser utilizadas para estimar radiação solar diária, média mensal ou anual, com erros mínimos da ordem de 10%.

Os piranômetros são equipamentos destinados a medir a radiação solar global e difusa. Existem diferentes tipos de piranômetros; porém, serão reportados aqui somente o piranômetro termoelétrico e fotovoltaico, pois a maioria dos equipamentos instalados no Brasil são destes tipos. O elemento sensível do piranômetro termoelétrico é uma pilha termoelétrica (conjunto de pares termoelétricos interligados em série). A junção quente da termopilha encontra-se em contato com a superfície de um detetor (superfície exposta à radiação solar). Os piranômetros fotovoltaicos têm como sensor um fotodiodo; porém, são de menor precisão, além de terem uma resposta espectral limitada (400-1100 nm). Os piranômetros são classificados em classes conforme pode ser visto na Tabela 3.2.1. A grande maioria dos instrumentos utilizados para medição em campo no Brasil tem sido de segunda classe (fotovoltaicos).

CARACTERÍSTICAS	Padrão Secundário	Primeira Classe	Segunda Classe ^e
Tempo de resposta (95%)	<15 s	< 30 s	< 60 s
Off-Set			
• Resposta para 200W/m ² de radiação térmica	7 W/m ²	15 W/m ²	30 W/m ²
• Resposta para 5K/h de mudança na temperatura ambiente	2 W/m ²	4 W/m ²	8 W/m ²
Resolução	1 W/m ²	5 W/m ²	10 W/m ²
Estabilidade (Mudança anual em % da escala plena)	0,8	1,5	3,0
Resposta direcional (efeito cosseno)	10 W/m ²	20 W/m ²	30 W/m ²
Resposta a temperatura (Erro máximo % devido a variação abrupta no intervalo de 50K)	2	4	8
Não linearidade (Desvio %, em relação à resposta para uma radiação de 500 W/m ² , para uma variação na radiação no intervalo de 100 a 1000 W/m ²)	0,5	1,0	3,0
Sensibilidade espectral (Desvio % em relação à média dentro do intervalo de 300 a 3000 nm)	2,0	5,0	10,0
Resposta à inclinação (Desvio % da resposta a 0°, plano horizontal, devido a variação de 0° a 90° a 1000 W/m ²)	0,5	2,0	5,0
Precisão (95% de confiança)			
• Total horário	3%	8%	20%
• Total diário	2%	5%	10%

Tabela 3.2.1: Classificação dos Sensores Piranométricos conforme OMM (WMO)



3.2 – Coleta e Avaliação dos Dados Solarimétricos

Estes piranômetros acoplados a integradores eletrônicos, em configuração de rede de medição, realizam medidas da radiação solar global diária com erros apresentados na Tabela 3.2.1, desde que todos os procedimentos de manutenção e calibração periódica (no mínimo uma vez por ano) sejam seguidos.

3.2.2 Período de medidas

Um problema central associado à avaliação do recurso solar consiste em estimar o menor número de anos necessário para obter uma estimativa confiável da radiação solar em determinado lugar. Trabalhos realizados (VERNICH e ZUANNI, 1996) com o propósito de utilizar medidas de insolação (horas de brilho de Sol) para determinar a radiação solar global, através da relação de Angstrom, estimaram o número de anos necessários para uma determinação confiável do recurso solar. Os autores concluem que um período de 14 anos fornece uma série diária estatisticamente estável, não somente para dados de insolação e sua conversão em radiação, mas também para outras grandezas meteorológicas. Em outras palavras, para períodos maiores que 14 anos pode-se acreditar que a variabilidade observada, neste caso do recurso solar, deve-se exclusivamente a sua natureza estatística intrínseca, independentemente do tamanho da amostra. Obviamente, em regiões geográficas de climatologias fortemente variáveis a consideração anterior não é válida.

3.2.3 Distribuição espacial das medidas

De forma geral as informações solarimétricas, até as mais abundantes como a insolação diária, não satisfazem todas as necessidades dos usuários devido à baixa densidade da rede de estações. Estudos recentes sobre a variabilidade espacial do recurso solar, em regiões fitogeográficas homogêneas, mostram que a radiação diária global média mensal pode ser extrapolada até 200 km de distância com erros da ordem de 15%, com um nível de confiança de 90% (GROSSI GALLEGOS e LOPARDO, 1988). Em regiões geográficas de relevos fortemente variáveis como montanhas e espelhos de água muito grandes (costa) a extrapolação acima não é válida. O tema da extrapolação espacial da radiação solar ainda é insuficientemente estudado, seja pela falta de dados de boa qualidade, seja pela variedade dos locais pesquisados. Portanto, e apesar de sua conhecida limitação, o critério para qualificação da distribuição espacial terá como referência a possibilidade mencionada acima.

3.2.4 Qualificação dos dados solarimétricos medidos para uma localidade

Em conformidade com os comentários anteriores a respeito dos diversos aspectos referentes a medidas solarimétricas, a qualificação dos dados solarimétricos para uma dada localidade obedece à seguinte hierarquização:

1. Dados piranométricos com sensores de primeira classe
2. Dados piranométricos com sensores de segunda classe
3. Estimativas da radiação solar utilizando a relação de Angstrom

Se existirem informações com equipamentos iguais e comprimentos desiguais da série histórica de dados, prevalece a série mais longa. Também nesse processo é necessário ressaltar o caráter artesanal da qualificação de bases de dados (sempre com problemas de falhas temporal, espacial ou de calibração, entre outros), em que a apreciação do pesquisador com longa experiência acumulada no tema é muito importante.

A relação entre a insolação diária e a radiação solar global diária média mensal é a conhecida relação de Angstrom, estabelecida em 1924. A expressão sofreu modificações e atualmente é expressa da seguinte forma:

$$H/H_0 = a + b (n/N)$$

em que H e H_0 são, respectivamente, a radiação solar global diária e a radiação solar global diária no topo da atmosfera em valores médios mensais; n e N são a insolação diária e a duração astronômica do dia em valores médios mensais. Existe uma extensa lista de trabalhos relativamente recentes que procuram obter melhores coeficientes de regressão **a** e **b**, com inclusão de termos não lineares ou de outras variáveis como umidade relativa, quantidade de água precipitável, latitude e altura solar, entre outros.

A conclusão é que a melhoria nos resultados obtidos com a relação de Angstrom é modesta e insuficiente para justificar o aumento na complexidade dos cálculos.

3.2 – Coleta e Avaliação dos Dados Solarimétricos

Também foi publicado um bom número de trabalhos que propõem coeficientes de regressão de caráter universal. Porém, sabe-se hoje que eles sofrem importantes variações regionais e interanuais inclusive, quando se considera uma mesma região. Portanto, a questão metodológica central, quando se deseja estimar a radiação solar global diária, média mensal, a partir desta correlação, reside em saber quais valores de **a** e **b** devem ser utilizados em regiões onde os coeficientes não foram determinados experimentalmente.

As constantes **a** e **b** podem ser determinadas em estações que possuem equipamentos para ambas as medidas, radiação e insolação. Sua variabilidade espacial, que pode ser estimada em uma região com densidade de estações adequadas, define as dimensões geográficas em que, com certo nível de confiança, o mesmo par de valores pode ser extrapolado para outras regiões.

Uma alternativa interessante é a estimativa feita mediante imagens de satélites, porque é capaz de cobrir larga extensão espacial e razoável extensão temporal. A utilização dessa metodologia porém necessita de estações solarimétricas terrestres de alta qualidade para a sua calibração. Além disso, os sensores instalados nos satélites também sofrem da descalibração com o tempo e normalmente seria necessário um astronauta e equipamentos associados para sua recalibração, o que normalmente não é feito por problemas de custos.

3.2.5 Base de dados identificados

Os seguintes bancos de dados foram identificados e recuperados para o estado de Minas Gerais:

- B1** Banco de dados de radiação solar global e outras variáveis meteorológicas medidos com estações automáticas para o período de 2008 até a data atual, em escala horária, pelo INMET;
- B2** Banco de dados de radiação solar global e outras variáveis meteorológicas medidos com estações automáticas para o período de 1998 a data atual, em escala diária, pelo CPTEC;
- B3** Banco de dados de radiação solar global diária média mensal medidos com piranômetro termoelétricos para o período 1984-1985 pela CEMIG;
- B4** Banco de dados de radiação solar global diária para o período 1984-1985, sem identificação de sensor, medidos pela CEMIG;
- B5** Banco de dados de insolação diária média mensal medidos com heliógrafos Campbell – Stokes no período 1960-2010 pelo INMET;
- B6** Atlas Solarimétrico do Brasil, com compilação dos dados terrestres até 1995 para todo o Brasil, feito pelo CEPL-UFPE CHESF;
- B7** Atlas de Irradiação Solar para o Brasil estimado mediante imagens de satélites pelo CPTEC em 2005.

Nome do Banco de Dados – Instituição	Sensor	Escala de medição	Período	No. localidades	Hist. Calibração
B1 – INMET	Fotovoltaico	Horária	2008-2010	49 / Minas Gerais	s/ registro
B2 – INPE	Fotovoltaico	Diário	2008-2010	31 / Minas Gerais e estados limítrofes*	s/registro
B3 – CEMIG	Piranômetro segunda classe	Diário	2008-2010	13 / Minas Gerais	s/ registro
B4 – CEMIG	Não identificado	Mensal	1984-1986	s/ registro Minas Gerais	s/ registro
B5 – INMET	Heliógrafo	Mensal	1960-1990	58 / Minas Gerais	s/registro
B6 – ATLAS SOLARIMÉTRICO	Compilação de dados	Diário	1960 -1995	500 / Brasil	–
B7 – ATLAS IRRADIAÇÃO	Estimativa satélite	Anual / Mensal	2004-2005	Brasil	–

* Foram consideradas 12 estações em Minas Gerais e 19 estações em estados limítrofes, para alimentar os dados de interpolação



3.3 – Sistemas de Informações Geográficas

O Geoprocessamento surgiu nas décadas de 60 e 70 do século XX, inicialmente utilizado sobretudo com objetivos militares. Atualmente, sua utilização está cada vez mais presente em diversas áreas do conhecimento e em nossas atividades do cotidiano (MATOS, G. M. S. 2010).

O Geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de tecnologias que permite a captação, o armazenamento e a manipulação de dados geográficos. É composto de algumas tecnologias principais, entre outras: o Sensoriamento Remoto, a Cartografia Digital, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG ou GIS, no inglês) e os Sistemas de Posicionamento Global (GPS) (MELGAÇO, 2005; ABREU, J.F. e BARROSO. L, 2003).

O Sensoriamento Remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície, sem que haja contato. Em outras palavras, as imagens de satélite e fotografias aéreas captadas por sensores especiais são processadas e analisadas para gerar informações sobre a área da superfície terrestre em estudo.

O avanço da computação, especialmente da Computação Gráfica, viabilizou o uso da Cartografia Digital. Com esta tecnologia, é possível desenhar os mapas em meio digital com o emprego de

programas de computador que tornam este processo muito mais eficaz. Possibilitou-se também que a atualização e a divulgação destes mapas sejam feitas de forma mais rápida e simplificada. Deste modo, pode-se concluir que “a Cartografia é uma ciência tão antiga quanto à espécie humana e tão nova quanto o jornal de hoje” (BRITO, 2004).

Segundo MELGAÇO (2005), nos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) estão as maiores potencialidades do Geoprocessamento. Os SIGs possibilitam a captura, armazenamento, manipulação e apresentação de dados georeferenciados que podem estar relacionados a diferentes temáticas. Estes dados são armazenados em bancos de dados georeferenciados e podem ser processados e consultados para gerar diferentes tipos de resultados.

O GPS (Sistema de Posicionamento Global) é um sistema formado por uma rede de satélites (entre 24 e 32 satélites), que transmitem sinais de microondas para os receptores presentes na superfície terrestre, possibilitando fazer leituras de sua localização e da hora local com bastante precisão. Este sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa americano, mas atualmente é utilizado em todo o mundo. Os receptores GPS estão bastantes populares e acessíveis, sendo utilizados tanto no meio científico como em celulares, automóveis, transporte rodoviário e para várias outras aplicações.



Foto: CEMIG

3.4 – Interpolação Espacial

Interpolação é um método utilizado para gerar novos dados baseando-se em um conjunto discreto de dados conhecidos. Estes dados conhecidos previamente são obtidos através da coleta de dados ou de experimentação. Em uma definição mais técnica, pode-se dizer que a interpolação é um tipo de ajuste de curva que permite determinar uma função que represente os dados da amostra, possibilitando a estimativa de novos dados. Como a função gerada através da interpolação é uma versão simplificada da função original do problema, pois está baseada em uma amostra dos dados, ela possui um percentual de erro e um custo de acordo com o método de interpolação utilizado. Alguns métodos de interpolação possuem meios de calcular um indicador de probabilidade dos resultados obtidos estarem corretos.

Segundo Burrough e McDonnell (1998), um conceito mais geográfico de interpolação se refere ao nome dado ao processo de estimar valores de atributos de determinados locais baseando-se nas medições de outros locais da mesma área ou região. Esta estimativa dos demais pontos de uma área baseando-se em uma amostra é um procedimento matemático que depende da quantidade de pontos na amostra e do objetivo da interpolação. Neste processo são utilizados os valores colhidos em determinados pontos da área estudada, sendo que os pontos que estão mais próximos têm maior chance de terem valores iguais do que pontos que estão distantes uns dos outros, conforme a Primeira Lei de Geografia, proposta por Waldo Tobler (ABREU, 2003) Desta forma, os diversos métodos de interpolação utilizam a informação de alguns pontos para calcular os pontos vizinhos e chegar a uma superfície contínua estimada (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Watson (1992) conceitua interpolação como um procedimento numérico para gerar uma estimativa da dependência funcional

em uma determinada localização, baseando-se no conhecimento da dependência funcional da vizinhança. Para ele, a interpolação gera uma estimativa informada do desconhecido. A dispersão dos pontos da amostra é um fator importante neste processo. É desejável que a distribuição dos pontos seja uniforme na área estudada para gerar um mapa melhor. Entretanto, de acordo com os estatísticos, uma amostra totalmente padronizada pode ser tendenciosa, o que sugere a utilização de uma amostra aleatória (BURROUGH e MCDONNELL, 1998).

Quando os dados das amostras são utilizados para estimar valores de locais fora de uma área conhecida, o processo é chamado de Extrapolação. Geralmente, os resultados da extrapolação são menos significativos e estão sujeitos a uma maior incerteza, já que estão em uma área desconhecida.

3.4.1 Aplicações da interpolação

Existem diversas aplicações da interpolação em várias linhas das ciências. Estes métodos são constantemente utilizados em diferentes áreas da ciência como a geografia, a estatística, a engenharia e a computação gráfica (utilizados no processamento digital de imagens, em jogos digitais e simuladores de realidade virtual).

Neste trabalho, os métodos de interpolação são utilizados para gerar um mapa de contorno, baseando-se em alguns dados amostrais. Desta forma, é necessário o uso da interpolação para ter uma superfície contínua estimada, a qual será utilizada para traçar as linhas de contorno ou isolinhas. (ABREU, JF e BARROSO, L, 2003).



3.4 – Interpolação Espacial

3.4.2 Tipos de interpolação

Existem vários métodos de interpolação, que se dividem de acordo com o tipo e a quantidade de dados da amostra, a extensão da área a ser estudada, a sua dispersão no espaço e o número de variáveis envolvidas no problema. Com relação à quantidade de dados da amostra e à extensão da área estudada, os métodos de interpolação podem ser classificados em global e local (BURROUGH e MCDONNELL, 1998). Na interpolação global são utilizados todos os dados disponíveis para fazer previsões para toda a área de interesse do problema, enquanto que a interpolação local trabalha apenas uma área reduzida ao redor dos dados a serem interpolados, gerando estimativas apenas para a vizinhança. Segundo Burrough e McDonnell (1998), alguns exemplos de métodos globais são superfícies de tendência, modelos de regressão e análise espectral. Já os métodos locais mais conhecidos são “vizinho mais próximo” (polígonos de Thiessen), inverso do quadrado da distância (IDD) e *splines*.

A disposição espacial dos dados da amostra também pode ser utilizada como forma de classificação dos métodos de interpolação. De acordo com Burrough e McDonnell (1998), os dados podem ser coletados como uma amostra distribuída regular ou irregularmente no espaço. A amostra de dados também pode ser obtida a partir de uma superfície que já possui um grid regular como os dados coletados a partir de imagens de sensoriamento remoto ou imagens digitalizadas. Estes métodos podem ser classificados como de grid regular, de grid irregular ou de dados dispersos. Alguns dos métodos utilizados para amostras regulares são interpolação bilinear, interpolação bicúbica, superfície de Bézier, de Lanczos, interpolação trilinear e interpolação tricúbica. As amostras dispersas podem ser interpoladas por outros métodos mais conhecidos, como aqueles baseados em TIN (*Triangular Irregular Network*: Malha Triangular Irregular), o inverso do quadrado da distância (IQD), *kriging* (krigagem) e de *splines* (*TPS – Thin Plate Spline*).

O número de variáveis envolvidas no problema também pode ser uma forma de agrupar os métodos de interpolação utilizados. Estes métodos podem conter uma ou mais variáveis envolvidas, sendo classificados em métodos de uma, duas e três dimensões e alguns que podem ser utilizados para qualquer número de dimensões. A interpolação por “vizinho mais próximo”, por exemplo, pode ser utilizada em problemas de qualquer número de dimensões. Como exemplo de métodos que utilizam duas dimensões, há as interpolações bilinear e a bicúbica, assim como há as interpolações trilinear e tricúbica que utilizam três dimensões.

Watson (1992) ressalta que os métodos de interpolação mais conhecidos estão divididos em métodos que utilizam funções ajustadas (*fitted functions*) e métodos que utilizam médias ponderadas, os quais são aplicados em dois tipos de problemas de interpolação: superfícies exploratórias e superfícies já existentes. Para ele, os métodos de interpolação podem ser executados manual ou automaticamente através do uso de computadores. Watson sugere uma classificação dos métodos de interpolação segundo o algoritmo utilizado:

- Métodos baseados na distância
- Métodos polinomiais que empregam funções ajustadas (*fitted functions*)
- Métodos baseados na triangulação
- Métodos baseados em retângulos
- Métodos baseados na vizinhança

Neste trabalho, foram utilizados o método de interpolação *kriging* (krigagem) e mapas de contorno.



3.4 – Interpolação Espacial

3.4.3 Interpolação kriging

A interpolação *kriging*, também conhecida como krigagem ou Processo Gaussiano de Regressão, é um método geoestatístico de regressão utilizado para aproximar ou interpolar dados. A krigagem também pode ser definida como uma forma de predição linear ou de inferência bayesiana. Este método, que era utilizado na área de mineração, é bastante poderoso e foi desenvolvido pelo matemático francês Georges Matheron a partir dos trabalhos de seu inventor, o engenheiro de minas sul-africano Daniel G. Krige.

Esta técnica assume que os dados de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço, ou seja, se num ponto o peso ou massa é igual a x , é muito provável que se encontrem resultados muito próximos de x quanto mais próximos se estiver do ponto p . Pode-se dizer que a krigagem assume que a variável que está sendo interpolada é uma variável regionalizada, ou seja, possui certo grau de correlação espacial.

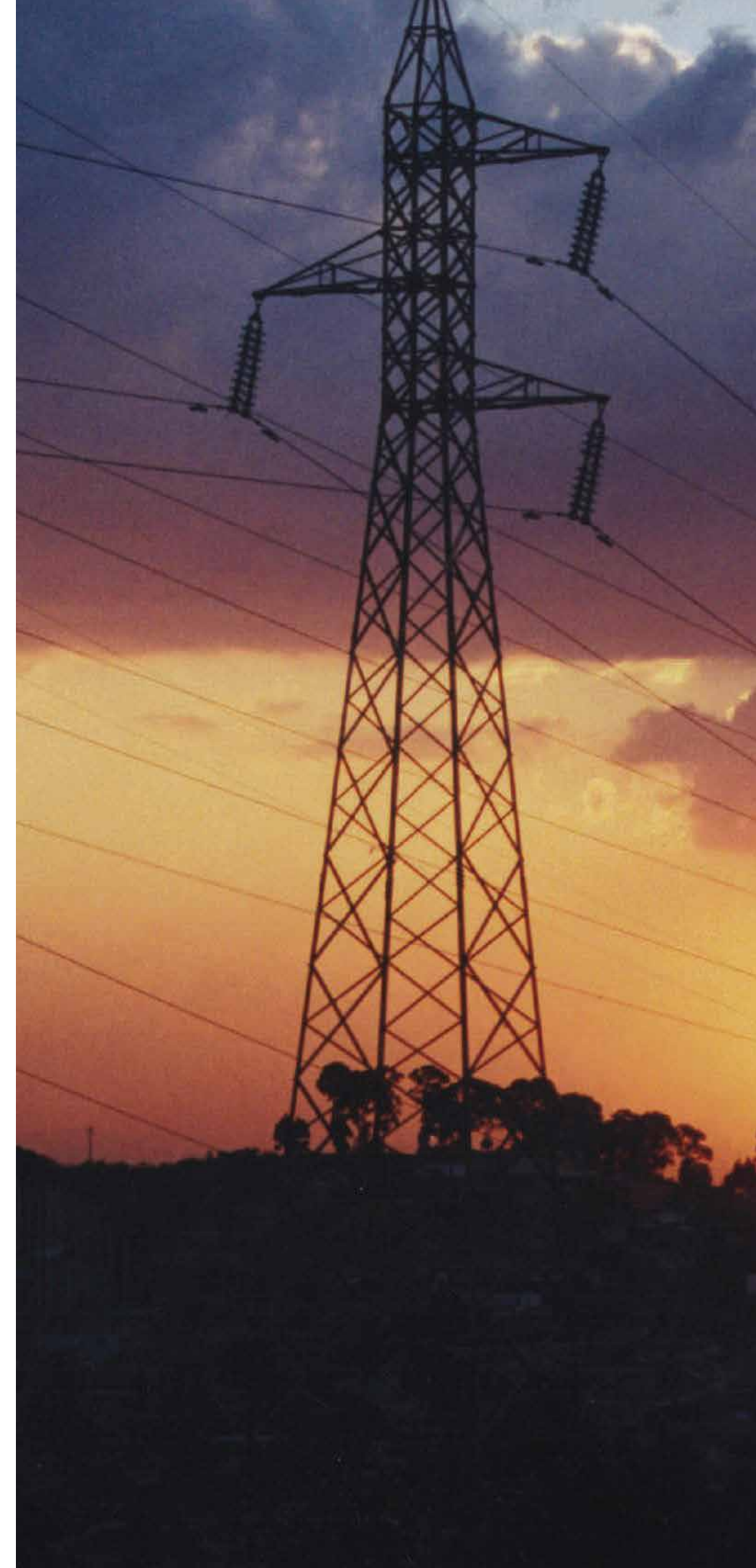
Este método utiliza o variograma para expressar a variação espacial e minimiza o erro dos valores estimados. O processo de estimação é feito por uma distribuição de valores conhecidos. Existem vários tipos de krigagem como a krigagem ordinária e acokrigagem. A diferença entre estes tipos de krigagem, de uma maneira geral, está nas diferenças das médias locais utilizadas, que podem ser consideradas constantes e semelhantes às médias da população (krigagem simples) ou estimadas com base nos pontos vizinhos (krigagem ordinária). A *co-kriging* é uma extensão dos métodos anteriores e é utilizada para estimar uma variável que não está amostrada com a mesma intensidade de outras duas, as quais são espacialmente dependentes.

3.4.4 Mapas de contorno

Segundo Watson (1992), o processo de geração do mapa de contorno, chamado de *contouring*, está condicionado à representação de uma determinada superfície, a qual está relacionada com um conjunto de dados. Sua natureza pode ser topográfica ou outras quaisquer que representam a ocorrência de um fenômeno no espaço. Os mapas de contorno são comumente gerados através da variação de uma função bivariada que gera, por sua vez, uma superfície contínua em três dimensões no espaço. Nos casos em que os valores da função são conhecidos apenas em algumas localidades, são utilizados métodos de interpolação para estimar o comportamento do fenômeno em uma região (TOBLER, 1979).

As superfícies contínuas podem ser representadas por modelos de linhas de contorno ou por grids, que podem ser regulares ou irregulares (COMBER; PROCTOR; ANTHONY, 2007). As linhas de contorno, chamadas de isolinhas ou isopleths, são linhas curvilíneas traçadas por pontos de igual valor. Os modelos representados por grids regulares discretos e grids irregulares são imagens de superfícies cuja variação da função é representada por tons diferentes de cor ou de cinza.

Mesmo que os dados representados nas superfícies contínuas possuam três dimensões (duas dimensões da localização no espaço e uma dimensão que representa o atributo da localização) eles são representados apenas por duas dimensões nos mapas de contorno, já que a terceira dimensão é representada pelas cores ou pelas isolinhas. As isolinhas que fazem parte do mapa de contorno são traçadas unindo-se os pontos de igual valor, gerando, por exemplo, um caminho de mesma intensidade no espaço representado.



3.5 – Identificação de Locais para Instalação de Centrais Elétricas

3.5.1 Identificação dos locais mais promissores para centrais solares concentradoras

A identificação dos locais mais favoráveis para a instalação de centrais elétricas solares de grande porte, sejam termoelétricas ou fotovoltaicas, exige previamente os procedimentos esquematizados na Figura 3.5.1 (GROSSI GALLEGOS e LOPARDO, 1988).

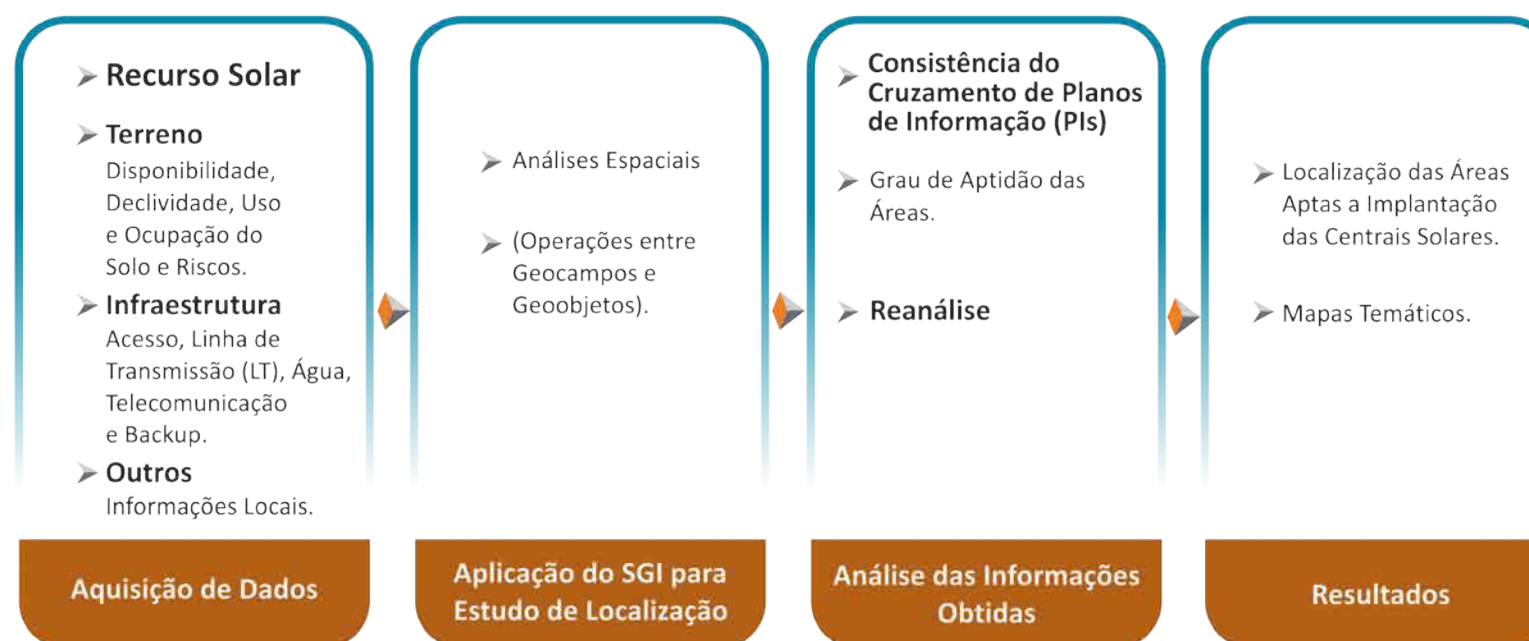
Os procedimentos são aplicados com as informações documentais existentes previamente e por isso é recomendado que sejam feitas visitas *in loco* para a ratificação ou não dessas informações.

Para o conjunto de áreas resultantes desta filtragem, é interessante iniciar imediatamente as medições de radiação nesses lo-

cais, porque a radiação solar é a variável de maior peso na economicidade do futuro empreendimento.

Com as radiações medidas durante um ano (o ideal seria por mais de 3 anos) e levando em consideração todos os outros itens mencionados, a escolha de onde deverá ser o empreendimento é feita. No caso de centrais solares para produção de eletricidade utilizando médias ou altas concentrações, são imprescindíveis locais com alto nível de radiação solar direta.

Figura 3.5.1: Procedimentos favoráveis para instalação de centrais elétricas solares
Fonte: Azevedo, V. W. B e Tiba, C. Dissertação de Mestrado, 2008, PROTEN-UFPE



3.5 – Identificação de Locais para Instalação de Centrais Elétricas

3.5.2 Recurso solar

Uma central termoelétrica ou fotovoltaica solar com concentração requer alta incidência de radiação solar direta normal. Assim, por exemplo, um concentrador solar utiliza somente (em termos práticos) a parcela direta da radiação solar que incide em sua superfície. De acordo com a equação abaixo a radiação solar incidente no plano de coleção do concentrador (I_c) é determinada pela componente direta normal (I_b) somada a componente difusa (I_d) dividida pela concentração (C).

$$I_c = I_b + \frac{I_d}{C}$$

Então, nas centrais solares onde existe uma razão de concentração de $50 < C < 100$, típico, por exemplo, das centrais comerciais de tecnologia de concentrador cilíndrico-parabólico, a contribuição da componente difusa é desprezível, ou seja, $I_c \approx I_b$. Por isso, para o estudo da localização ótima destas centrais, faz-se imprescindível o conhecimento da radiação solar direta normal.

Para sistemas de baixa concentração ou planos, esse fator é menor crítico, mas, mesmo assim, o prerequisite ainda é um bom nível de radiação solar global, o que normalmente ocorre em regiões também de alta incidência de radiação solar direta.

3.5.3 Disponibilidade de área e topografia do terreno

Concentradores cilíndrico-parabólicos têm demanda por áreas relativamente grandes. Uma central solar constituída de uma usina de 80 MWe requer cerca de 500.000 m² (sem considerações de armazenamento térmico) de arranjo de coletores. O fator de escala derivado das experiências de construção de centrais solares mostra que é vantajoso instalar várias usinas adjacentes, constituindo um parque solar. Assim, a disponibilidade mínima de área poderia ser de 2 a 8 km², para a instalação sucessiva e modular dessas centrais.

A topografia do terreno onde será implantada a central solar determina a aceitabilidade do local segundo seu impacto no custo relativo à preparação e nivelamento do terreno. Esse local deve ser o mais plano possível (com declividade menor que 2%); po-

rém, o suficiente para permitir uma drenagem natural do terreno. Em relação ao horizonte visual do campo de coletores somente são permitidas obstruções (morros, árvores, torres ou outras) com ângulos visuais menores do que 10°.

3.5.4 Uso e ocupação do solo

Na implantação de uma central solar devem ser consideradas as permissões e eventuais restrições de utilização do solo. As permissões referem-se às questões de relação contratual estabelecida entre os proprietários da terra e os desenvolvedores do projeto, ao passo que a restrição refere-se à utilidade destinada ao solo. Neste sentido, observa-se que regiões de áreas urbanas ou expansão urbana, Áreas de Proteção Ambiental (APAs), áreas de produção de alimentos (cultiváveis), territórios quilombolas e territórios indígenas, por exemplo, são consideradas regiões inadequadas para a instalação das centrais solares. As regiões secas e áridas são consideradas típicas para a implantação destas centrais.

3.5.5 Riscos

O histórico dos desastres naturais tais como tremores de terra, rajadas de vento muito fortes, tempestades de areia, granizo, raios, entre outros são fatores potenciais de danos ou de interrupção do funcionamento das centrais solares. Também deve ser considerada a qualidade do solo.

3.5.6 Conexão com a rede elétrica

Os requisitos de conexão com a rede elétrica para uma central solar que usa coletores cilíndrico-parabólicos são semelhantes aos de outras usinas a vapor. Uma usina que produz 80MWe de potência, por exemplo, deve dispor de linhas de transmissão de 230kV. Além de capacidade de carga, deve-se considerar outro aspecto importante: a distância entre a central solar e as linhas de transmissão. Os custos efetivos com a construção de novas linhas de transmissão são, em geral, muito altos e dependem do nível de voltagem da linha e de seu comprimento. Assim, a central solar deve estar posicionada o mais perto possível de linhas de transmissão.



3.5 – Identificação de Locais para Instalação de Centrais Elétricas

3.5.7 Suprimento de água

Uma usina com coletores cilíndrico-parabólicos de 50 MWe operando durante 350 dias no ano e 10 horas por dia, por exemplo, usa cerca de 500.000m³ de água ou 1500 m³/dia. Esta água é necessária para as torres de refrigeração (cerca de 90%), geração de vapor no ciclo de potência (8%) e para a limpeza dos espelhos (2%). O fluxo típico para a torre de refrigeração é de 320m³/h. A água deve ter também qualidade adequada para evitar incrustações e oxidações dos equipamentos.

A disponibilidade de água é uma questão importante na região do semiárido, haja vista que se conhece a relativa escassez de mananciais hídricos de superfície, o que põe em evidência a importância das águas subterrâneas.

3.5.8 Disponibilidade de combustível ou outros energéticos para backup

Combustíveis ou outros energéticos para *backup* são necessários para a operação híbrida da central solar (recurso solar + combustível). Isto é particularmente importante durante os picos de demanda por eletricidade. Nas centrais solares com coletores cilíndrico-parabólicos existentes no exterior é usado o gás natural como combustível de *backup*. Na região do semiárido nordestino, deve-se considerar, além deste, a possibilidade de utilizar o óleo combustível, o biodiesel, e ainda o óleo diesel.

Além da disponibilidade de combustíveis ou outros energéticos para *backup*, deve-se considerar outra questão: se a geração híbrida é uma exigência para a implantação da central, a proximidade da usina com as fontes destes combustíveis. As distâncias muito grandes podem tornar a opção de operação híbrida economicamente inviável.

3.5.9 Acesso

O acesso ao local é relevante pela necessidade de transportar equipamentos de grande porte e frágeis (espelhos de vidro). Os critérios para classificar o acesso são a largura das rodovias, a qualidade da superfície das estradas e a possibilidade de manobras de veículos de grande porte.

O conjunto das informações mencionadas é padronizado em planos de informação (mapas georreferenciados) que são cruzados, resultando assim em informações úteis para identificação dos locais mais promissores.

Os seguintes planos de informação foram utilizados para identificação inicial das regiões mais promissoras do estado:

- Radiação solar direta normal (SWERA, 2005)
- Declividade (SRTM)
- Recurso hídrico
- Linha de transmissão (CEMIG)
- Uso e ocupação do solo (Embrapa)

Particularmente nessa fase do trabalho (identificação dos sítios mais promissores) foram consideradas as três primeiras variáveis, embora no Atlas tenham sido apresentados todos esses planos de informação. A consideração mais detalhada de todos os planos de informação é uma tarefa posterior, quando se pretenda fazer a escolha do local para instalação de uma central solar.

4. Mapas solarimétricos de Minas Gerais



Foto: CEMIG

4.1	MAPAS SOLARIMÉTRICOS DE MINAS GERAIS	57	4.2	ESTAÇÕES SOLARIMÉTRICAS	60
4.1.1	Introdução.....	57	4.2.2	Estações com heliógrafos	60
4.1.2	Critérios gerais para elaboração dos mapas.....	57	4.2.1	Estações com piranômetros	60
4.1.3	Filtragem	57	4.3	RADIAÇÃO SOLAR	61
4.1.4	Avaliação do recurso solar em Minas Gerais.....	58	4.4	INSOLAÇÃO.....	65

4.1 – Mapas Solarimétricos de Minas Gerais

4.1.1 Introdução

Quando se propõe a tarefa de elaborar um Atlas de um recurso renovável como a energia solar, pretende-se que o mesmo reflita, a partir das informações existentes, a distribuição global do mencionado recurso, deixando de lado nesta etapa, as particularidades próprias de pequena e média escala, perante as particularidades de macroescala.

Dentro das possibilidades oferecidas pelas informações disponíveis, busca-se compatibilizar a base de dados (de procedência muito diversa, tanto pelo instrumental com que foram obtidos quanto pela extensão espacial e temporal e tratamento a que foram submetidos) e determinar grandes zonas, bem diferenciadas, sem perder de vista o caráter preliminar do produto final.

Como consequência disso, devem aparecer regiões nas quais serão necessárias novas medidas que não se fizeram antes adequadamente, outras nas quais será conveniente aumentar a densidade das estações de medidas e outras em que será necessário revisar a instrumentação, a fim de compatibilizar os valores obtidos, ou racionalizar a sua distribuição, onde a cobertura espacial é excessiva. Estas situações ocorrem em todas as regiões do mundo, porque as redes de medição existentes não se encontram distribuídas espacialmente de modo apropriado e com simultaneidade temporal. É muito difícil, senão impossível, compatibilizar a necessidade ideal de informação (distribuição espacial ideal de estações) com a possibilidade real (econômica) de instalação e manutenção desta rede.

4.1.2 Critérios gerais para elaboração dos mapas

Para elaboração dos mapas solarimétricos os seguintes critérios gerais foram seguidos:

1. Considerando que os erros associados às medidas com piranômetros fotovoltaicos (sensores de segunda classe conforme a OMM) acoplados aos integradores eletrônicos com erros de calibração de 5% e com derivas de 2% ao ano e sem registros de recalibração, é realista admitir um erro do campo de medição da ordem de 10 a 15. O índice inferior é para um rede com boa manutenção e calibragem com frequência de 24 meses;
2. Foram levados em consideração valores médios da radiação solar obtidos em estados limítrofes;
3. Foram utilizados, como apoio complementar, cartas pluviométricas e mapas de cobertura vegetal do estado de Minas Gerais;
4. Os valores de radiação solar global diária média mensal e anual foram expressos em kWh/m².dia, unidade usual no setor de energia elétrica;
5. Como não era conhecida a qualidade dos dados de insolação obtidos com heliógrafos do tipo Campbell-Stokes, admitiu-se *a priori* uma confiabilidade igual para todos, considerando um erro não inferior a 15%;

Em função das considerações anteriores, foi estabelecido como espaçamento adequado entre isolinhas sucessivas o valor aproximado de 0,5 kWh/m².dia. Este valor corresponde ao erro instrumental de 10%, supondo o fundo de escala instrumental de 5,5 kWh/m² ou 18 MJ/m².

Da mesma forma, o espaçamento entre isolinhas de insolação foi fixado em 1 h/dia.



4.1.3 Filtragem

Os bancos de dados identificados e recuperados conforme a Tabela 3.2.2 do Capítulo 3 foram analisados e filtrados. O procedimento de filtragem inclui a observação manual dos dados e das condições das estações ao longo do tempo por experientes especialistas mineiros em meteorologia. Após os procedimentos de filtragem, os seguintes dados foram selecionados para a confecção dos mapas de radiação solar e insolação:

- 49 estações do banco de dados B1 (INMET, 2008-2010), em escala horária, por ser uma rede bem distribuída e recente e, por isso, provavelmente ainda calibrada;
- 31 estações do banco de dados B2 (INPE, 2008-2010) de radiação solar global e outras variáveis meteorológicas, medidas com estações automáticas para o período 2008/2010, pelo INPE. A fim de aumentar a densidade das estações consideradas e assegurar a continuidade espacial, foram consideradas 12 estações internas a Minas Gerais e 19 estações situadas em estados limítrofes;
- 6 estações do banco de dados B3 (CEMIG, 2008-2010) de radiação solar global e outras variáveis meteorológicas, medidas com estações automáticas em escala diária pela CEMIG (apenas parcialmente, uma vez que, de acordo com a experiência acumulada dos meteorologistas, algumas não eram confiáveis, por exemplo, pela mudança de local);
- Banco de dados B (INMET, 1960-2010) de insolação diária média mensal, medida com heliógrafos Campbell-Stokes no período 1960-2010. Mesmo com muitas falhas, principalmente em tempos mais recentes, é a única com tal abrangência temporal e espacial.

O banco de dados B4 (CEMIG, 1985-1985) de radiação solar global diária média mensal, embora medida com piranômetros termoeletrônicos, foi descartado, porque a série temporal e curta e antiga e a cobertura espacial é relativamente baixa.

4.1 – Mapas Solarimétricos de Minas Gerais

Os *outliers* foram identificados mediante o treinamento de uma rede neural artificial para estabelecer as relações funcionais entre as radiações mensais e variáveis espaciais (latitude, longitude e altitude). Foram considerados *outliers* os dados de radiação com uma variação interanual acima de 15%. Então, os dados originais foram substituídos pelos estimados apenas no caso de existência desses *outliers*.

4.1.4 Avaliação do recurso solar em Minas Gerais

As cartas de isolinhas de radiação solar global diária média mensal e anual descrevem de forma adequada os dados disponíveis em Minas. Considerando as características das informações existentes, as cartas preparadas constituem o conjunto mais atualizado e de melhor qualidade elaborado sobre o recurso solar em Minas Gerais.

As cartas de radiação solar mensal mostram claramente, para cada mês, regiões bem diferenciadas e razoavelmente correlacionadas com as condições pluviométricas e horas de insolação correspondentes.

As regiões desérticas do mundo são as mais bem dotadas de recurso solar. Assim a região da cidade de Dongola, localizada no Deserto Árábico, no Sudão, e a região de Dagget no Deserto de Mojave, Califórnia, Estados Unidos, são exemplos de localidades excepcionalmente bem servidas de radiação solar. Para efeito de comparação, são mostrados na Tabela 4.1.1 os valores de radiação solar diária média mensal, máxima, mínima e anual para estas duas localidades e algumas outras do Brasil, particularmente de Minas Gerais, conforme Figura 4.1.3.2. Como pode ser visto nessa tabela, as áreas localizadas no Norte de Minas Gerais (microrregiões de Pirapora, Januária, Montes Claros e Janaúba) têm valores da radiação solar diária, média anual comparáveis às melhores regiões do mundo, como por exemplo, Dagget. Além disso, as variações sazonais para Norte de Minas Gerais são menores, o que poderá resultar em importantes vantagens técnicas e econômicas dos sistemas solares instalados nessas região.

Localidade	Latitude	H _h (mínimo) (kWh/m ²)	H _h (máximo) (kWh/m ²)	H _h (anual) (kWh/m ²)	H _h (max.) / H _h (min.)
Dongola – Sudão	19°10'	5,3 (Dez)	7,7 (Mai)	6,6	1,4
Dagget – EUA	34°52'	2,2 (Dez)	8,7 (Jun)	5,8	4,0
Belém – PA – Brasil	1°27'	3,9 (Fev)	5,5 (Ago)	4,9	1,4
Florianópolis – PI – Brasil	6°46'	4,7 (Fev)	6,2 (Set)	5,5	1,3
Petrolina – PE – Brasil	9°23'	4,5 (Jun)	6,3 (Out)	5,5	1,4
Bom Jesus da Lapa – BA – Brasil	13°15'	4,4 (Jun)	5,9 (Out)	5,5	1,3
Cuiabá – MT – Brasil	15°33'	4,1 (Jun)	5,6 (Out)	5,0	1,4
Montalvânia – MG – Brasil	14°25'	5,1 (Abr)	7,1 (Jan)	6,1	1,4
Espinosa – MG – Brasil	14°55'	4,8 (Jun)	6,9 (Jan)	5,8	1,4
Mocimbuco – MG – Brasil	15°03'	4,9 (Jun)	6,8 (Fev)	5,8	1,4
São Romão – MG – Brasil	16°22'	5,0 (Jun)	6,8 (Fev)	5,9	1,4
Belo Horizonte – MG – Brasil	19°53'	4,1 (Jun)	5,5 (Fev)	5,0	1,4
Porto Alegre – RS – Brasil	30°1'	2,3 (Jun)	6,1 (Dez)	4,2	2,7

Tabela 4.1.1: Comparação dos dados de radiação solar diária média mensal para diversas localidades do Mundo e do Brasil

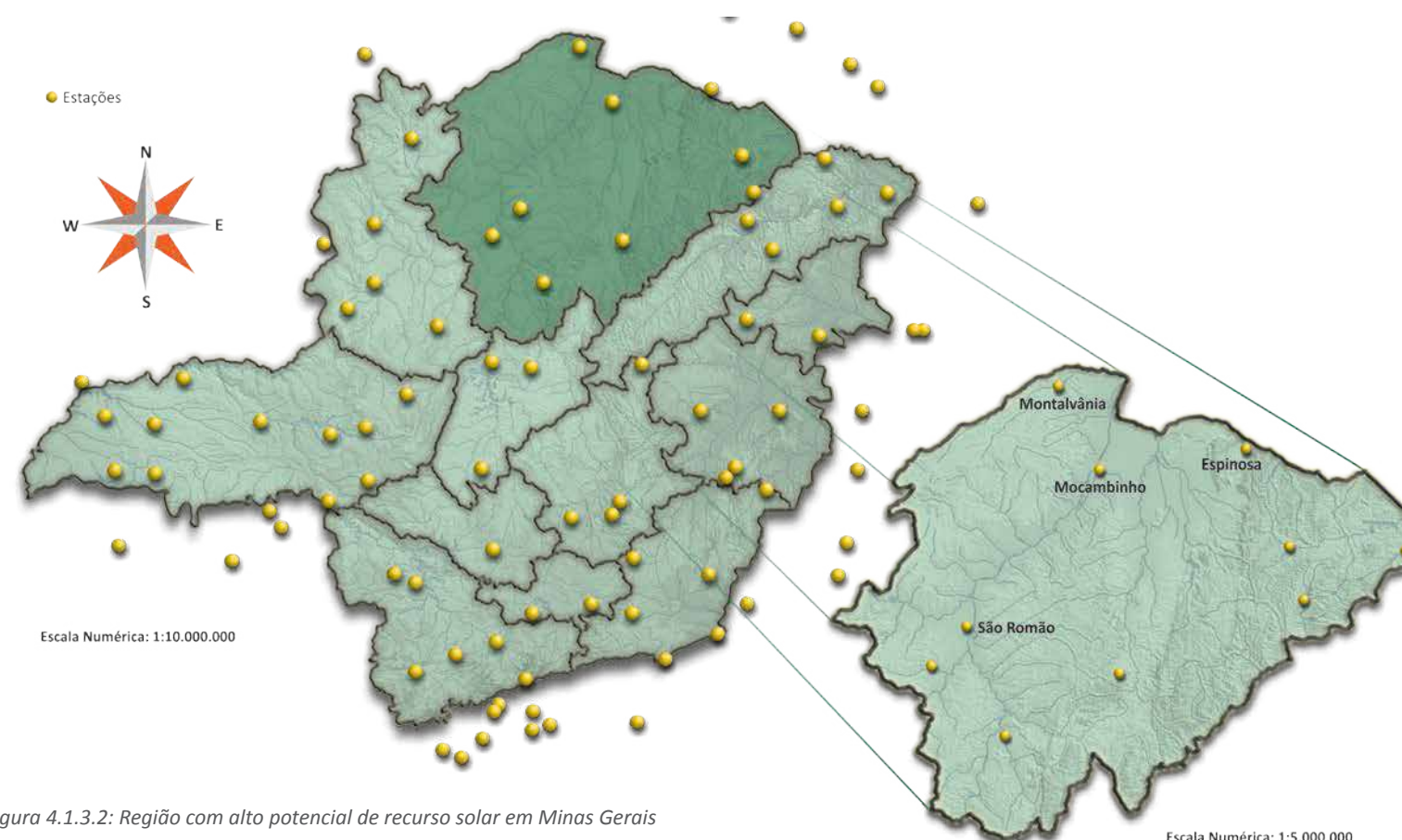


Figura 4.1.3.2: Região com alto potencial de recurso solar em Minas Gerais

4.1 – Mapas Solarimétricos de Minas Gerais

O mapa da radiação solar global diária média anual elaborado neste projeto mostra que esta grandeza sobre o estado de Minas Gerais varia de 4,5 a 6,5 kWh/m². Os valores máximos ocorrem na região Norte de Minas Gerais e os mínimos na região Sudeste, onde se encontram as áreas de maior altitude (Serra do Caparaó e Mantiqueira) e o regime pluviométrico é mais intenso, com totais anuais de precipitação superiores aos 1.400 mm. A massa de ar tropical marítima que atua entre o Brasil e a África é o principal fator climático que inibe a formação de nuvens e, conseqüentemente, a ocorrência de chuvas nas regiões norte e nordeste de Minas Gerais, caracterizadas por um clima semiárido, com precipitações anuais entre 600 e 800 mm e altitudes entre 400 e 600 m.

As cartas de radiação solar global diária média mostram que em Minas Gerais esta grandeza varia entre 3,0 e 7,5 kWh/m².dia, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, em que as estações solarimétricas registram uma intensidade de radiação na faixa de 3 a 4 kWh/m².dia. Verifica-se também neste trimestre que o centro de máxima (5 kWh/m².dia) ocorre sobre uma vasta região localizada no noroeste de Minas Gerais. A tendência de mínima (3 kWh/m².dia) ocorre no sul e sudeste do Estado, na região de Caparaó. Já no trimestre dezembro-janeiro-fevereiro, observa-se que as estações solarimétricas registram intensidades de radiação muito altas, atingindo um valor máximo de 7,5 kWh/m².dia. Neste período, ocorre um centro de máxima deste valor numa pequena região do noroeste de Minas Gerais, ao norte de Januária. Valores menores, mas ainda assim expressivos (muito bons), entre 6,0 e 7,0 kWh/m²/dia, ocorrem numa vasta área localizada acima do paralelo 18 (metade superior do Estado).

Também pode ser deduzido das cartas de isolinhas de radiação solar que os menores índices de nebulosidade (maior índice de radiação solar) se concentram nas regiões Leste e Zona da Mata, onde a circulação marítima deixa o tempo parcialmente nublado em quase todos os dias do ano.

Os mapas sazonais da insolação estão consistentemente correlacionados com a precipitação. No inverno (junho a agosto), quando o índice de precipitação é o menor do ano, o número de horas de brilho solar atinge os valores máximos entre 8,5 a 9,5 horas em uma vasta região da metade oriental do estado de Minas Gerais. De forma inversa, para o período de novembro a janeiro ocorre um máximo anual de precipitação e portanto um mínimo de horas de brilho solar, entre 5,0 e 6,0 horas por dia.

Finalmente convém ressaltar os seguintes aspectos importantíssimos para os usuários de informações sobre o recurso solar:

1. Os mapas de distribuição espacial de radiação solar diária média mensal representam apenas uma primeira aproximação do campo de energia solar disponível na superfície (observação espacial macro). Para informações locais deve-se recorrer às médias numéricas das respectivas estações solarimétricas;
2. As isolinhas de insolação diária média mensal e anual têm um caráter totalmente diferente das cartas de radiação solar: são apenas uma imagem gráfica dos dados que constam do banco de dados solarimétricos. Porém, a sua eventual conversão para radiação solar poderia tornar essas isolinhas em valiosa informação complementar dos mapas e banco de dados da radiação solar e;
3. Por fim, a escolha de local para instalar um sistema ou um conjunto de sistemas solares, mediante o uso de mapas de de isolinhas do Atlas (porque o valor médio do recurso solar parece adequado), tem um caráter indicativo preliminar que ressalta o potencial da região. Uma escolha definitiva necessitará de medidas detalhadas do recurso no local para determinar seu valor e principalmente a sua variabilidade temporal.

4.2 – Estações Solarimétricas

4.2.1 Estações com Piranômetros

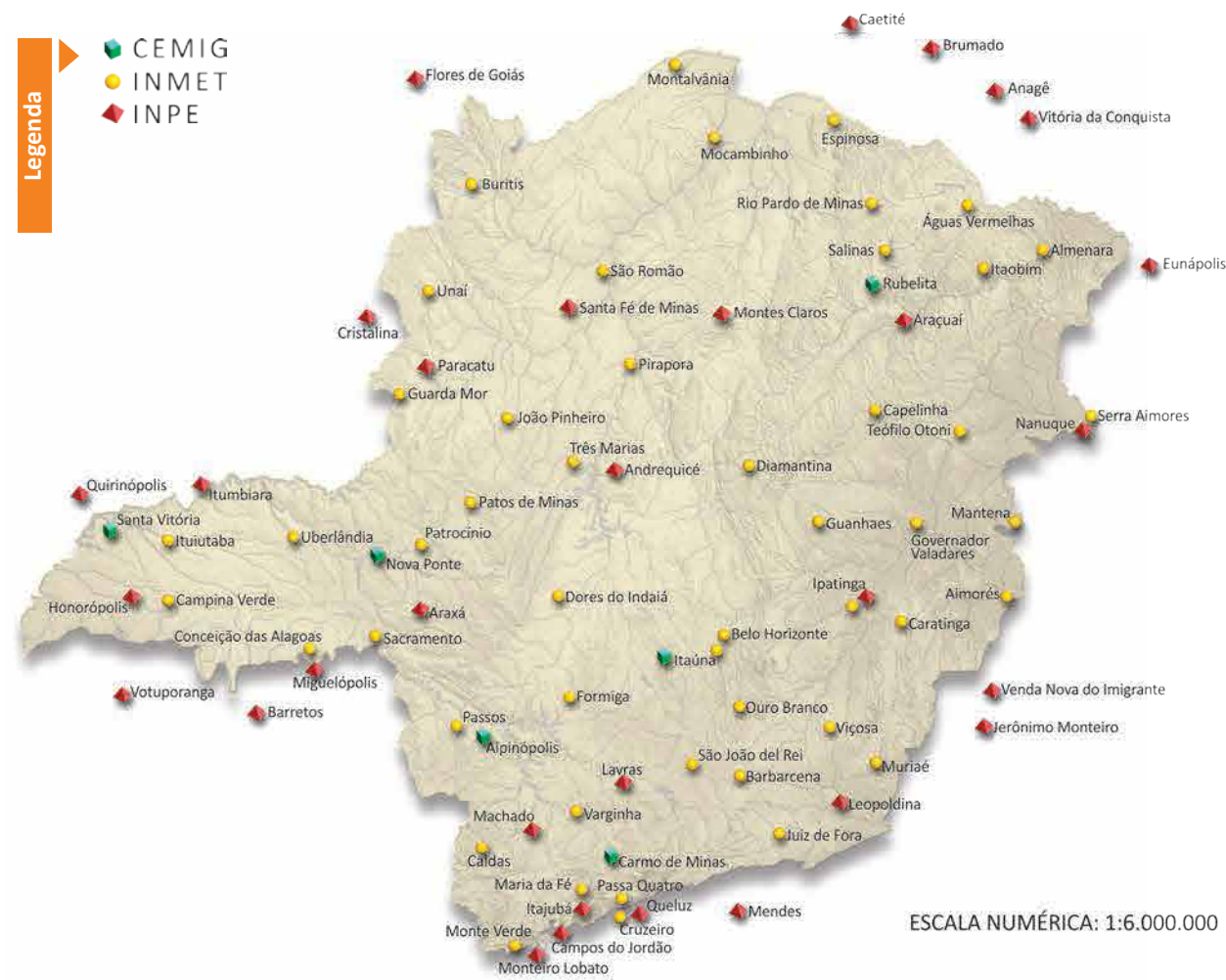


Figura 4.2.1: Estações com piranômetros
Fonte: CEMIG, INMET, INPE

4.2.2 Estações com Heliógrafos

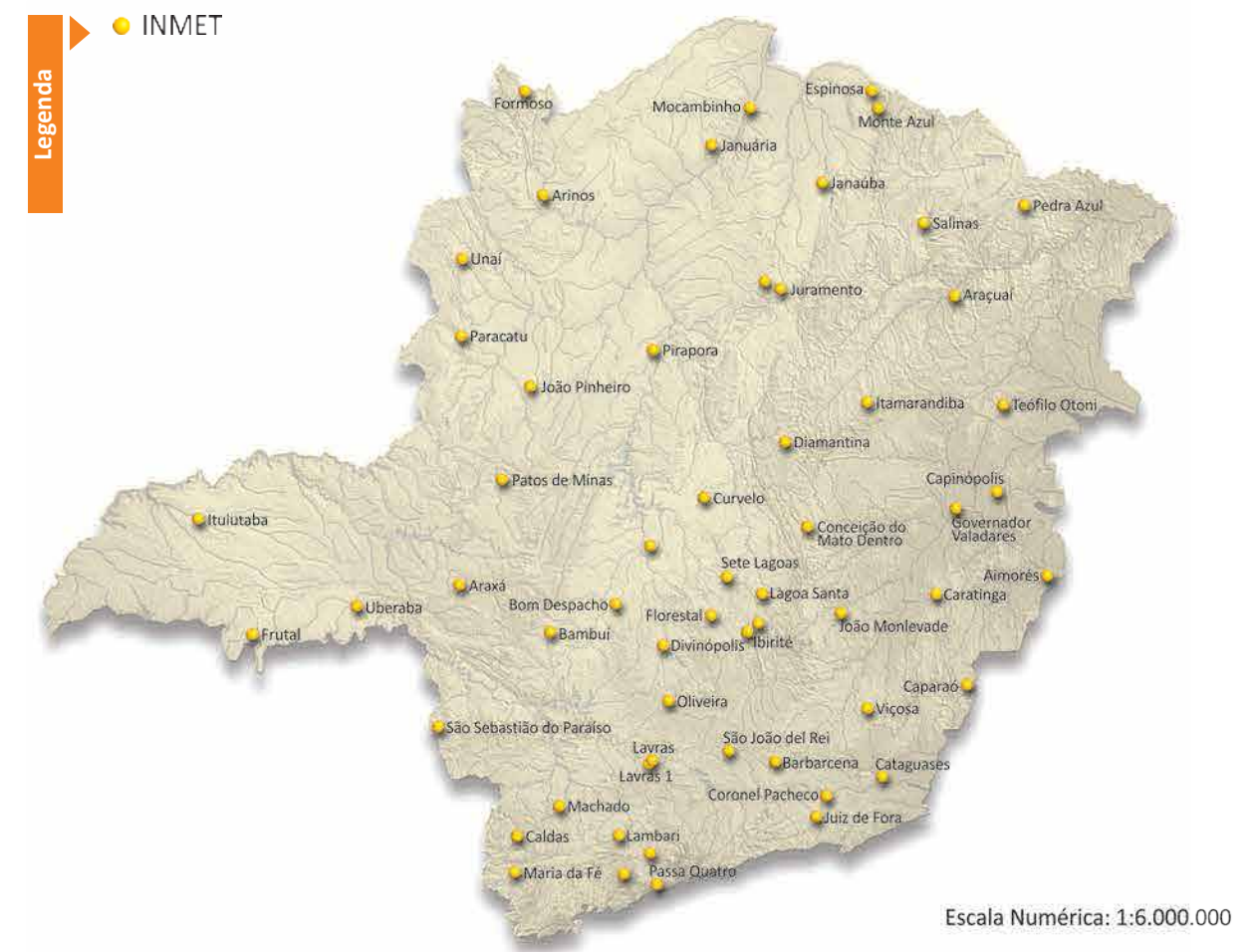
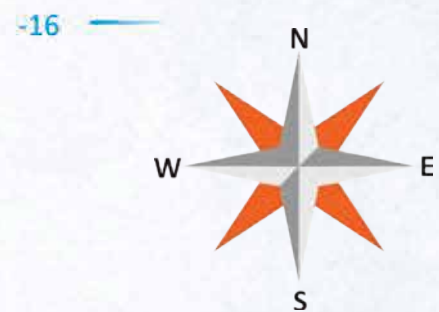
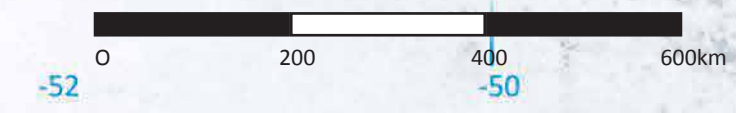
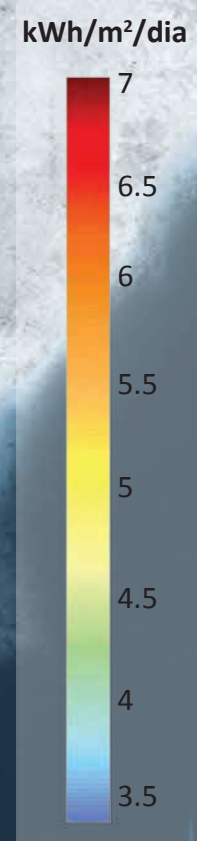


Figura 4.2.2: Estações com heliógrafos
Fonte: INMET

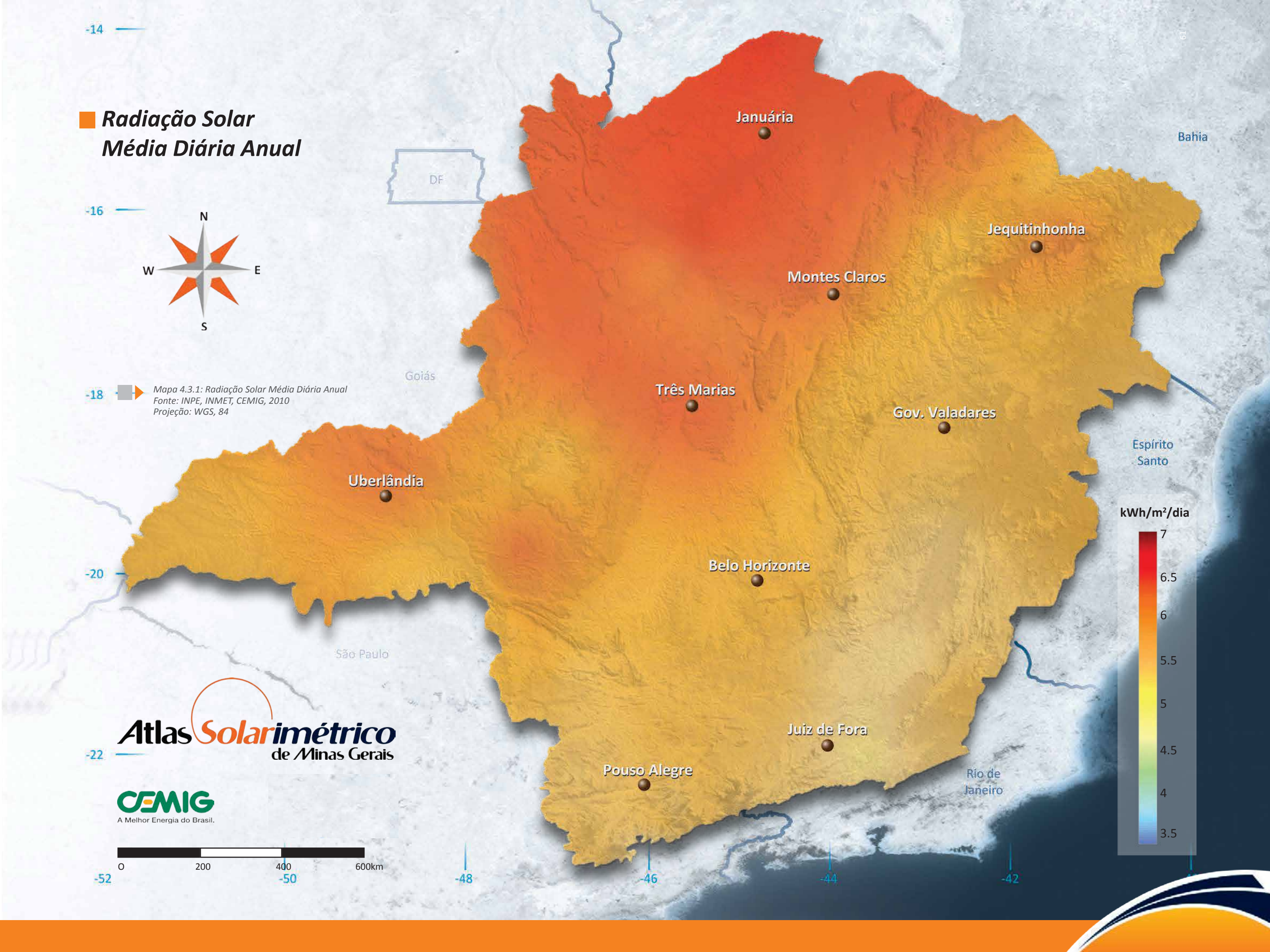
Radiação Solar Média Diária Anual



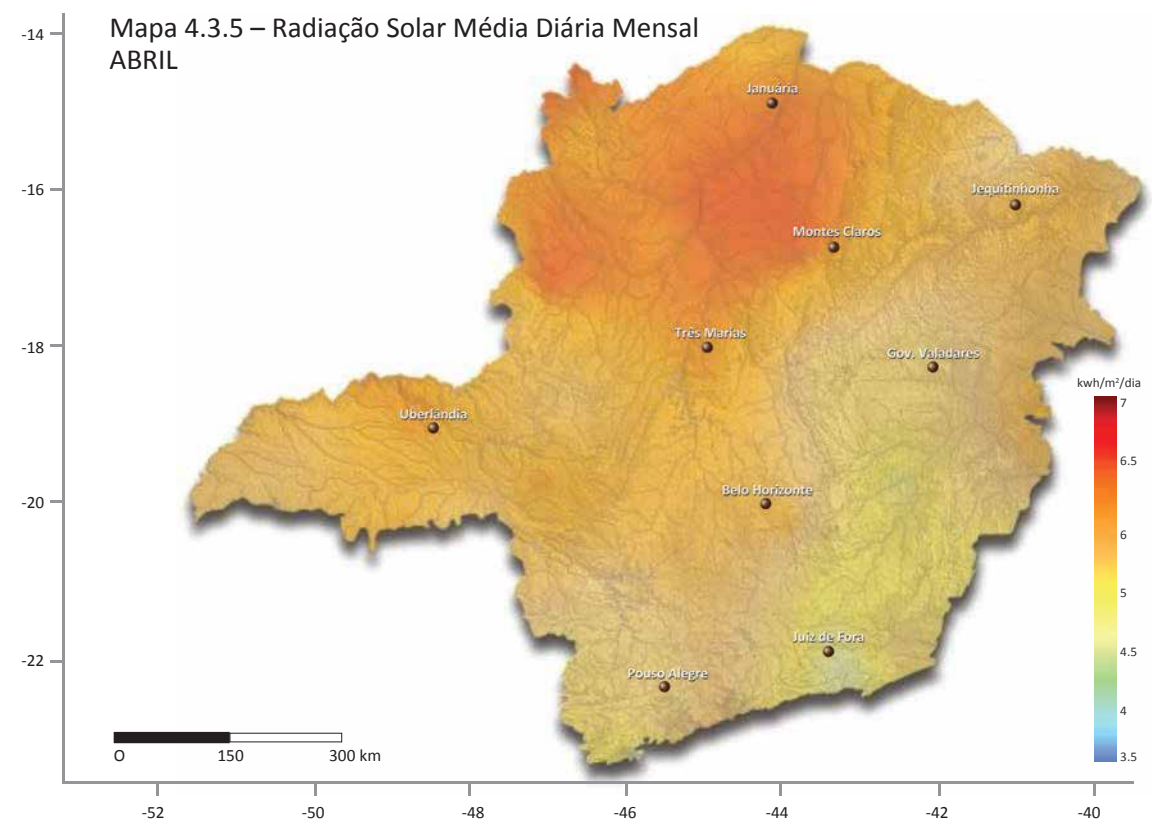
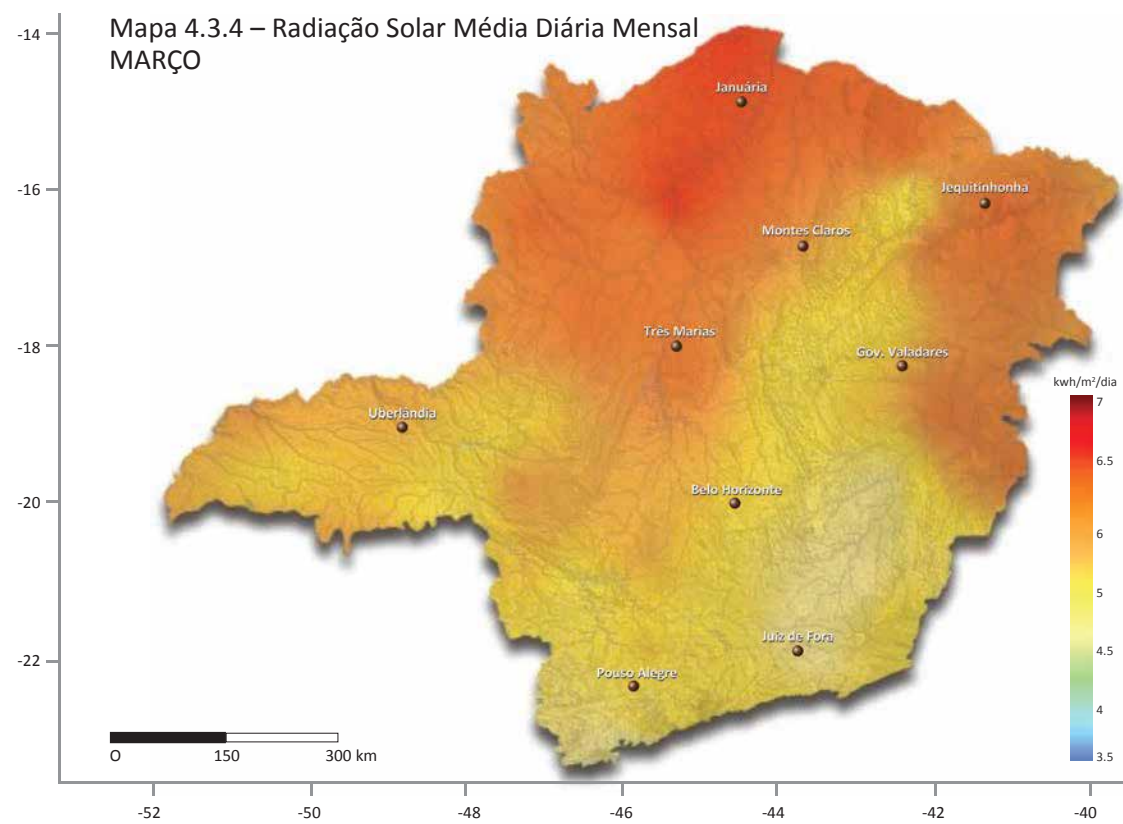
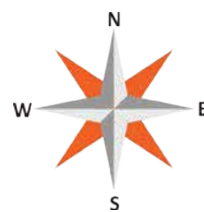
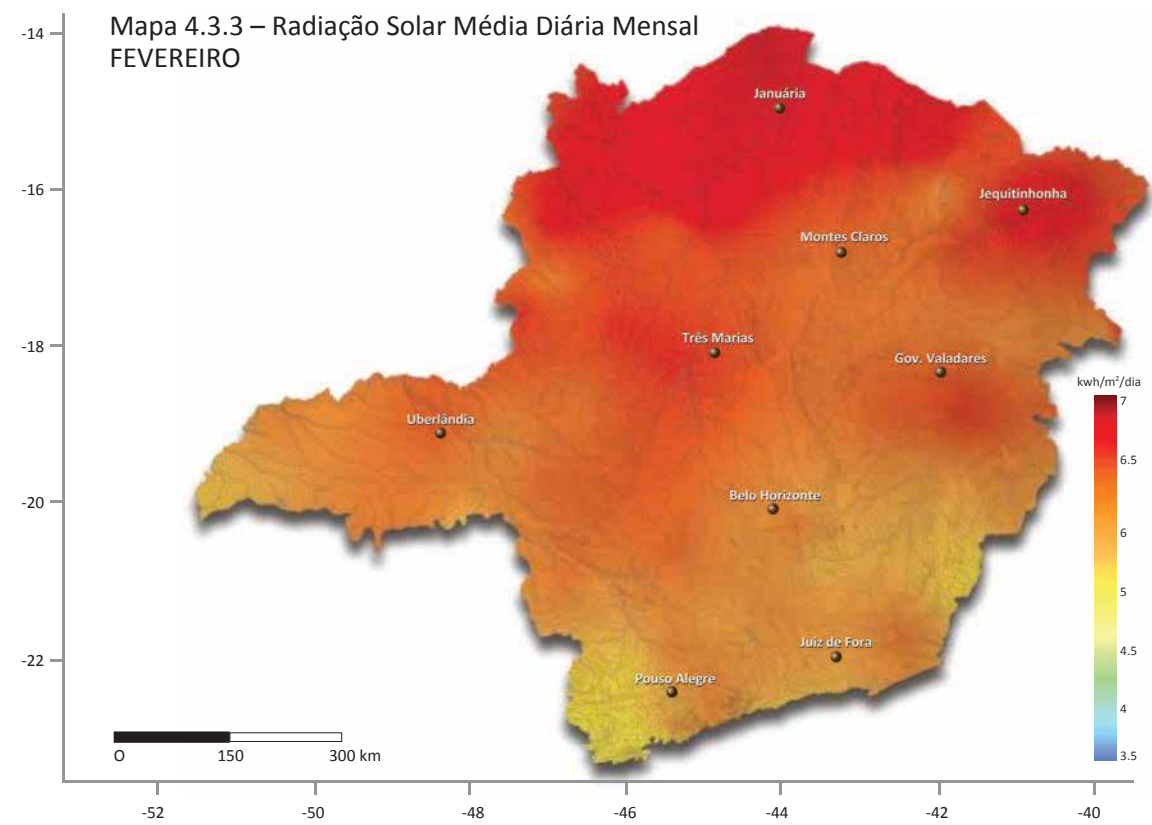
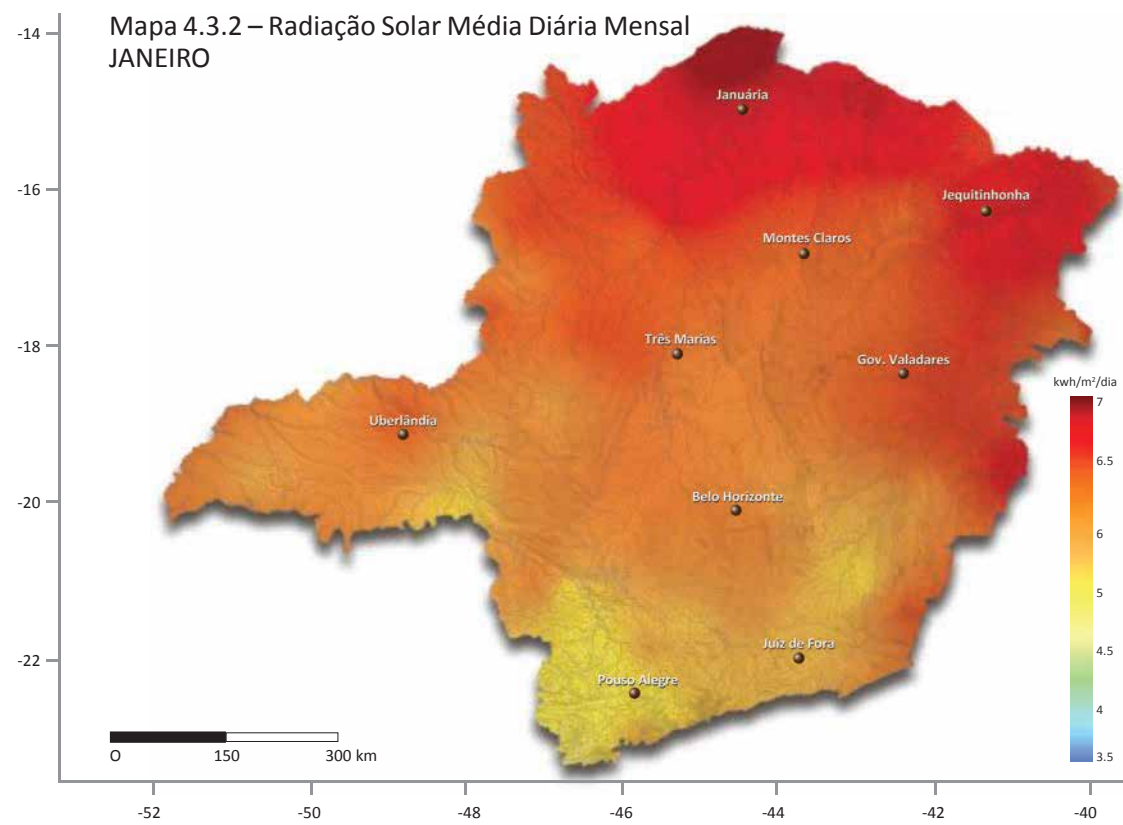
Mapa 4.3.1: Radiação Solar Média Diária Anual
Fonte: INPE, INMET, CEMIG, 2010
Projeção: WGS, 84



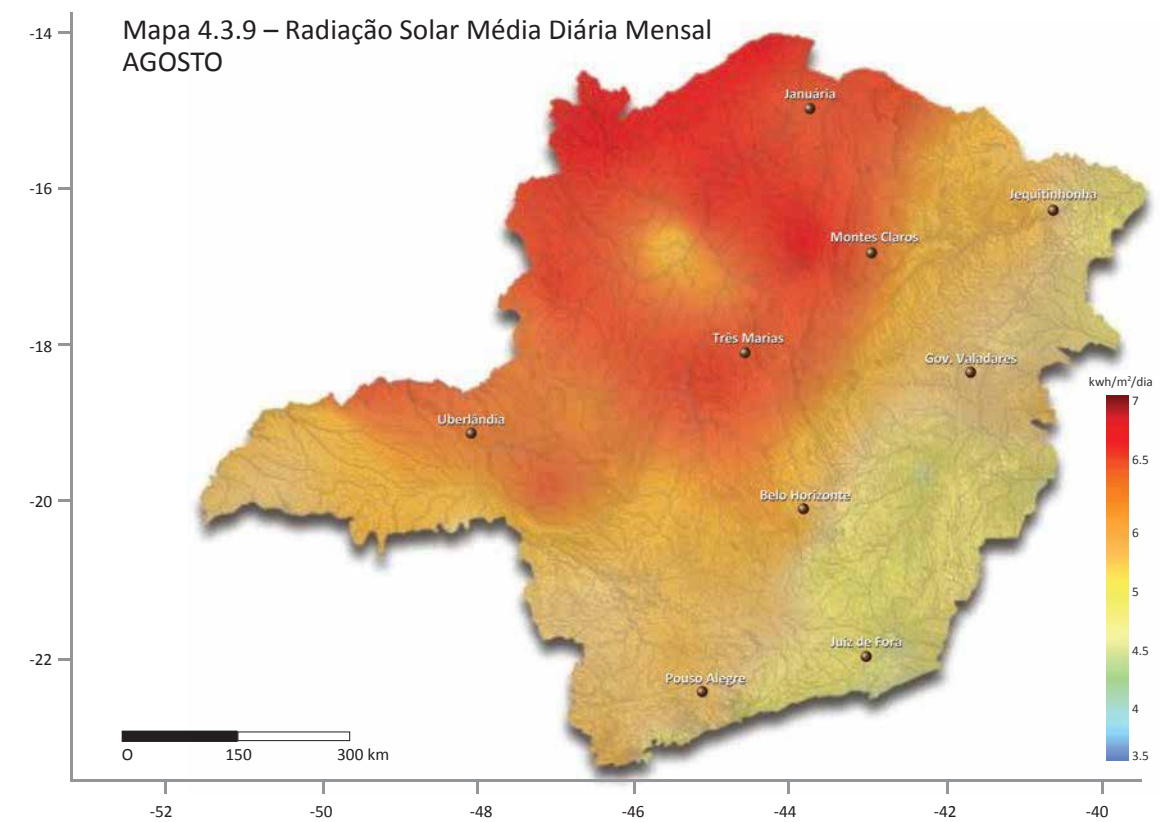
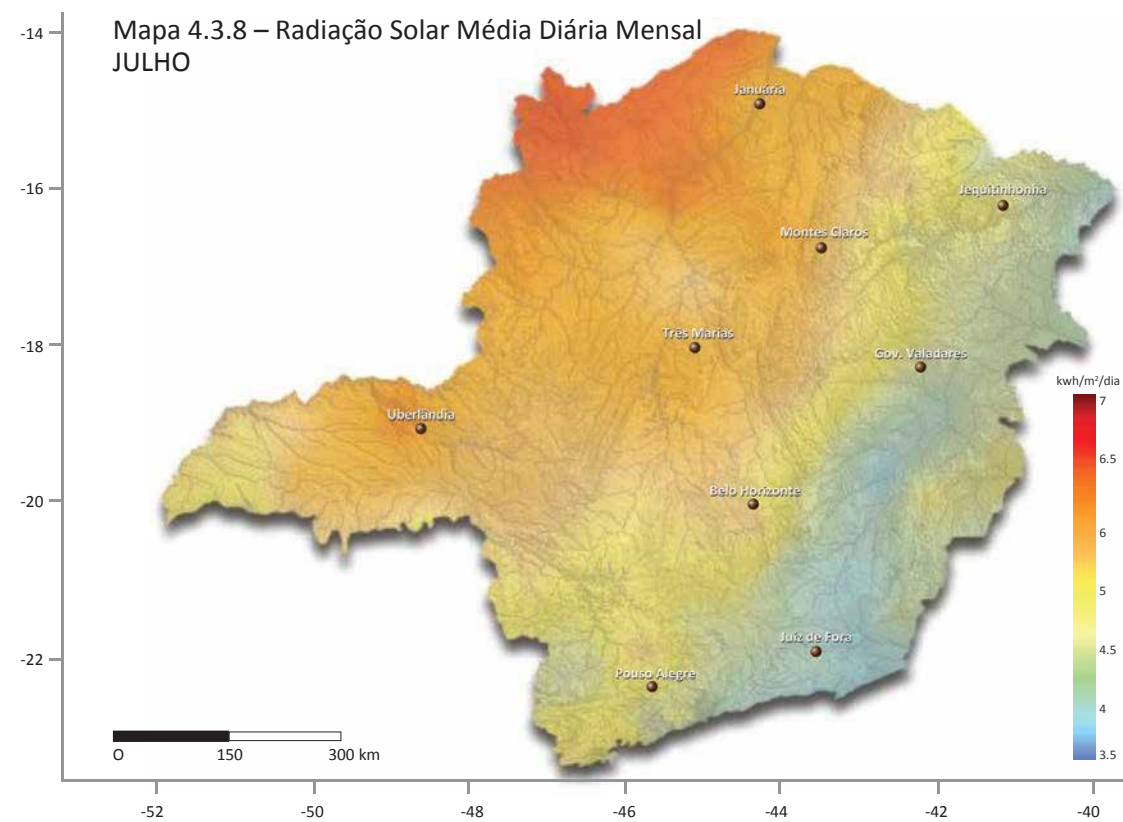
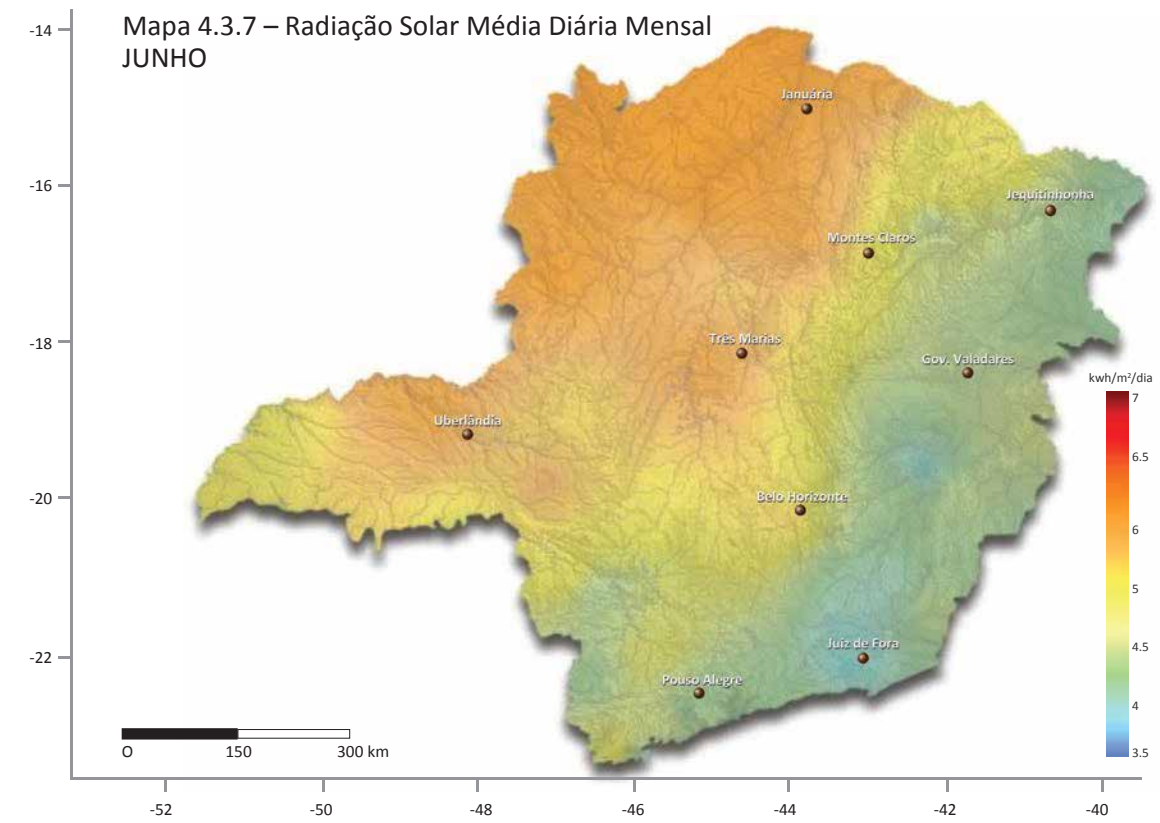
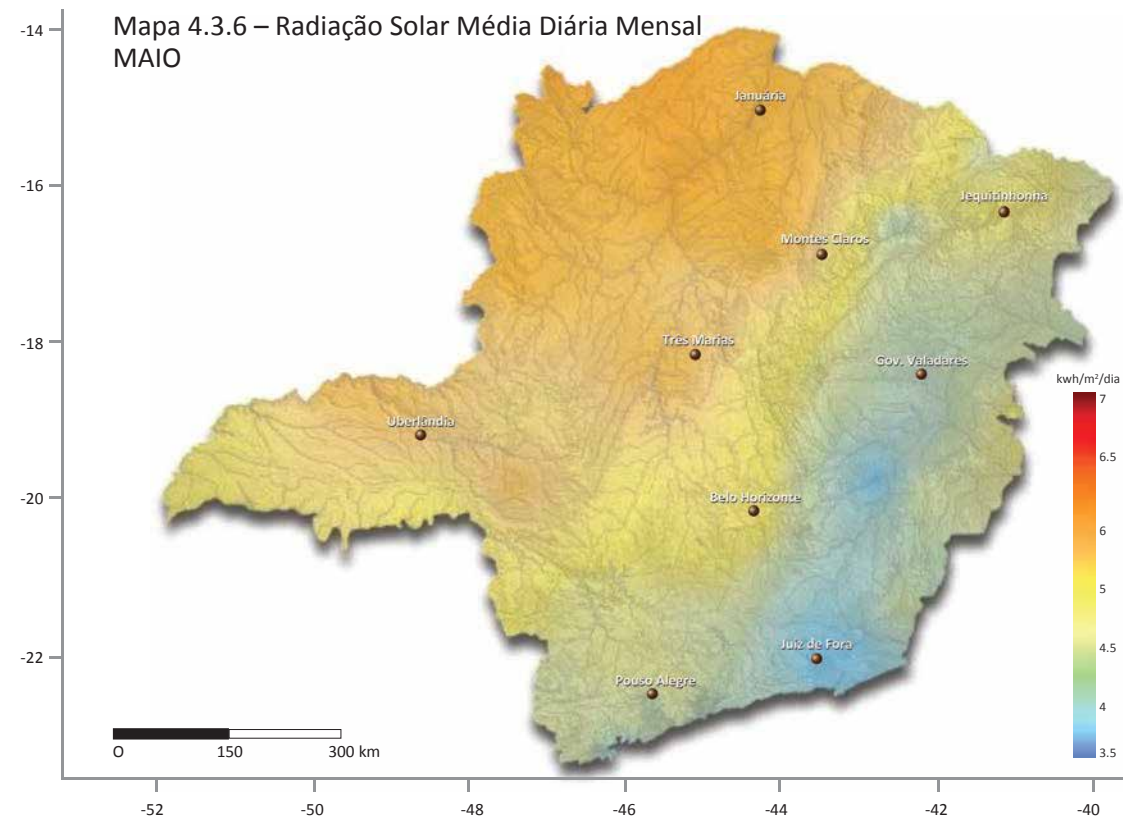
Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



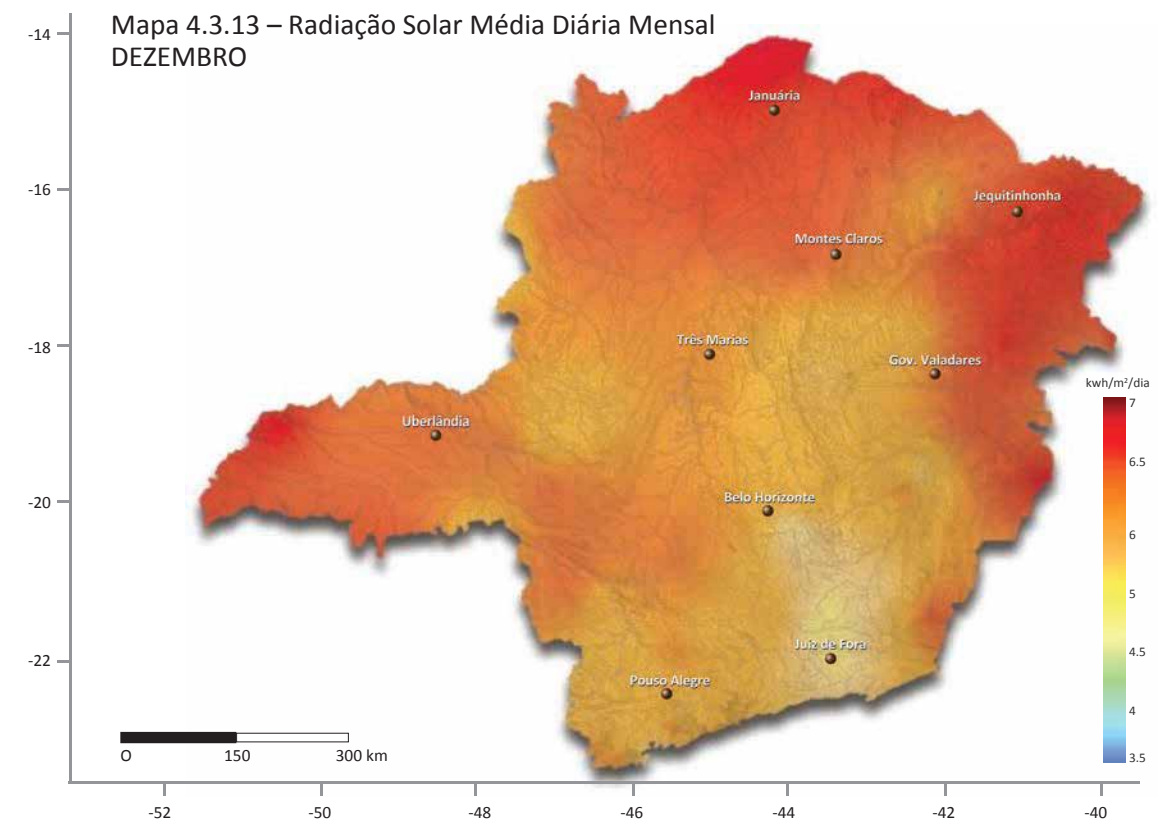
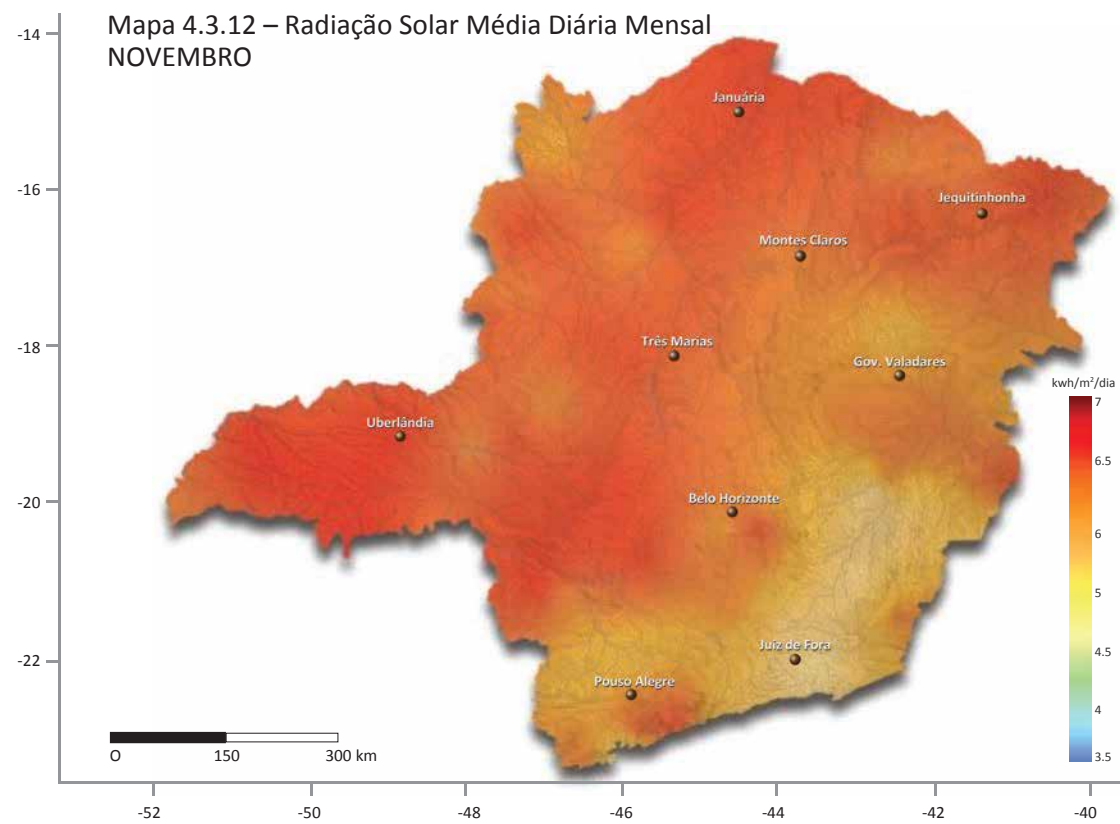
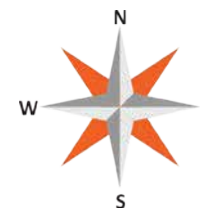
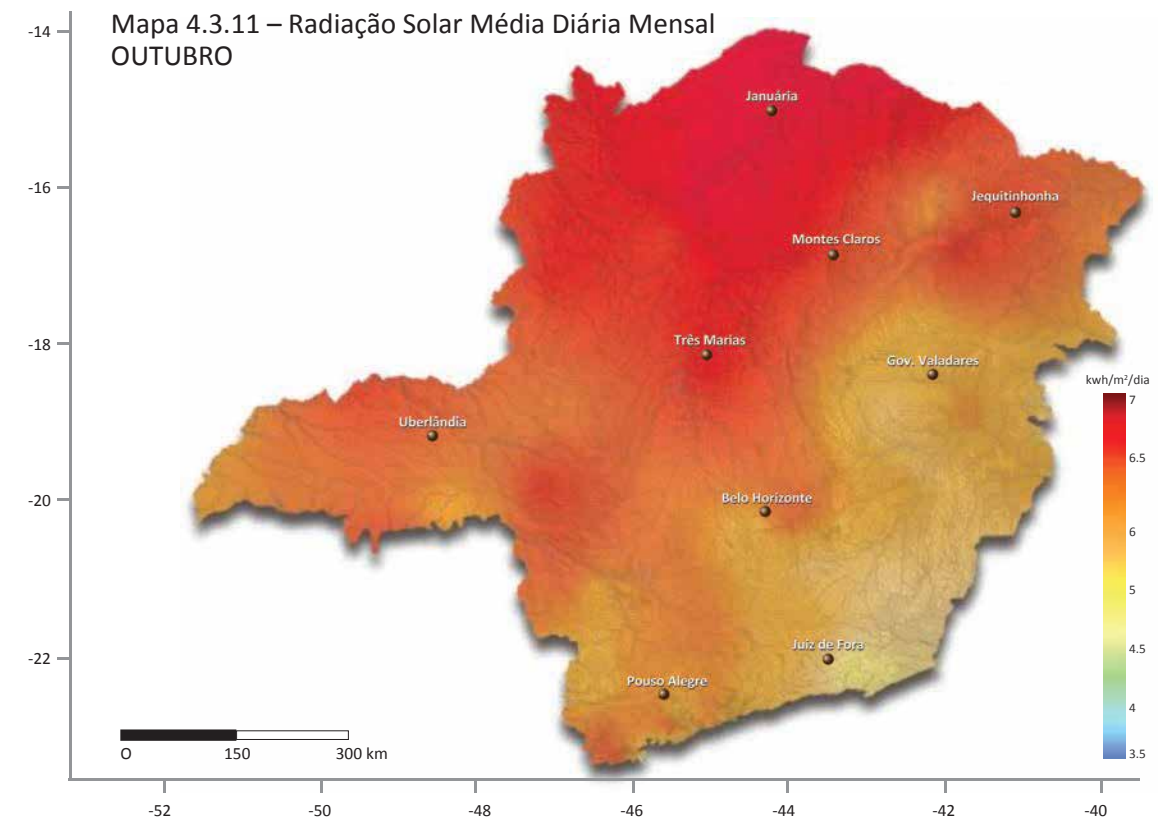
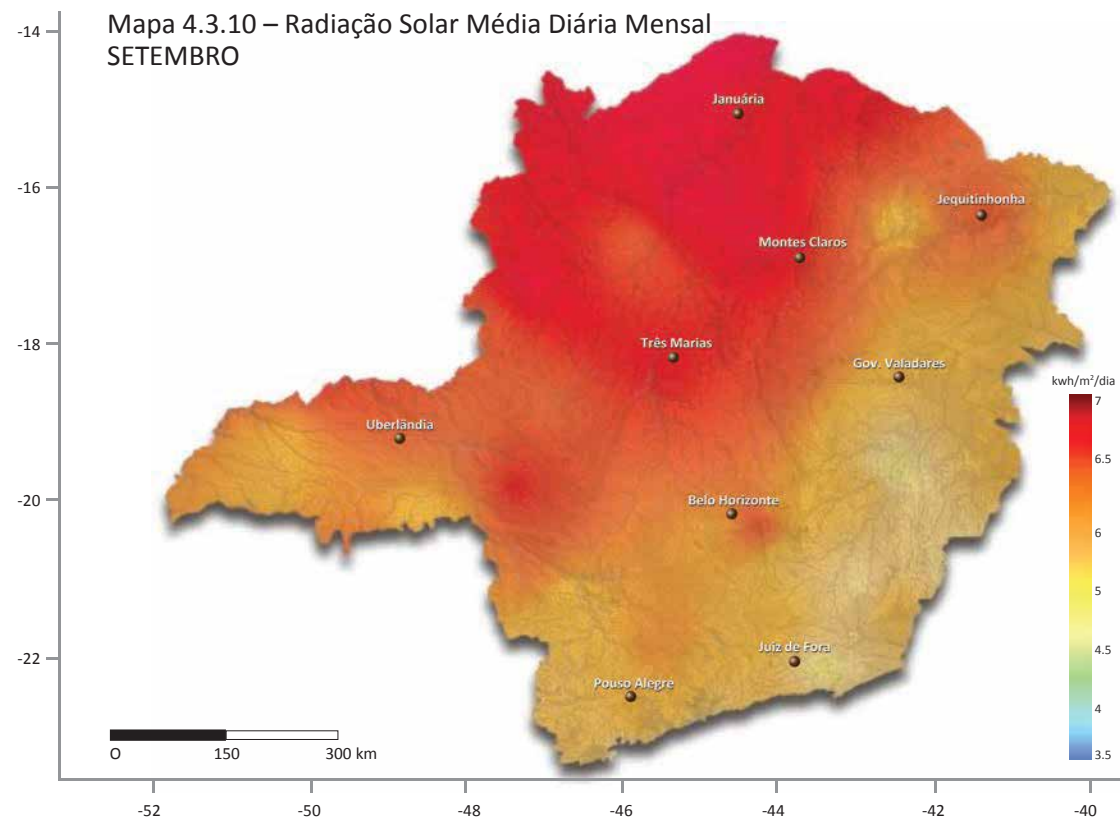
4.3 – Radiação



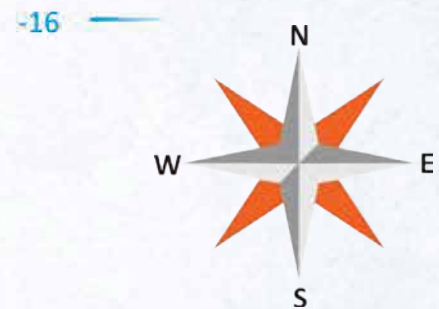
4.3 – Radiação



4.3 – Radiação

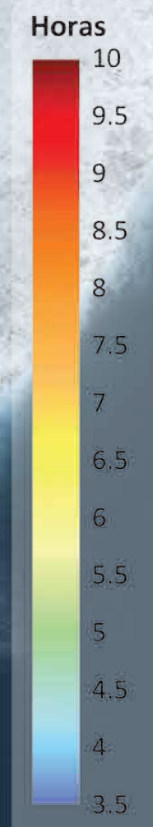


Insolação
Média Diária Anual



Mapa 4.4.1: Insolação Média Diária Anual
Fonte: INMET, 2010
Projeção: WGS, 84

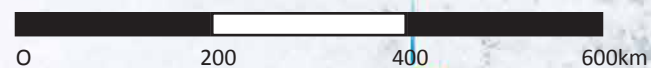
-14
-16
-18
-20
-22



Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



A Melhor Energia do Brasil.



-52

-48

-46

-44

-42

Bahia

Goiás

Espírito Santo

São Paulo

Rio de Janeiro

Januária

Jequitinhonha

Montes Claros

Três Marias

Gov. Valadares

Uberlândia

Belo Horizonte

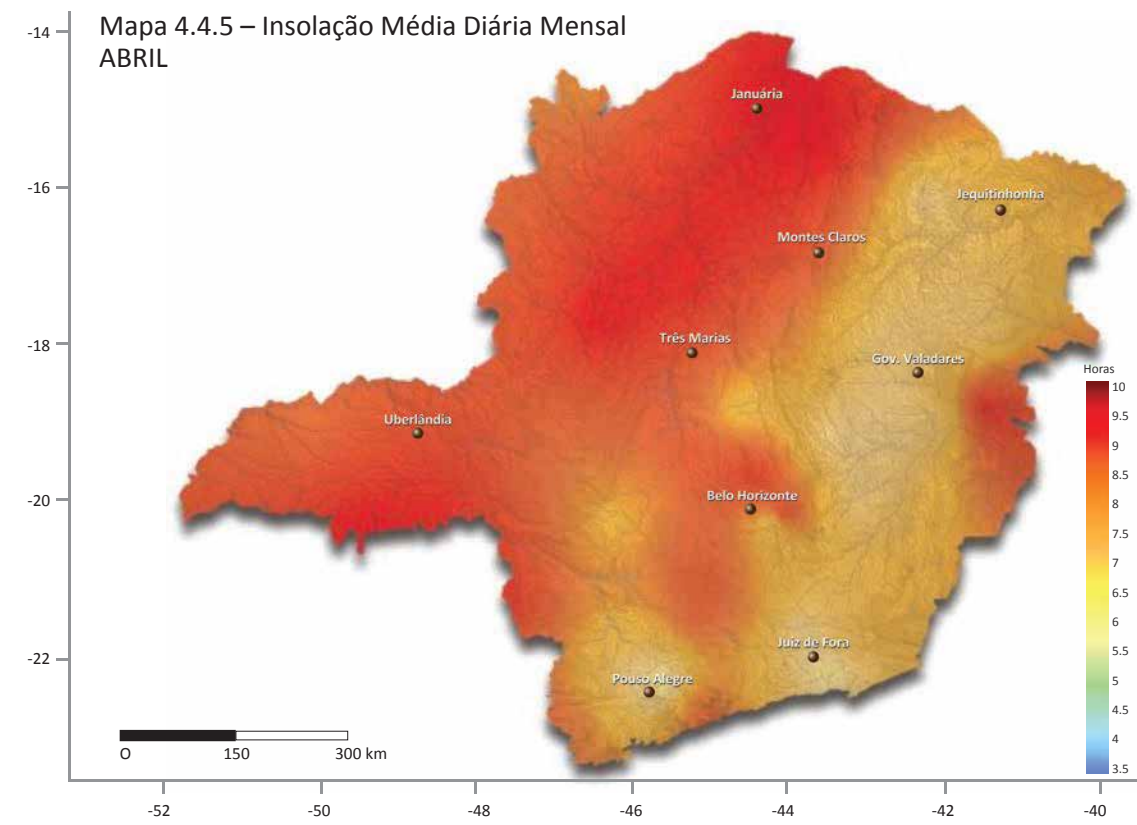
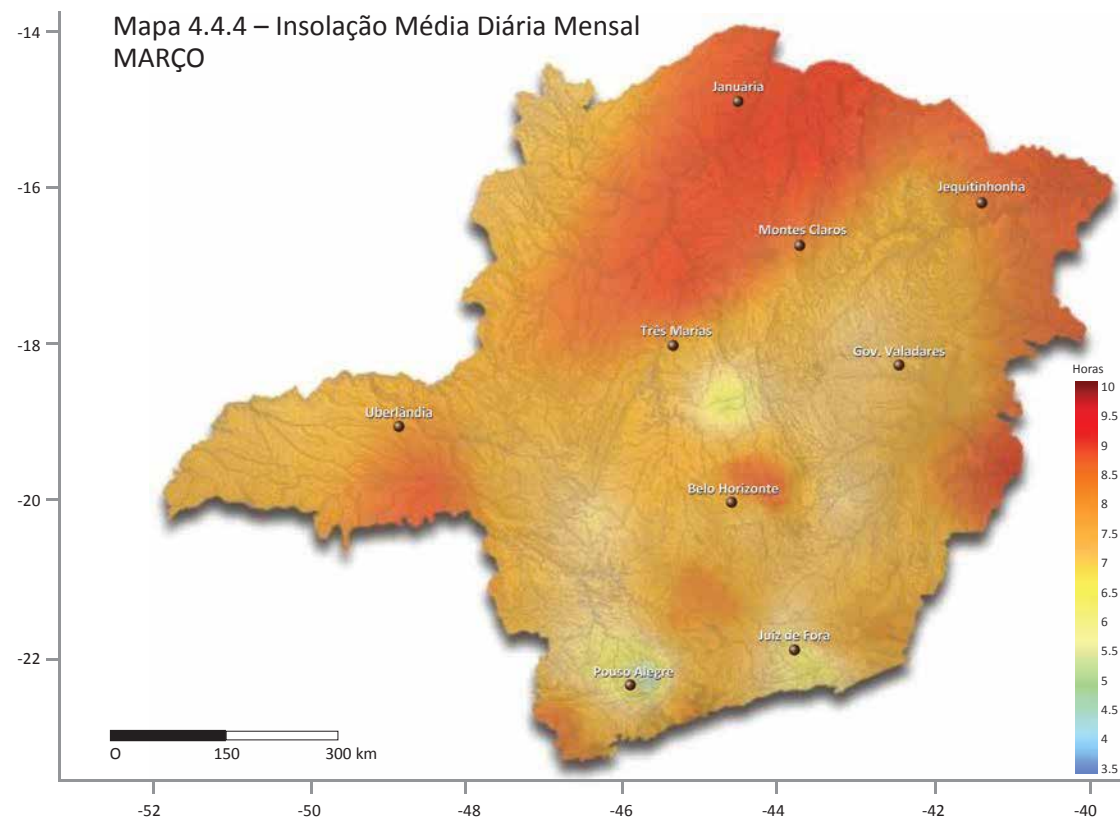
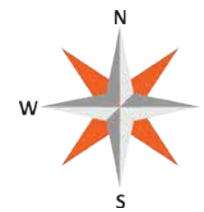
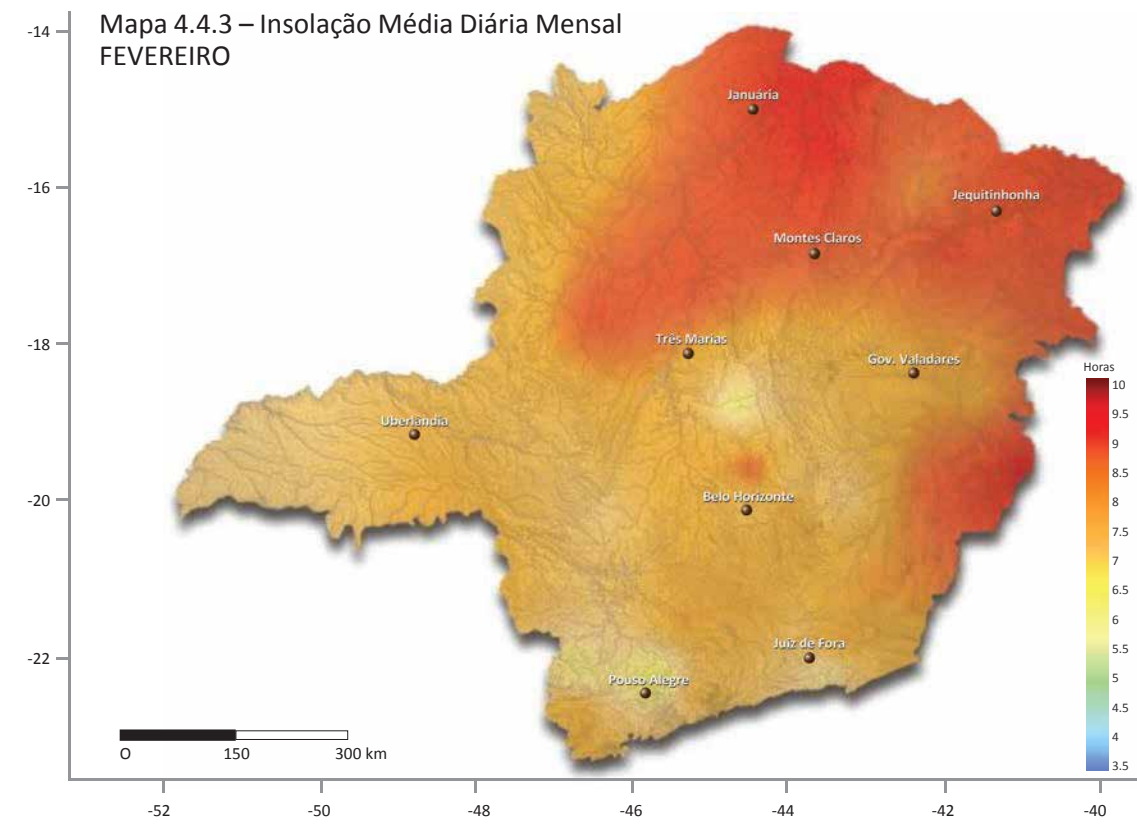
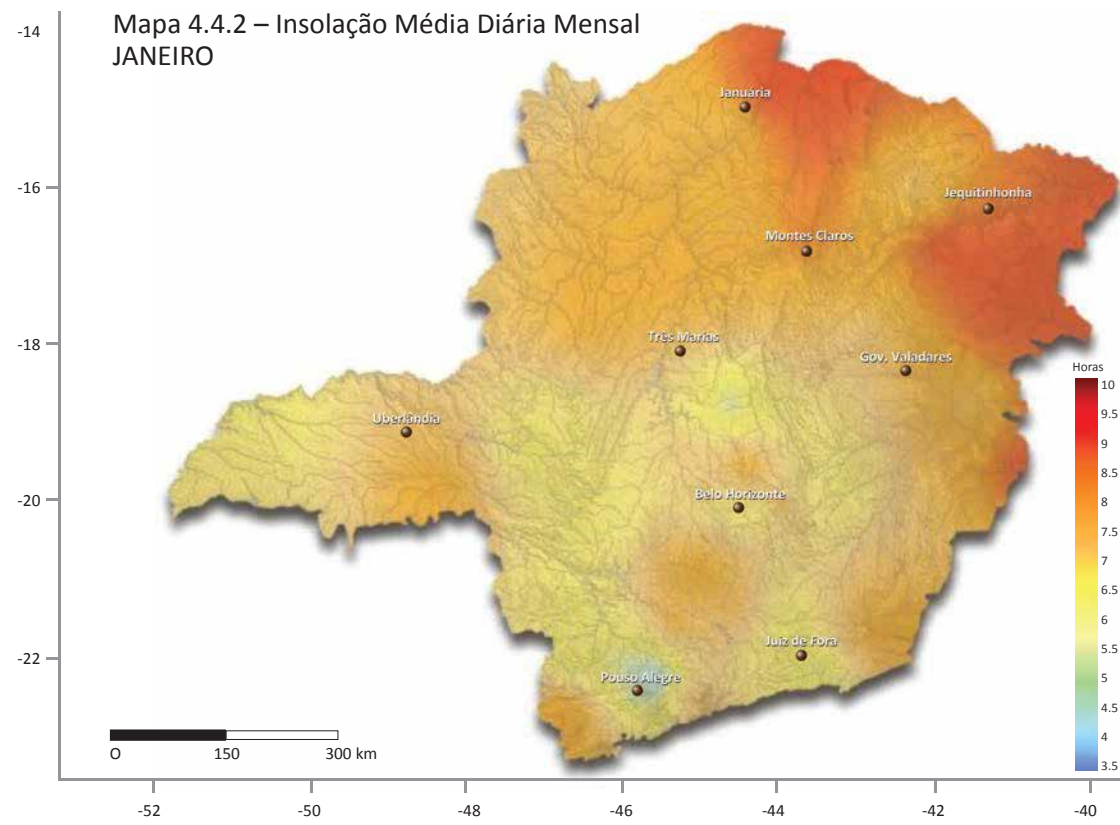
Juiz de Fora

Pouso Alegre

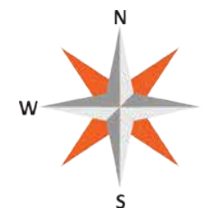
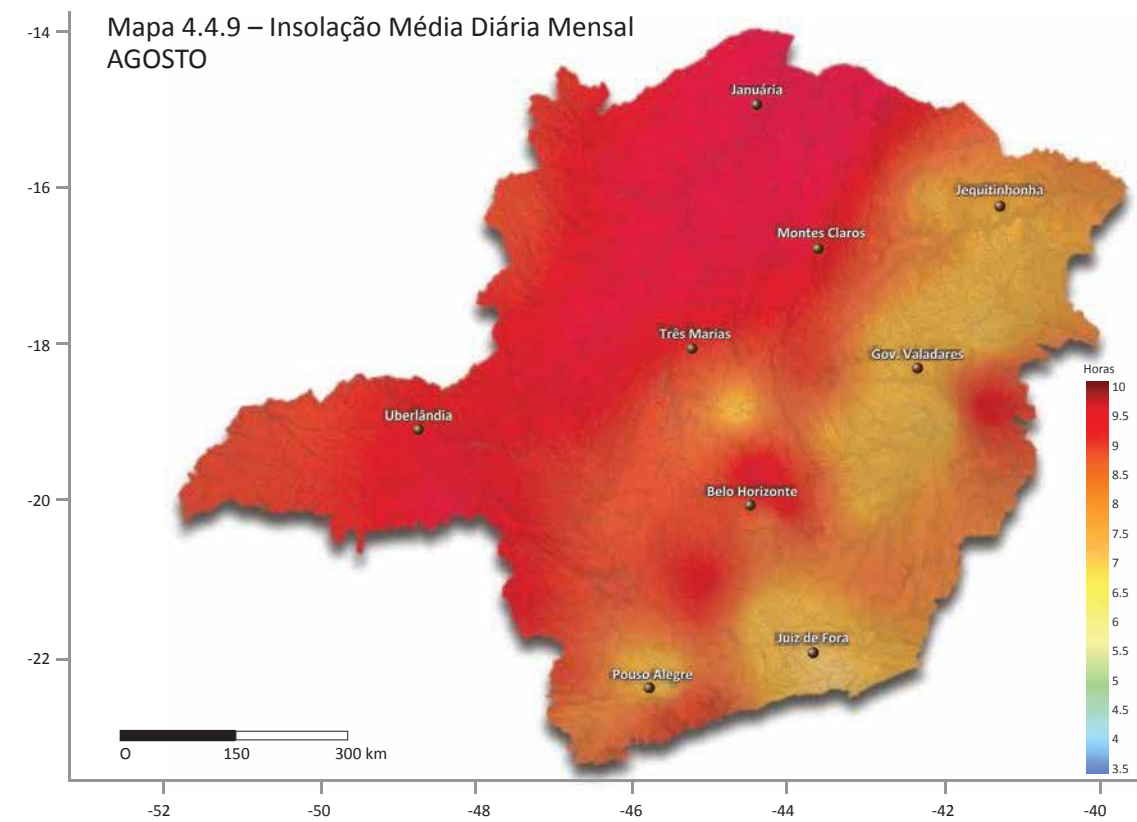
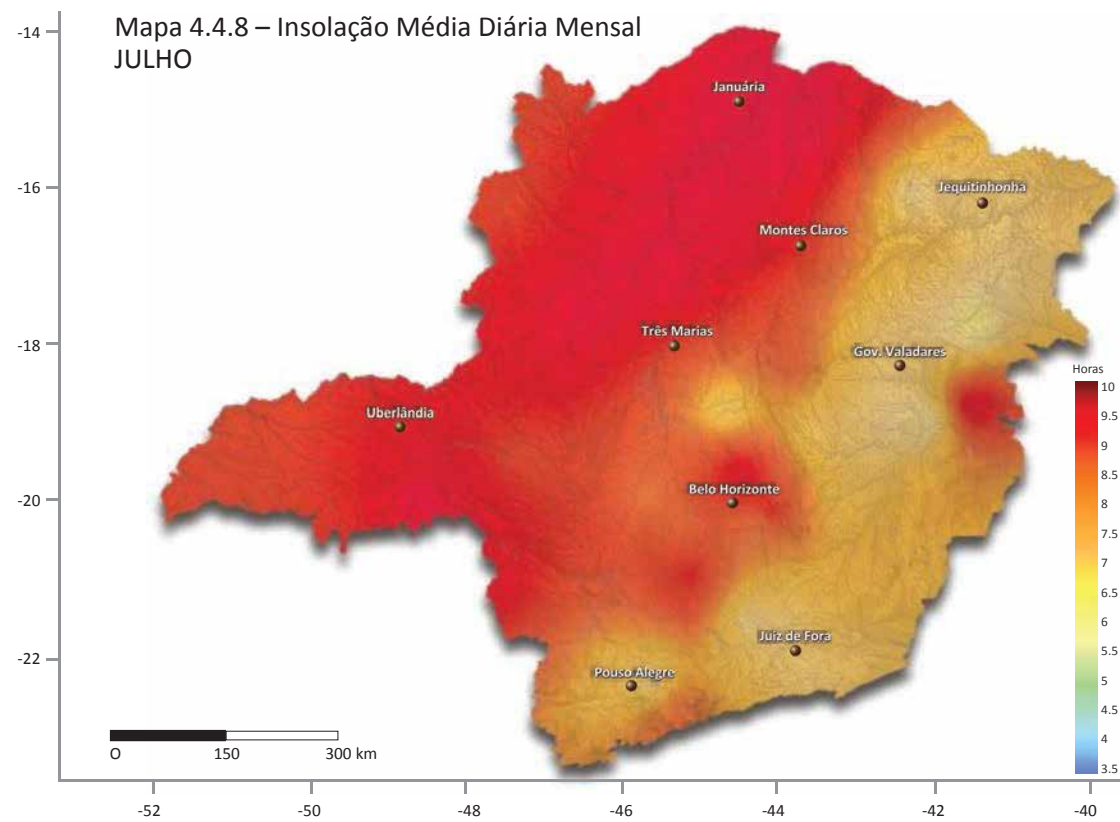
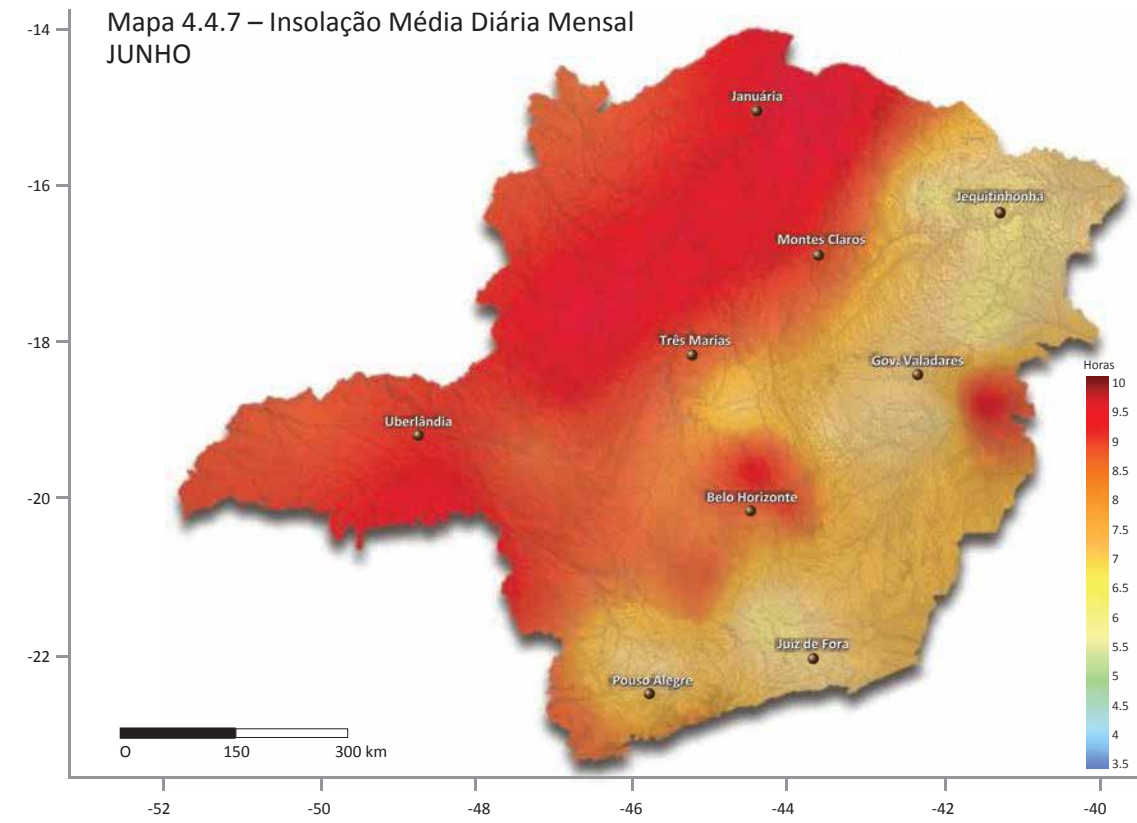
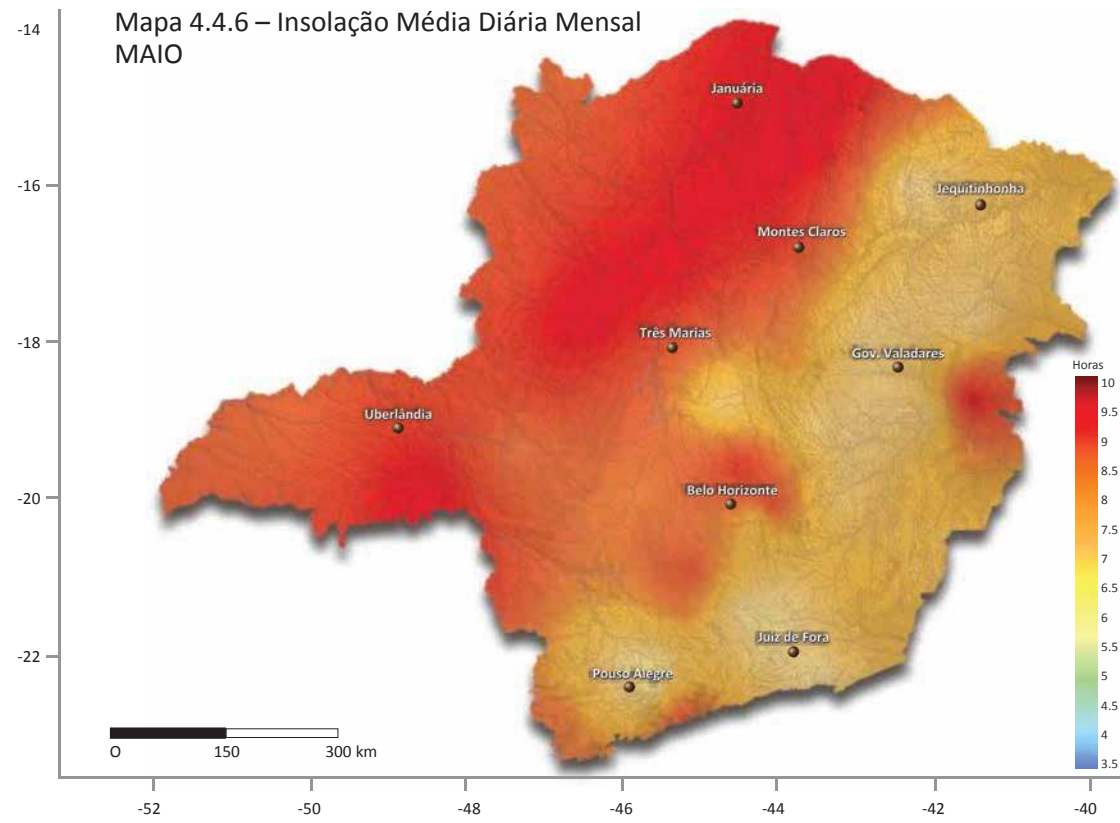
65

DF

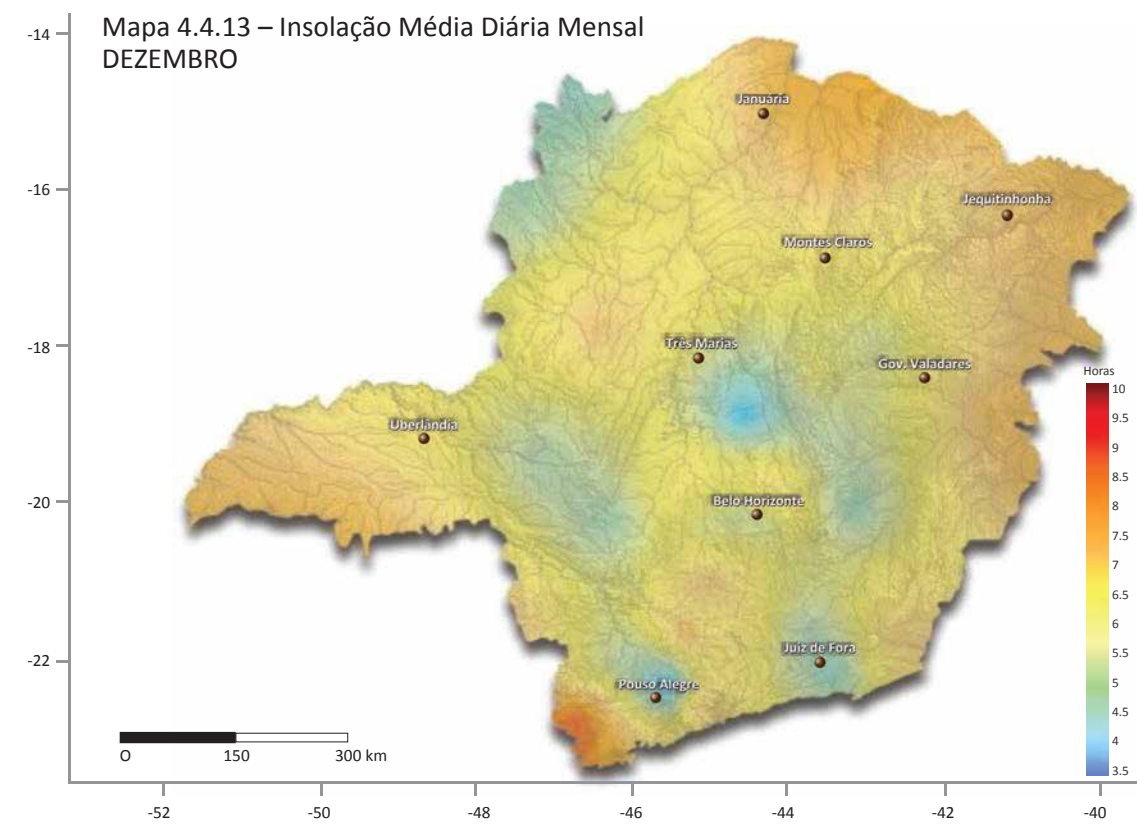
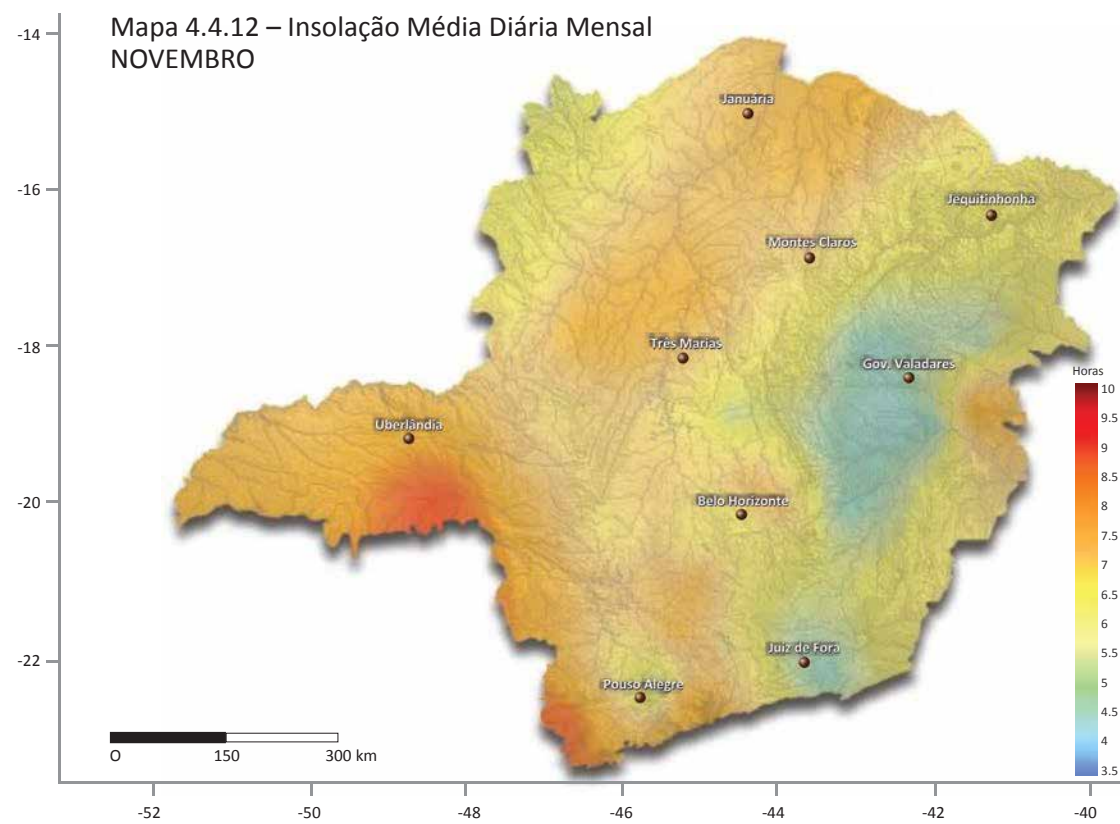
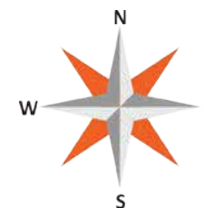
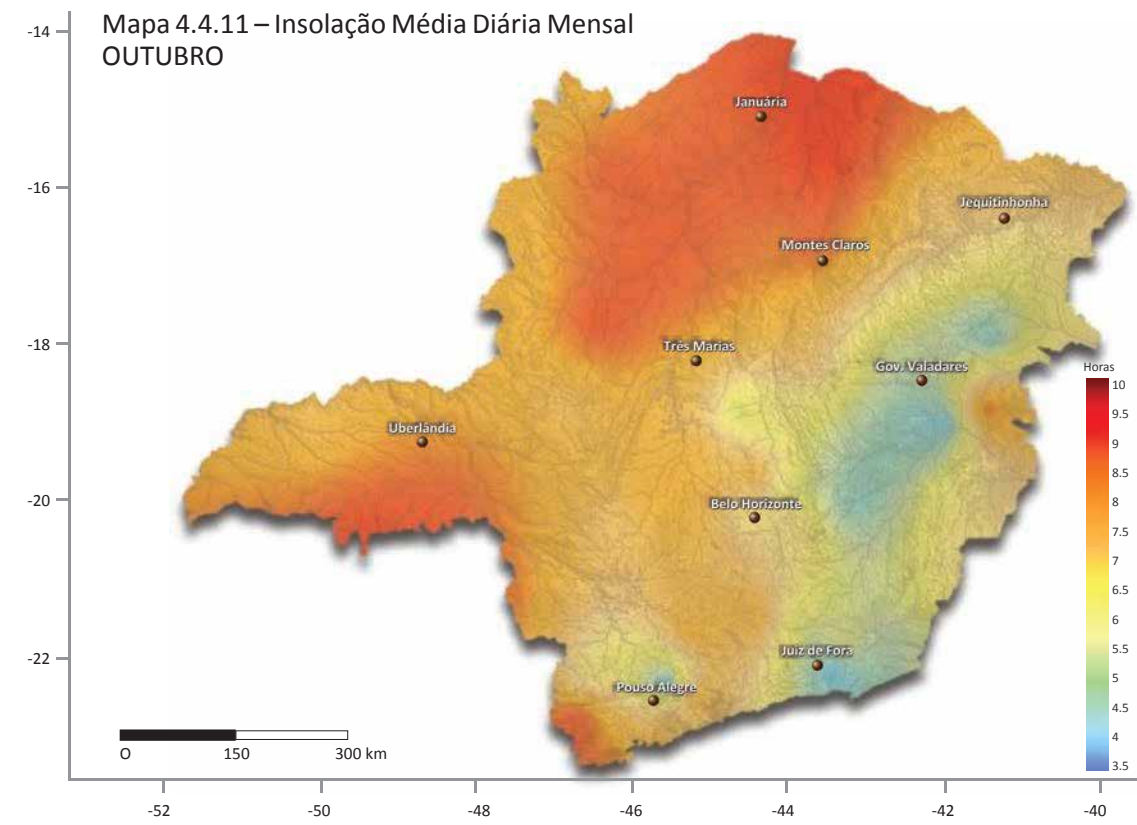
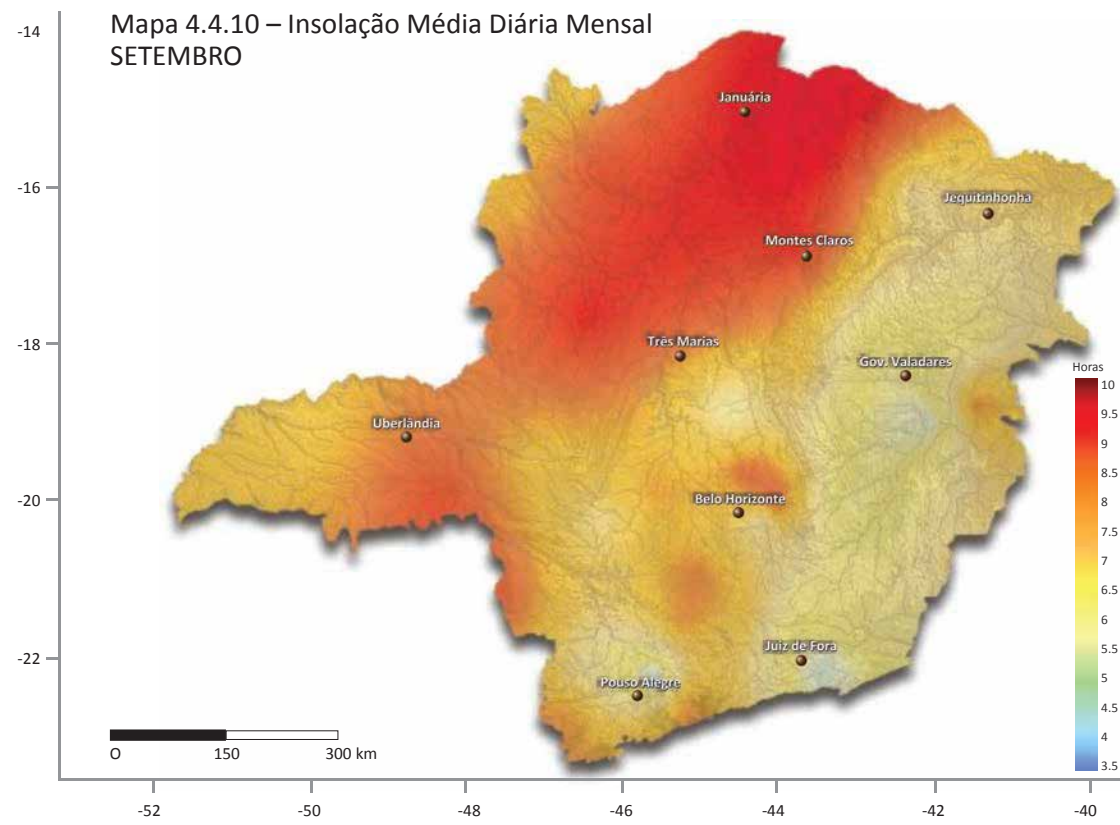
4.4 – Insolação



4.4 – Insolação



4.4 – Insolação





5. Conclusão



5.1 ANÁLISES E DIAGNÓSTICOS	71	5.1.4 Identificação e priorização de locais	75
5.1.1 Introdução.....	71		
5.1.2 Identificação dos principais mapas temáticos	71	5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.1.3 Disponibilidade e topografia do terreno	71		

5.1 – Análises e Diagnósticos

5.1.1 Introdução

O conhecimento do recurso solar é importante para a reprodução ampliada e a difusão intensa do uso da energia solar para fins energéticos. A precisão do seu conhecimento espacial ou temporal permite agregar confiabilidade (menor risco) e qualidade aos sistemas solares, repercutindo nos custos da energia gerada. O recurso solar é necessário para o projeto de sistemas solares em três aspectos principais:

- Estudo de localização de usinas solares (*siting*);
- Predição da produção anual, mensal ou diária da energia gerada e
- Previsão do desempenho temporal e estratégias operacionais.

Em estudos de localização de usinas solares de grande porte, entre outras, as seguintes variáveis são ponderadas: recurso solar (global ou direto, conforme a tecnologia solar a ser utilizada: fixo ou com concentração), disponibilidade de terrenos de forma não conflituosa (terras agricultáveis, reservas ou parques nacionais; reservas indígenas são excludentes), proximidade de acessos para transporte de equipamentos de porte ou delicados (espelhos), proximidade de linhas de transmissão, disponibilidade local de água de boa qualidade (imprescindível para sistemas fotovoltaicos). De forma individual, o conhecimento do recurso solar é a variável de maior peso nas incertezas associadas a um projeto de sistema energético solar.

5.1.2 Identificação dos principais mapas temáticos

Recurso solar

Uma central solar termoelétrica normalmente é um sistema com alta concentração de radiação solar e, por isso, praticamente utiliza apenas a radiação solar direta normal. Para esses sistemas, os locais favoráveis devem ter uma radiação solar maior do que 2.100 kWh/m².ano, ou seja, 5,75 kWh/m².dia (valor médio diário anual). Para sistemas fotovoltaicos planos (sem concentração), o requisito é menor: a radiação solar deve ser maior do que 2.000 kWh/m².ano, ou seja, 5,5 kWh/m².dia (valor médio diário anual). Tais valores são pouco acima do que usualmente se utiliza para a elaboração de estudos de viabilidade de instalação de centrais termoelétricas ou fotovoltaicas em escala mundial.

O estado de Minas Gerais dispõe de vastas regiões que preenchem os critérios mencionados acima. No que concerne à radiação solar global, observando o Mapa 5.1 verifica-se que a metade do Estado, mais precisamente, que todo o lado ocidental, possui radiação solar global diária média anual entre 5,5 e 6,5 kWh/m².dia. Quanto à radiação solar direta normal diária média anual, também o lado ocidental do Estado preenche o requisito, conforme pode ser visto no Mapa 5.1.



5.1.3 Disponibilidade e topografia do terreno

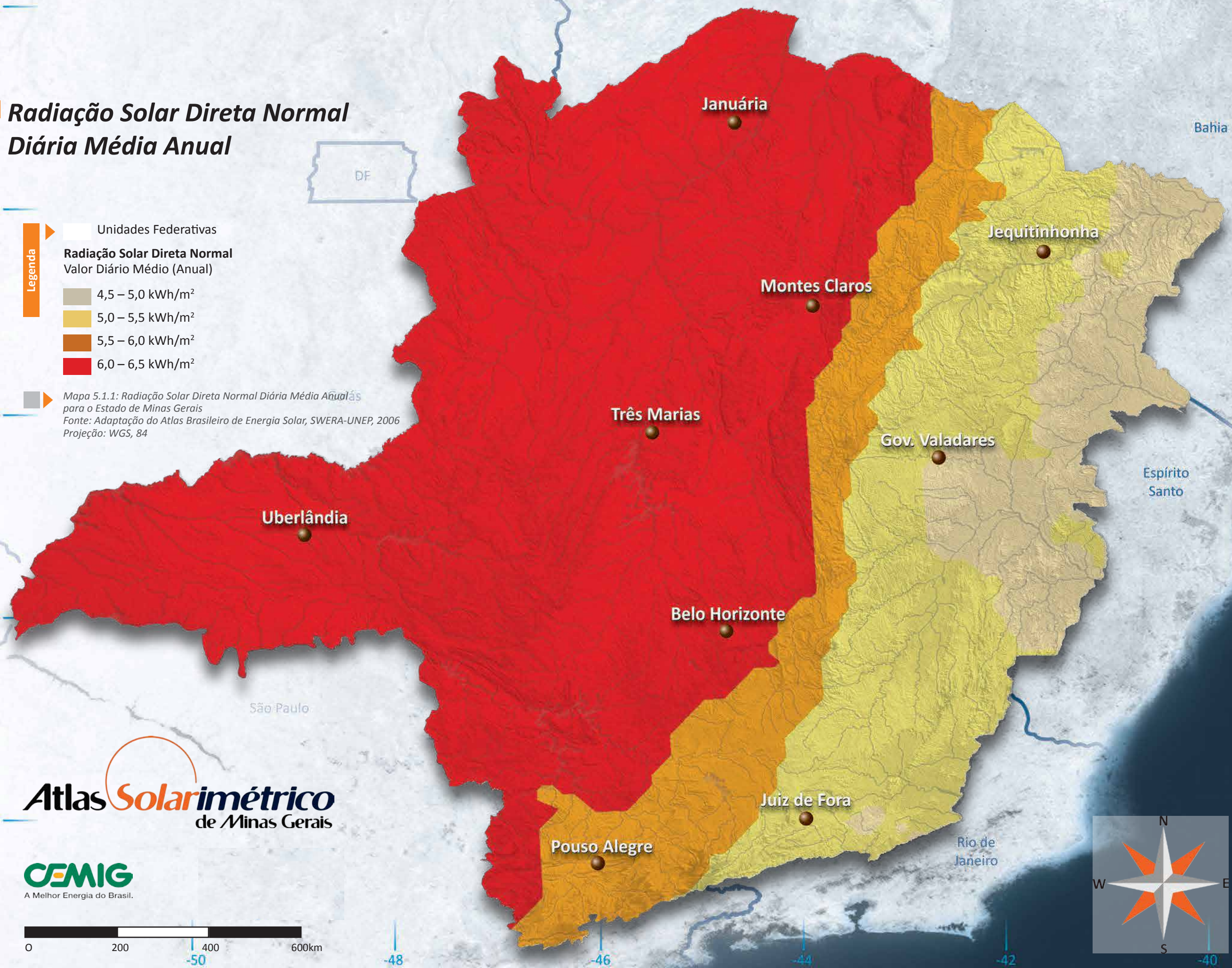
Uma central solar termoelétrica de 50 MWe ocupa uma área aproximada de 500.000 m². A topografia do terreno onde será implantada a central solar determina a aceitabilidade do local segundo seu impacto no custo relativo à preparação do terreno. Este local deve ser o mais plano possível, com uma declividade menor que 3% para evitar grandes movimentações de terra. No Mapa 5.2, são mostradas as declividades no Estado. É possível identificar regiões contínuas (“manchas”) de baixa declividade (menor do que 3%) no noroeste de Minas Gerais, na região de Januária, Janaúba e Capão Redondo. As centrais solares fotovoltaicas são bem menos exigentes do ponto de vista da declividade, pois são mais modulares. As declividades na faixa de 3 a 8% são aceitáveis; assim, algumas regiões adicionais do noroeste, da região central – a oeste de Belo Horizonte –, e no extremo oeste preenchem tais prerrequisitos quanto à declividade em Minas Gerais.

Radiação Solar Direta Normal Diária Média Anual

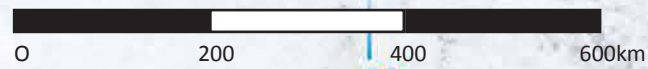


- Legenda**
- Unidades Federativas
 - Radiação Solar Direta Normal**
Valor Diário Médio (Anual)
 - 4,5 – 5,0 kWh/m²
 - 5,0 – 5,5 kWh/m²
 - 5,5 – 6,0 kWh/m²
 - 6,0 – 6,5 kWh/m²

Mapa 5.1.1: Radiação Solar Direta Normal Diária Média Anual para o Estado de Minas Gerais
Fonte: Adaptação do Atlas Brasileiro de Energia Solar, SWERA-UNEP, 2006
Projeção: WGS, 84

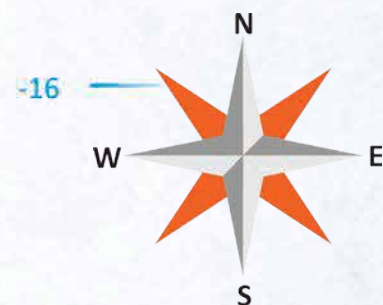


Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



-14

Declividade



-16

-18

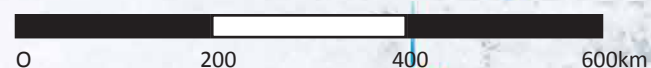
-20

-22

-52



Mapa 5.1.2: Declividade do terreno do Estado de Minas Gerais
Fonte: SRTM-3 (2003), IBGE (2005)
Projeção: WGS, 84



-48

-46

-44

-42

Bahia

Goiás

São Paulo

Rio de Janeiro

Espírito Santo

Januária

Jequitinhonha

Montes Claros

Três Marias

Gov. Valadares

Uberlândia

Belo Horizonte

Juiz de Fora

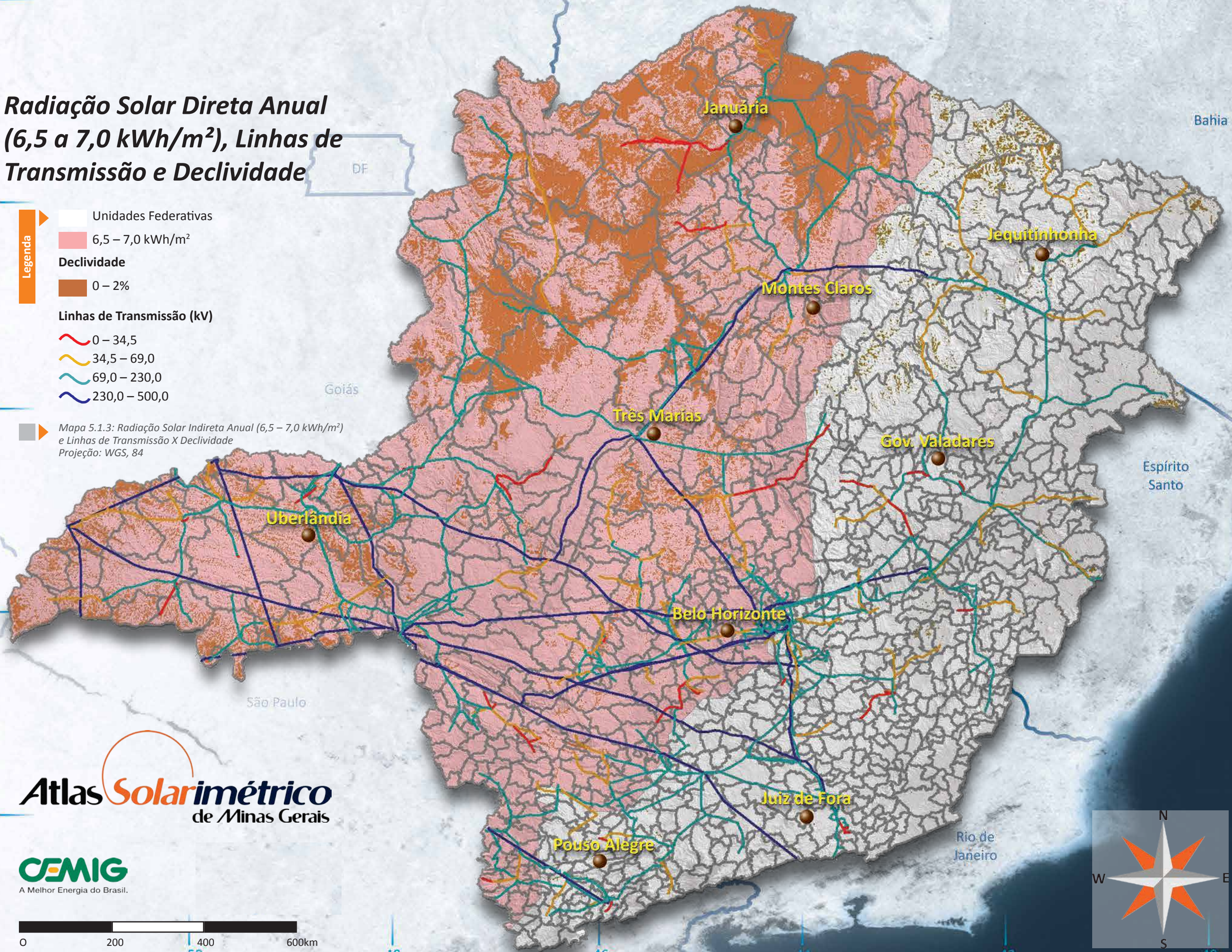
Pouso Alegre

Declividade	
	0 a 3%
	3 a 8%
	8 a 13%
	13 a 20%
	20 a 45%
	> 45%

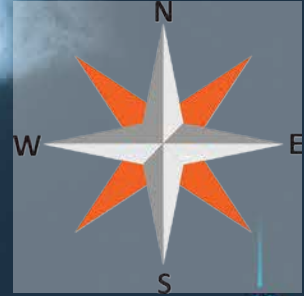
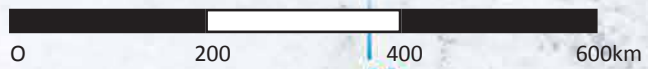
Radiação Solar Direta Anual (6,5 a 7,0 kWh/m²), Linhas de Transmissão e Declividade

- Legenda**
- Unidades Federativas
 - 6,5 – 7,0 kWh/m²
 - Declividade**
 - 0 – 2%
 - Linhas de Transmissão (kV)**
 - 0 – 34,5
 - 34,5 – 69,0
 - 69,0 – 230,0
 - 230,0 – 500,0

Mapa 5.1.3: Radiação Solar Indireta Anual (6,5 – 7,0 kWh/m²) e Linhas de Transmissão X Declividade
Projeção: WGS, 84



Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais



5.1 – Análises e Diagnósticos

Suprimento de água

Uma usina termoelétrica solar do tipo SEGS de 80 MW operando com um fator de capacidade anual de 0,27, por exemplo, usa cerca de 750.000 m³ de água (da ordem de 25 l/s). Esta água é necessária para as torres de refrigeração (cerca de 90%), geração de vapor no ciclo de potência (8%) e para a limpeza dos espelhos (2%). O fluxo típico para a torre de refrigeração é de 320 m³/h. A água deve ter também qualidade adequada para evitar incrustações e oxidações dos equipamentos. De forma geral o estado de Minas Gerais é bem suprido de água. Como consequência, esse aspecto não será restritivo para a instalação de grandes centrais solares. Cabe lembrar que as centrais solares fotovoltaicas necessitam de uma quantidade pequena de água, basicamente para a lavagem do módulos, para a retirada de poeiras e outras sujeiras.

Uso e ocupação do solo

Na implantação de uma central solar devem ser consideradas as permissões e eventuais restrições de utilização do solo. Com relação às restrições quanto ao uso e ocupação do solo, verifica-se que áreas protegidas por legislação (territórios indígenas, territórios quilombolas e as unidades de conservação ambiental) não são consideradas áreas aptas para a implantação de centrais solares, como também as áreas urbanas e de expansão urbana e as áreas de média e alta aptidão agrícola. Pelo que antecede, as regiões típicas para a instalação de centrais solares são as regiões secas e áridas, assim como as regiões desérticas.

5.1.4 Identificação e priorização de locais

A região com incidência de radiação solar direta diária entre 6,0 e 6,5 kWh/m² compreende uma vasta região a oeste do Estado. Também é possível observar nessa região uma sub-região a noroeste bastante plana, com declividade menor que 3% e contínua. Esta região de alta radiação solar anual também possui recursos hídricos de boa qualidade, abundantes e bem distribuídos. Possui relativamente pouca área com alta aptidão agrícola e uma quantidade reduzida de unidades de conservação. De uma maneira geral, a cobertura de linhas de transmissão nesta região é adequada, sendo de maior densidade na região sul e sudoeste do Estado.

Considerando os aspectos mais relevantes mencionados anteriormente, e tomando como referência os limites das microrregiões adotadas pelo IBGE (a divisão territorial do Brasil em microrregiões adotada pelo IBGE tem fins econômicos e sociais), chegou-se à classificação das áreas mais promissoras no estado de Minas Gerais (Mapa 5.4):

1. Microrregião de Janaúba,
2. Microrregião de Janaúria;
3. Microrregião de Pirapora e Unai;
4. Microrregião de Pirapora e Paracatu;
5. Microrregião de Curvelo e Três Marias;
6. Microrregião de Patrocínio e Araxá.

Radiação Solar Direta Anual (6,5 a 7,0 kWh/m²), Linhas de Transmissão e Declividade

-14

-16

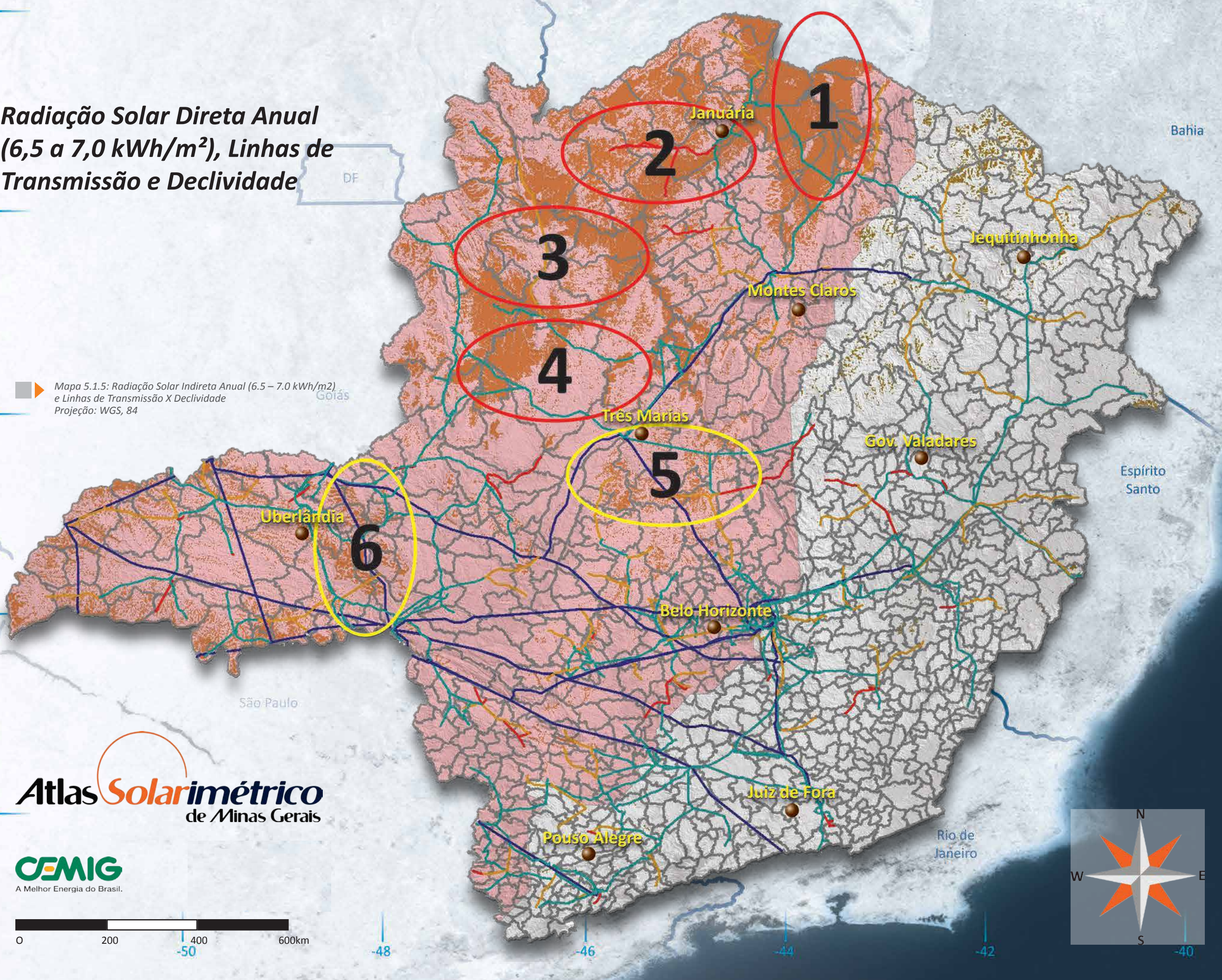
-18

-20

-22

-52

Mapa 5.1.5: Radiação Solar Indireta Anual (6.5 – 7.0 kWh/m²) e Linhas de Transmissão X Declividade
Projeção: WGS, 84



Atlas Solarimétrico
de Minas Gerais

CEMIG
A Melhor Energia do Brasil.



5.1 – Análises e Diagnósticos

Área 1 – Microrregião Janaúba

Uma das microrregiões do estado de Minas Gerais pertencentes à mesorregião do norte do Estado é a de Janaúba. Sua população de acordo com o censo demográfico de 2010 era de 247.487 habitantes (IBGE, 2011). Ela está dividida em 13 municípios, com destaque para Janaúba, Jaíba e Espinosa, e tem uma área total de 15.155,227 km² (IBGE). Sem dúvida nenhuma, é a área mais bem dotada de radiação solar direta normal em Minas Gerais, com valores anuais de 2.200 a 2.400 kWh/m², atingindo no verão de 2.500 a 2.700 kWh/m². A maior parte do território tem baixa aptidão agrícola, baixa declividade e ausência de unidades de conservação. A Figura 5.11 mostra uma visão aérea da região de Espinosa, caracterizada por um território de grande extensão plana.

Os municípios de Espinosa e Mocambinho, localizados nessa microrregião, apresentam os maiores valores de radiação solar direta normal, consistentemente com o mapeamento de radiação solar total realizado e discutido na Tabela 4.1.1. Os maiores centros consumidores da Área 1 estão nos municípios de Janaúba, Jaíba e Espinosa, com aproximadamente 67 mil, 34 mil e 31 mil habitantes (IBGE, 2011), respectivamente. A microrregião de Janaúba teve um consumo faturado pela CEMIG em 2010 de 240 GWh. (CEMIG, 2010). Nas proximidades da Área 1, localiza-se também o importante centro consumidor de Montes Claros, um dos principais do Estado.

Área 2 – Microrregião de Januária

Januária é uma das microrregiões do estado de Minas Gerais pertencentes à mesorregião do norte do Estado. Segundo o censo demográfico de 2010, a sua população era de 274.092 habitantes e se divide em 16 municípios, entre os quais se destacam Januária e São Francisco. Abrange uma área total de 33.168,262 km² (IBGE, 2011), e é também uma área bem dotada de radiação solar direta normal em Minas Gerais, com valores anuais de 2.200 a 2.400 kWh/m², atingindo em partes do seu território no verão de 2.500 a 2.700 kWh/m². É importante ressaltar que nesta região encontram-se áreas de média a alta aptidão agrícola, além de possuir unidades de conservação. É importante ressaltar que nesta região encontram-se áreas de média a alta aptidão agrícola, além de possuir unidades de conservação em seu território. Quanto ao aspecto da declividade, as regiões que apresentam continuidade inferior a 3% de declividade são menores, se comparado à Área 1. Já na porção norte de

Januária há menores restrições quanto aos aspectos mencionados anteriormente. Também é importante frisar que o município de Montalvânia, localizado no norte desta microrregião, apresenta os maiores valores de radiação solar direta normal. Os maiores centros consumidores da Área 2 estão nos municípios de Januária e São Francisco, com aproximadamente 65 mil e 54 mil habitantes (IBGE, 2011). A microrregião de Januária teve um consumo faturado pela CEMIG em 2010 de 171 GWh (CEMIG, 2010).

Área 3 – Microrregião de Pirapora e Unai

A Área 3 identificada está contida em duas microrregiões: na porção sul da microrregião de Unai e na porção norte da microrregião de Pirapora, ambas pertencentes à mesorregião norte de Minas Gerais. A microrregião de Pirapora possui uma área total de 23.071,697 km² (IBGE, 2011). Os principais municípios são Pirapora e Várzea da Palma, com cerca de 53 mil e 36 mil habitantes (IBGE, 2011), respecti-

vamente. A população total desta microrregião em 2010, de acordo com o censo demográfico, era de 164.903 habitantes (IBGE, 2011). A microrregião de Unai, por sua vez, de acordo com o censo demográfico, tinha em 2010 uma população de 148.800 habitantes e está dividida em nove municípios. Possui uma área total de 27.383,810 km². Os principais municípios são Unai e Buritis, com aproximadamente 78 mil e 23 mil habitantes, respectivamente. A Área 3 possui radiação solar direta normal com valores anuais de 2.200 a 2.400 kWh/m², sendo que grande parte do território apresenta baixa ou muito baixa aptidão agrícola, sem unidades de conservação e territórios indígenas. Quanto ao aspecto da declividade, é pior em relação à Área 1, na medida em que a densidade de regiões contínuas de declividades baixas, menores do que 3%, é inferior. Ainda assim, é uma região com declividades razoáveis. Cabe ressaltar novamente que o município de São Romão, que se localiza ao norte da microrregião de Pirapora, é uma das regiões com maiores níveis de radiação solar total, conforme anteriormente discutido na Tabela 4.1.1. Juntas, estas duas microrregiões tiveram um consumo faturado pela CEMIG no ano de 2010 de 2.971 GWh (CEMIG, 2010).

Figura 5.1.6: Vista área de Espinosa mostrando a baixa declividade da região



5.1 – Análises e Diagnósticos

Área 4 – Microrregião de Pirapora e Paracatu

A Área 4 identificada compreende parte de duas microrregiões: a porção sul da microrregião de Pirapora e a microrregião de Paracatu. A microrregião de Paracatu é uma das pertencentes à mesorregião noroeste de Minas Gerais, possui uma área de 34.997,251 km², e, de acordo com o censo demográfico, tinha em 2010 uma população de 217.618 habitantes. Os principais municípios são Paracatu e João Pinheiro, com cerca de 85 mil e 45 mil habitantes (IBGE, 2010), respectivamente. A descrição da microrregião de Pirapora foi feita anteriormente na Área 3. Estas regiões possuem uma radiação solar direta normal com valores anuais de 2.200 a 2.400 kWh/m². A maior parte da Área 4 possui baixa ou muito baixa aptidão agrícola, sem unidades de conservação e territórios indígenas. A declividade, principalmente na microrregião de Paracatu, é bastante favorável, tanto pela extensão como pela continuidade. Juntas, estas duas microrregiões tiveram um consumo faturado pela CEMIG em 2010 de 3.323 GWh.

Área 5 – Microrregião de Curvelo e Três Marias

A Área 5 identificada compreende parte de duas microrregiões, a de Curvelo e a de Três Marias, ambas pertencentes à mesorregião central mineira. A microrregião de Curvelo possui uma área total de 13.749,120 km² e 150.701 habitantes. Os principais municípios são Curvelo e Corinto, com aproximadamente 74 mil e 24 mil habitantes, respectivamente (IBGE, 2010). A microrregião de Três Marias possui uma área total de 10.509,238 km² e cerca de 96.800 habitantes. Os principais municípios são Três Marias e Pompéu, ambas com aproximadamente 29 mil habitantes. Estas regiões possuem uma radiação solar direta normal com valores anuais de 2.200 a 2.400 kWh/m². A microrregião de Curvelo possui diversos locais de média e alta aptidão agrícola, sem, porém unidades de conservação e territórios indígenas. Existem sítios onde as declividades são baixas, mas, tanto no que concerne à área total como também pela descontinuidade, são piores do que as outras áreas anteriormente analisadas. A microrregião de Três Marias também segue esse padrão; porém, é perceptível a existência de áreas maiores de baixa declividade. No entanto, estas microrregiões apresentam uma densidade maior de linhas de transmissão e estão muito mais próximas de grandes centros consumidores como, por exemplo, Belo Horizonte, de onde dista 180 km, e Sete Lagoas. Os principais centros consumidores locais compreendem os municípios de Diamantina (46 mil habitantes, 42 GWh) e Curvelo (74 mil habitantes, 83 GWh). A região é atravessada por linhas de transmissão de 138 kV e 34,5 kV e pelas rodovias BR259, BR367 e MG220.

Área 6 – Microrregiões de Patrocínio e Araxá

A Área 6 identificada compreende parte de duas microrregiões: a de Patrocínio e a de Araxá, ambas pertencentes à mesorregião de Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. A microrregião de Patrocínio possui uma área de 11.980,072 km² e 197.700 habitantes (IBGE, 2010). Os principais municípios são Patrocínio e Monte Carmelo, com cerca de aproximadamente 82 mil e 46 mil habitantes, respectivamente. A microrregião de Araxá possui uma área de 14.103 km² e 204.412 habitantes (IBGE, 2010). Os principais municípios são Araxá e Sacramento, com cerca de 94 mil e 24 mil habitantes, respectivamente. Estas regiões possuem uma radiação solar direta normal com valores anuais entre 2.200 e 2.400 kWh/m². A microrregião de Patrocínio possui locais de média e alta aptidão agrícola, sem unidades de conservação e territórios indígenas, enquanto a microrregião de Araxá possui unidades de conservação. De maneira geral, existem regiões onde as declividades são baixas, mas, tanto no que concerne à área total quanto à descontinuidade, são similares à Área 5. Também deve ser ressaltado que esta microrregião tem uma densidade maior de linhas de transmissão e está muito mais próxima de grandes centros consumidores, como Uberaba e Uberlândia, de onde dista 154 km.

As microrregiões 5 e 6 possuem menos regiões planas, mas têm a grande vantagem de estarem situadas mais próximas dos grandes centros consumidores de energia elétrica e no interior de uma região com maior densidade de linhas de transmissão.

5.2 – Considerações Finais

Figura 5.2.1: Região de Buritizal



A presente análise trata-se de uma primeira abordagem macro-espacial visando à identificação das localidades mais promissoras. Uma análise de viabilidade econômica mais detalhada vai requerer a medição local da radiação solar por pelo menos 3 anos. Porém, ainda assim, esta análise é perfeitamente útil para a locação dessas estações de medição. Como a radiação solar em regiões relativamente homogêneas do ponto de vista fitogeográfico e de relevo pode ser extrapolada em 150 km (sem graves erros), elas poderão estar locadas em sítios não coincidentes com a futura central solar. O estudo detalhado de uma central solar vai demandar adicionalmente ao detalhamento, com visitas *in loco*, o aprofundamento dos outros aspectos envolvidos no problema: declividade, acesso, existência de linhas de transmissão, entre outros.

Além das áreas citadas, existem outras, de extensões menores, mas suficientes para instalação de grandes centrais solares. Tais empreendimentos poderiam estar mais bem localizados quanto ao acesso, proximidades de linhas de transmissão e de centros de consumo, embora piores do aspecto da declividade e da concorrência com terrenos de média a alta aptidão agrícola. Uma análise mais detalhada do custo-benefício para centrais localizadas nessas regiões deverá ser feita no futuro.

Os estudos aqui desenvolvidos e apresentados identificaram um potencial bastante promissor de geração de energia solar de grande porte, seja termoelétrica ou fotovoltaica, chegando a uma radiação solar direta anual de 2700 kWh/m² no verão e de cerca de 2200-2400 kWh/m² em bases anuais. Este potencial poderá ser explorado gradativamente a médio prazo, com o esgotamento de outras fontes de suprimentos, da prontidão crescente dessas tecnologias e para melhorar a segurança do suprimento da energia elétrica, tanto caráter pelo seu caráter intrinsecamente distribuído como também pela melhoria no *mix* de suprimento. Cabe ressaltar finalmente a forte coincidência dos locais mais promissores para aproveitamento de energia solar de grande porte e de energia eólica, o que permitirá criar um complexo de sistemas híbridos solar-eólicos.

Referências Bibliográficas

- ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL). http://www.dasolabrava.org.br/wp-content/uploads/2010/07/Grafico_Mercado.jpg fev. de 2011
- ABREU, J. F.; BARROSO, L.C. *Geografia, modelos de análise espacial e GIS*. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), 2003.
- AGUIAR, R. J.; COLLARES-PEREIRA, M.; CONDE, J. P. *Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices*. Solar Energy, vol. 40, p. 269-279, 1988.
- AKINOGLU, B. G.; ECEVIT, A. *Construction of a quadratic model using modified Angstrom coefficients to estimate global solar radiation*. Solar Energy, vol. 45, p. 85-92, 1990.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: Sistema de informação hidrológica. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em mar. 2011.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília/DF, 2011.
- ANGSTROM, A. *Solar and terrestrial radiation*. Quart. J. Roy. Met. Soc. 50, p. 121-126, 1924.
- ATIENZA, G. *Instrumentación Solarimétrica*. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. Argentina: Instituto de Clima y Agua, 1993.
- AZEVEDO, V. W. B. *Estudo de localização de centrais termoelétricas solares de grande porte no Nordeste do Brasil*. Dissertação de Mestrado. PROTEUFPE, 2008.
- BRITO, J. L. N. e Silva. *Cartografia Digital e GPS*. Disponível em http://www.geomatica.eng.uerj.br/docentes/nunes/_media/ud_i_carto_digital_2004.pdf. Acesso em set. 2011.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, Rachael. *Principles of geographical information systems*. New York: Oxford University Press, p. 333, 1998.
- CARAM, R. O. *Reconstrução de séries e análise geoestatística da precipitação no Estado de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p. 92, 2007.
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. *25º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais* (BEEMG). Belo Horizonte/MG, 2010.
- COLLE S. e PEREIRA, E. B. *Atlas de Irradiação Solar do Brasil*. Brasília/DF: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998.
- COMBER, A.; PROCTOR, C.; ANTHONY, S. *A combined pycnophylactic-dasyetric method for disaggregating spatial data: the example of agricultural land use*. In: Proceedings of the Geographical Information Science Research UK Conference. National Centre for Geocomputation. National University of Ireland: Maynooth, p. 445-450, 2007.
- DER/MG – Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2010-2011.
- Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_thermal_power_stations#Operational
- Disponível em: <http://www.pvresources.com/en/top50pv.php>, abr. 2011.
- Disponível em: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2010/08/strong-pv-demand-in-2009-2010-and-2011>
- ENERGY SOURCES; World Energy Council. *Survey of Energy Resources*, London: W1B 5LT United Kingdom, 2010.
- EPIA. *Solar Generation 6 – Solar photovoltaic electricity empowering the World*, 2001.
- ESTEVES, A.; ROSA, C. *A simple method for correcting the solar radiation readings of Robitzch-type pyranometer*. Solar Energy, vol. 42, n. 1, 1989.
- GALLEGOS, H. G.; ATIENZA, G.; GARCIA, M. *Cartas de radiación solar diaria para la región meridional de América del Sur*. Buenos Aires: Anais do II Congresso Interamericano de Meteorologia e V Congresso Argentino de Meteorologia, 1987.
- GAUTIER, C.; DIAK, G.; MASSE, S. *A simple physical model to estimate incident radiation at the Earth surface from GOES satellite data*. Journal of Applied Meteorology, vol. 19, 1980.
- GROSSI GALLEGOS, H., LOPARDO. R. 1988. *Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the Argentine Pampa Humeda*. Solar Energy, vol. 40, n. 5, p. 397-404, 1988.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio (PNAD)*, Brasília/DF, 2009-2010.
- IEF – Instituto Estadual de Florestas. *Bases Cartográficas*. Belo Horizonte/MG, 2009-2010.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília/DF, 1961-1990 e 2009-2010.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Brasília/DF, 2008-2010.
- JANJAI, S.; PANKAEW, P.; LAKSANABOONSONG, J. *A model for calculating hourly solar radiation from satellite data in the tropics*. Applied Energy, vol. 86, p. 1450-1457, 2009.
- LYRA, F.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. *Solarimetria no Brasil – Situação e Propostas, Relatório do Grupo de Trabalho em Energia Solar Fotovoltaica*. Recife, 1993.
- MATOS, G. M. S. *Aplicações Computacionais em Geografia*. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), 2010.
- MELGAÇO, L. M. *A Geografia do Atrito: Dialética espacial e violência em Campinas*. Campinas: USP – Universidade de São Paulo, 2005.
- MELLIT A.; BENGHANEM M.; HADJ A. A.; GUESSOUM A. *A simplified model for generating sequences of global solar radiation data for isolated sites: Using artificial neural network and a library of Markov transition matrices approach*. Solar Energy vol. 79, n. 5, p. 469-482, 2005.
- MICHALSKY, J. J.; HARRISON L. C.; LE BARON, B. A. *Empirical radiometric correction of a silicon photodiode rotating shadowband pyranometer*. Solar Energy, vol. 39, n. 2, 1987.
- RENEWABLES – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Disponível em: <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/GSR2011/tabid/56142/Default.aspx>. Acesso em set. 2011.
- RUTHER, R.; ZILLES, R. *Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil*. Energy Policy, vol. 39, n.3, p. 1027-1030, 2011.
- SÁ JÚNIOR, A. *Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado. Lavras: Universidade Federal de Lavras, p. 101, 2009.
- SIQUEIRA, A. N., TIBA, C., FRAIDENRAICH, N. *Generation of daily solar irradiation by means of artificial network*. Renewable Energy, vol. 35, p. 2406- 2414, 2010.
- STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; RASCHKE, E. *An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data*. J. Applied Meteorology, vol. 29, n.7, p. 586-603, 1990.
- SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment. Disponível em <http://en.openet.org/apps/SWERA/>. Acessado em 2005.
- TARPLEY, J. D. *Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data*. Journal of Applied Meteorology, vol. 18, 1979.
- TIBA et al. *Atlas Solarimétrico do Brasil – Banco de dados Terrestres*. Pernambuco: Editora Universitária de Pernambuco, 2001.
- TOBLER, W. R. *Smooth pycnophylactic interpolation for geographical regions*. Journal of the American Statistical Association n. 74, p. 519-536, 1979.
- TYMVIOS F. S.; JACOVIDES C. P.; MICHAELIDES S. C.; SCOUTELI C. *Comparative study of angstroms and artificial neural networks methodologies in estimating global solar radiation*. Solar Energy vol. 78, p. 752-762, 2005.
- VERNICH, L. and ZUANNI, F., *About the minimum number of the years required to stabilize the solar irradiation statistical estimates*. Solar Energy, vol. 57, n. 6, p. 445-447, 1996.
- WATSON, David F. *Contouring: a guide to the analysis and display of spatial data: with programs on diskette*. Oxford: Pergamon, p. 321, 1992.
- WMO – World Meteorological Organization. *Manual on the global observing system*. Geneva: WMO, n. 544, 2003. Disponível em: http://www.wmo.int/pages/index_en.htm. Acessado em ago. 2011.
- YANG, K.; HUANG, G. W.; TAMAI, N. *A hybrid model for estimating global solar radiation*. Solar Energy, vol. 70, p. 13-22, 2001.