

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Contribuição para o Atlas Solar dos Açores

Clarisse de Lurdes Chapa Magarreiro

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Contribuição para o Atlas Solar dos Açores

Clarisse de Lurdes Chapa Magarreiro

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de

Pedro Alberto de Miranda (FCUL)

Miguel Centeno Brito (FCUL)

2011

Agradecimentos

Ao Prof. Doutor Pedro Alberto de Miranda pela sua preciosa ajuda, por partilhar o seu enorme conhecimento, pela compreensão e prontidão na resposta aos meus pedidos e por ter aceitado ser meu orientador da tese de mestrado em conjunto com o Prof. Doutor Miguel Centeno Brito a quem agradeço todo o apoio dado ao longo deste trabalho, à sua serenidade que tanto me auxiliou em momentos de dúvida e ajuda no desenvolvimento de outros projectos pessoais que permitirão a continuidade do meu crescimento científico.

À delegação dos Açores do Instituto de Meteorologia nomeadamente à Dr.^a Fernanda Carvalho e ao Dr. Diamantino Rodrigues não só pelo fornecimento dos dados de radiação da estação meteorológica da Ilha Terceira como também por todas as explicações dadas, extrema simpatia e ajuda a solucionar problemas de ordem prática aquando da minha estadia no Observatório Afonso Chaves.

Agradeço à Rita Margarida Cardoso por também ter aceitado ajudar-me na compreensão da execução do modelo WRF, da análise estatística, pelas ideias e comentários ao trabalho desenvolvido e pela partilha da experiência pessoal.

Ao Ricardo Tomé pelas dúvidas esclarecidas, pelos problemas “técnicos” resolvidos, pelo fornecimento dos dados do modelo WRF, muito obrigado!

Ao Dr. Pedro Viterbo por ter criado a oportunidade de trabalhar com o *software* SAFNWC, à Dr.^a Isabel Trigo por todos os esclarecimentos dados na execução deste mesmo *software*, interpretação dos seus resultados, partilha de opiniões, boa disposição e por me ter proporcionado uma “estadia” agradável durante o desenvolvimento deste estudo. Agradeço também à Carla Barroso pelas indicações técnicas e disponibilidade sempre imediata para responder às minhas questões.

Ao Pedro Soares pela ajuda preciosa na análise de resultados, disponibilidade, coerência, precisão, rigor e preciosos e incisivos comentários sobre o trabalho desenvolvido.

Dirijo também agradecimentos aos colegas João Martins, pelo esclarecimento de pequenas dúvidas que foram surgindo, e Joana Medeiros pela ajuda em resposta a questões práticas de extracção de variáveis do output WRF e conhecimento do modelo topográfico ETOPO.

Agradeço ainda ao Prof. Dr. Jorge Maia Alves pelo acompanhamento em todos estes anos em que decorreu o Mestrado Integrado, pela boa disposição fantástica, pela disponibilidade espantosa para dar resposta a todas e quaisquer situações/questões que me atormentaram.

Resumo

Uma boa concepção de qualquer sistema energético solar com vista ao seu desempenho óptimo requer a existência de informação confiável e exacta sobre o recurso solar disponível no local pretendido para a sua implementação. A probabilidade de pré-existirem dados de radiação registados nesse mesmo local é baixa, implicando a necessidade de recorrer a métodos alternativos de avaliação do recurso.

Uma base de dados de recurso solar pode ser construída com técnicas de interpolação aplicadas a dados climatológicos. Na Europa e em várias outras regiões do mundo aplicações e inventários de mapas de recurso solar foram desenvolvidas para apoiar, com colmatação de informação, análises de projectos de aproveitamento energético.

A questão que se pretende responder neste trabalho é se o sistema de modelação numérica da atmosfera WRF (*Weather Research and Forecast*) é apropriado para ser usado como base de um modelo de avaliação de recurso solar. O objecto da análise aplica-se ao arquipélago dos Açores, nomeadamente às ilhas Terceira e Graciosa.

A radiação solar que atinge a superfície terrestre está directamente relacionada com o clima regional a que um local está sujeito. Em ilhas pequenas e remotas de grandes massas continentais a circulação atmosférica pode variar bastante e a sua modelação é dificultada. A existência de avaliação de recurso solar nestas regiões é débil. No caso particular do arquipélago dos Açores não existe nenhum estudo detalhado sobre o potencial do recurso solar.

Uma vez que o modelo WRF determina apenas a componente global da radiação solar recorre-se a métodos de parametrização da radiação difusa e directa para que deste modo estas possam ser então quantificadas.

A performance do modelo WRF é avaliada contra dados de radiação registados *in situ* e com dados de presença/ausência de nebulosidade obtidos após avaliação de imagens de satélite com do software SAFNWC/MSG (*Satellite Application Facility to Nowcasting & Very Short Range Forecasting*).

Palavras Chave: WRF, Radiação solar, Açores, SAFNWC/MSG

Abstract

For the development of a good solar energy system, operating at its optimal performance, a reliable and accurate dataset of solar resource values for the studied area is needed. Because radiation data recorded on that same site is probably inexistent alternative methods should be employed for the resource assessment.

A solar resource database can be built with interpolation techniques applied to climatology data. In Europe, as in other several regions in the world, applications and solar resource inventories have been developed acting as a way to solar energy exploitation projects.

This work intends to question the ability of the atmospheric numerical modelling system WRF (Weather Research and Forecast) to provide basic data for solar resource assessment model. The analysis was applied to the Azores islands, namely Terceira and Graciosa.

The solar radiation reaching the Earth's surface is directly related to the local's regional climate. Small islands, far away from large land masses can have a great variety of atmospheric circulation patterns and therefore modelling the parameters associated with those may be difficult. In these regions the solar resource is not often assessed. For Azores there is no detailed study in this matter.

Since WRF model determines only global solar radiation an assessment of direct and diffuse radiation must be done by some parametrization.

The WRF performance is assessed against radiation data recorded in situ and with a score of presence/absence of cloudiness obtained through SAFNWC/MSG (Satellite Application Facility to Nowcasting & Very Short Range Forecasting) software with satellite images.

Key-words: WRF, Solar radiation, Azores, SAFNWC/MSG

Índice

1.	Introdução	1
1.1	Radiação Solar	3
1.1.1	Noções fundamentais	3
1.1.2	Efeito da atmosfera na radiação solar que atinge a Terra	3
1.1.3	Transferência radiativa.....	4
1.2	Astronomia esférica	5
1.2.1	Geometria orbital	5
1.2.2	Sistema de coordenadas solares	5
1.3	Sistema astronómico de tempo	7
1.4	Duração do dia	8
1.5	Observação de radiação e instrumentos	8
1.5.1	Medidas de radiação global, directa e difusa	8
1.5.2	Outros instrumentos	10
2.	Observações de radiação <i>in situ</i>	10
2.1	Terceira	11
2.1.1	Componentes radiativas: médias horárias, diárias e mensais.....	11
2.2	Graciosa	14
2.2.1	Componentes radiativas: médias horárias, diárias e mensais.....	14
3.	Simulações WRF	16
3.1	WRF.....	16
3.1.1	Topografia e radiação global WRF (SWDOWN).....	17
4.	Avaliação WRF com radiação <i>in situ</i>	20
4.1	Comparação SWDOWN e radiação global observada.....	20
4.1.1	Métodos de análise estatística	20
4.1.2	Análise de erros.....	21
4.2	Componente difusa e directa de SWDOWN.....	23
4.2.1	Modelos Erbs, Collares-Pereira e Ridley-Boland-Lauret	23
4.2.2	Comparação entre os modelos e observações	25

4.3	Mapas solares.....	28
4.3.1	Potencial Fotovoltaico.....	31
5.	Nebulosidade: WRF e SAFNWC	31
5.1	SAFNWC.....	31
5.1.1	Configuração SAFNWC	33
5.2	Comparação entre WRF e SAFNWC	34
6.	Conclusões e trabalho futuro.....	39
7.	Referências.....	41
8.	Anexos	45

1. Introdução

O arquipélago dos Açores, um grupo de 9 ilhas situadas no Atlântico nordeste, utiliza maioritariamente como fonte de energia primária combustíveis fósseis importados (fuel, gasóleo, gasolina). Todavia, as fontes de energia renováveis como a energia geotérmica e a eólica têm registado evoluções positivas.

As ilhas açorianas podem ser encaradas como potenciais locais privilegiados para o estudo das energias renováveis ao tornarem-se, na sua quase totalidade, sustentáveis. O projecto inovador do MIT — *Green Islands Project* — contempla esta ideia pretendendo o desenvolvimento de novas metodologias para identificar opções e soluções rentáveis de energia sustentável utilizando os recursos naturais endógenos de ilhas tais como os Açores.

A viabilidade técnica e económica de qualquer uma das tecnologias abordadas no sentido de utilizar os recursos naturais numa determinada localização depende directamente da disponibilidade particular do recurso a considerar. É então, nesse sentido, essencial que se proceda à caracterização do mesmo tendo em conta todos os factores que o influenciam: localização geográfica, estação do ano, hora do dia, características fisiográficas e de uso do solo e condições meteorológicas.

A privilegiada riqueza do recurso solar em Portugal Continental foi (e é) certamente impulsionadora do desenvolvimento da promoção para a adopção de sistemas solares térmicos e/ou fotovoltaicos. No entanto nas ilhas açorianas, e devido maioritariamente às diferenças nas condições meteorológicas que apresentam uma percentagem de nebulosidade bastante superior nas ilhas comparando com Portugal Continental o recurso solar tende a ser definido como pobre para considerações de aproveitamento energético.

Uma boa concepção de qualquer sistema energético solar com vista ao seu óptimo desempenho requer a existência de informação fiável sobre o recurso solar disponível no local pretendido para a sua implementação. A probabilidade de existirem dados registados nesse mesmo local é pequena justificando a necessidade de recorrer a métodos de avaliação do recurso. Uma informação sobre recurso solar com qualidade elevada é indispensável. É necessário prever quais os futuros impactos de ligações à rede eléctrica de aplicações fotovoltaicas e auxiliar os operadores do sistema de produção e distribuição eléctrica.

Um método clássico de análise do recurso solar de uma região consiste na investigação sobre o número médio anual (ou mensal) de horas de Sol. Estes dados podem ser obtidos através de um heliógrafo *Campbell-Stokes* (regista como “horas de sol” a fracção de linha queimada num cartão de papel especial resultante da concentração dos raios solares por uma lente). Embora em muitos locais as séries temporais registadas de horas de insolação sejam bastante extensas a fiabilidade das mesmas é pequena pois as medidas obtidas podem ser dúbias: actualmente, a definição de “horas de sol” corresponde aos períodos com valores superiores a 120 Wm^{-2} de radiação solar directa (WMO, 2008).

Na Europa, o *Institute for Energy* (IE) – um dos institutos científicos do *Joint Research Centre* da Comissão Europeia – desenvolveu um instrumento de avaliação geográfica dos recursos de energia solar no contexto da gestão integrada da geração distribuída de energia (PVGIS) para o continente Europeu, a bacia Mediterrânea, África e Sudoeste Asiático. Esta ferramenta incorpora uma base de dados de radiação global e razão entre componente difusa e directa. A fonte primária de dados (medidas *in situ* de radiação solar para validação dos dados obtidos por modelo) para o seu desenvolvimento proveio do *European Solar Radiation Atlas* (ESRA), um atlas de radiação solar desenvolvido ao abrigo do programa JOULE II da Comissão Europeia. Por sua vez os dados incluídos no ESRA dizem respeito a medidas *in situ* de várias estações das quais apenas uma mínima parte inclui informação além das já referidas e pouco fiáveis medidas de horas de sol: 80 estações com somas diárias de componente global e horas de sol; 6 estações com somas horárias de componente

global, difusa e horas de sol; 1 estação com somas de meia hora de componente global, difusa, directa e horas de sol e 691 estações com apenas somas diárias de horas de sol (Scharmer et al., 2011). No PVGIS os valores de radiação usados nos mapas de recurso foram obtidos por um modelo cujo algoritmo assenta no conceito utilizado também no ESRA – um conjunto de equações que estimam as componentes directa, difusa e reflectida da radiação global em condições de céu limpo e de céu real – e posteriormente implementado num software de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Súri et al., 2005). Os mapas do ESRA foram produzidos através de valores de radiação obtidos por imagens de satélite. A descrição do método usado para conversão das imagens adquiridas pelo satélite Meteosat em mapas de radiação solar disponível ao nível do solo encontra-se descrito em Lefèvre et al. (2002). Observando os mapas do ESRA denota-se que as dimensões reduzidas de ilhas pequenas como os Açores implicam uma limitação na aplicabilidade da ferramenta em termos de avaliação do recurso solar nestes locais.

O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) produziu mapas de radiação solar para os Estados Unidos da América usando imagens de satélite, dados diários de cobertura de neve, médias mensais de vapor de água atmosférico e gases raros e aerossóis na atmosfera de modo a calcular a radiação global incidente na superfície terrestre (Perez et al., 2002; Maxwell et al., 1998). Os mapas com resolução espacial de 10 e 40 km mostraram ter razoável concordância com as medidas obtidas em estações meteorológicas. Para os métodos empregues a falta de maior resolução espacial coloca em questão também a fiabilidade de resultados em avaliações de recurso em áreas pequenas.

Através do projecto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) incluído no Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP) foi também criado o mapa de radiação solar para a América Latina. Para o Brasil o método usado consistiu na resolução aproximada da equação de transferência radiativa (BRASIL- SR) usando também informação sobre a cobertura de nuvens obtida por satélite (Martins et al., 2004 e 2007).

O uso de modelos numéricos meteorológicos em combinação com pós-processamento estatístico também representa uma ferramenta com bastante potencial no sentido de quantificar e analisar a distribuição de radiação solar que atinge a superfície terrestre (Jorba et al., 2011; Remund et al., 2008).

A radiação solar que atinge a superfície terrestre está directamente relacionada com o clima regional a que um local está sujeito. Em ilhas pequenas a circulação atmosférica pode variar bastante e a sua consequente modelação é dificultada. A existência de avaliação de recurso solar nestas situações é débil. No caso particular do arquipélago dos Açores não existe nenhum estudo detalhado sobre o potencial do recurso solar.

O modelo numérico WRF (*Weather Research and Forecast*) (Skamarock et al., 2008) é analisado neste estudo como ferramenta de previsão de valores de radiação global para as ilhas Terceira e Graciosa, regiões com condições meteorológicas bastante variáveis e com uma limitada cobertura temporal e espacial de observações. Para validar o modelo WRF a sua simulação é comparada com dados observados de radiação. Como a radiação solar está intrinsecamente relacionada com a nebulosidade de um local é também analisada uma curta série temporal de detecção de nuvens através de imagens de satélite processadas em SAFNWC/MSG (*Satellite Application Facility to Nowcasting & Very Short Range Forecasting*). Aqui o desempenho do WRF é analisado comparando a previsão de céu limpo ou coberto com o observado.

A componente directa da radiação solar é especialmente determinante para análise de desempenho de sistemas concentradores. Assim serão também avaliados alguns modelos que relacionam componente difusa e directa da radiação solar para que a sua quantificação seja possível partindo da radiação global prevista pelo WRF. O modelo com melhor desempenho será considerado para os mapas solares das ilhas Terceira e Graciosa.

Como enquadramento ao trabalho realizado são introduzidas algumas noções de radiação solar.

1.1 Radiação Solar

1.1.1 Noções fundamentais

O processo mais importante responsável pela transferência de energia na atmosfera é a radiação electromagnética. O espectro electromagnético é constituído por raios gama, raios x, ultravioleta, visível, infravermelho, microondas e ondas de rádio. A retina do olho humano é apenas sensível a uma pequena parte do espectro electromagnético correspondente à banda do visível com comprimento de onda (cdo) compreendido, aproximadamente, entre os 400 e 700 nm (Liou 1980).

A radiação emitida pelo Sol é relativamente constante, no entanto a radiação que atinge a superfície terrestre varia devido a efeitos atmosféricos incluindo absorção e dispersão, variações locais da atmosfera em termos de vapor de água, nuvens e poluição, a latitude do local a considerar, a estação do ano e hora do dia.

Para quantificar teoricamente a energia emitida pelo Sol que atinge a Terra dever-se-á determinar o fluxo de energia (energia por unidade de tempo através de uma unidade de área) em direcção perpendicular aos raios solares numa região fora da atmosfera, a uma distância média Terra-Sol — a constante solar. Na bibliografia é possível acompanhar as deduções feitas e métodos utilizados para a sua determinação (Liou, 1980; Robinson, 1966).

O valor da constante solar tem sido revisto várias vezes ao longo do tempo mas existe ainda uma disparidade entre os valores adoptados por diferentes investigadores. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) estabeleceu o valor da constante solar em 1366.1 Wm^{-2} (Gueymard, 2004) enquanto que o *World Radiometric Center* (WRC) recomenda 1367 Wm^{-2} (Fröhlich, 1981; Li *et al.*, 2011). Este último valor é o mais consensual e utilizado em estudos. Em Li *et al.* (2011) são referidos exemplos de ambos e outros valores considerados para a constante solar. Observações mais recentes levadas a cabo no projecto *Solar Radiation and Climate Experiment* (SORCE) (Kopp *et al.*, 2005) e confirmada pelo WRC (Fröhlich, 2011; PMOD/WRC, 2011) indicam que o valor da constante solar é no entanto mais baixo que o valor recomendado anteriormente — 1361 Wm^{-2} . Neste trabalho é, no entanto, considerado em cálculos o valor 1367 Wm^{-2} para a constante solar.

1.1.2 Efeito da atmosfera na radiação solar que atinge a Terra

A radiação solar em incidência normal recebida numa superfície terrestre é objecto de variações devido a alterações na radiação extraterrestre (alterações estas muitas vezes apontadas como resultado do desenvolvimento da actividade das manchas solares), a dispersão e absorção atmosférica.

A dispersão da radiação ao longo do seu trajecto pela atmosfera é causada pela interacção da radiação com moléculas do ar, água e poeira. O grau com que essa dispersão acontece é função da quantidade de partículas através das quais a radiação deve atravessar e do tamanho das partículas relativamente ao comprimento de onda da própria radiação.

Absorção ocorre quando o somatório da energia dispersada e transmitida integrada ao longo de todos os ângulos é menor que a energia incidente. A energia absorvida pode alterar a temperatura, a composição química e/ou outras propriedades de uma partícula. A absorção da radiação na atmosfera é devido em grande parte à absorção do ozono na banda do ultravioleta e à absorção do vapor de água e dióxido de carbono na região do infravermelho. Há quase uma completa absorção da radiação de curto cdo (abaixo dos $0,29 \mu\text{m}$) pelo ozono e pelo oxigénio nas camadas altas da atmosfera. Para cdo superiores a $2,50 \mu\text{m}$ uma combinação de fraca radiação extraterrestre e forte absorção pelo dióxido de carbono (CO_2) induz a uma pequena porção de energia solar que atinge a superfície. Neste sentido e do ponto de vista das aplicações terrestres para energia solar apenas o intervalo entre $0,29 \mu\text{m}$ e $2,50 \mu\text{m}$ necessita ser considerado (Duffie *et al.*, 2006).

A absorção e a dispersão na atmosfera variam ao longo do caminho do feixe solar devido à composição gasosa da atmosfera que é função do tempo. Além disto também cada constituinte da atmosfera tem o seu próprio coeficiente de absorção e dispersão que variam com o comprimento de onda.

Dos efeitos da atmosfera na radiação solar incidente resulta a equação fundamental que relaciona as suas componentes: componente directa I_{Dr} , difusa I_{Df} e, o seu somatório, global I_G . A maioria das medidas efectuadas de radiação solar diz respeito apenas a componente difusa e global. Nesse caso, subtraindo-se o valor da componente difusa da componente global teremos então a radiação directa incidente. Como radiação difusa e global são medidas efectuadas no plano horizontal, e caso a variável desconhecida seja uma de estas duas em função dos valores de radiação directa medidos com ângulo igual à elevação do Sol (I), ou seja alinhados com este, ter-se-á que transpor por isso os registos de radiação directa também para o plano horizontal. Usa-se então a definição de ângulo zenital (θ_0) – ângulo formado entre o zénite do local e os raios solares – para esse efeito (na secção referente ao sistema de coordenadas solares encontrar-se-á a sua expressão de cálculo). A equações abaixo descrevem estas relações.

$$I_G = I_{Df} + I_{Dr} \quad (1)$$

$$I_{Dr} = I \cdot \cos \theta_0 \quad (2)$$

Os instrumentos (e método) para efectuar os registos radiativos aqui discutidos serão descritos mais adiante.

1.1.3 Transferência radiativa

A transferência radiativa descreve a distribuição tridimensional da energia radiante na atmosfera. Os efeitos radiativos no clima dependem da divergência do fluxo radiativo (fluxo de fótons que penetra um volume da atmosfera). Os modelos climáticos requerem os fluxos de radiação à superfície para determinação da temperatura à superfície e das taxas divergência do fluxo radiativo para a equação termodinâmica usada para determinar as temperaturas atmosféricas (Carvalho *et al.*, 2010).

O conhecimento dos processos dinâmicos e fotoquímicos que ocorrem na atmosfera requer considerações sobre a transferência radiativa na mesma. A transferência radiativa consiste na propagação de fótons através de um meio a qual resulta num transporte de energia radiante.

A equação geral da transferência radiativa tem em conta todas as fontes e sumidouros da intensidade de radiação num elemento de volume de um dado meio. A mesma equação requer condições fronteira apropriadas na superfície e no topo da atmosfera e é normalmente manipulada tomando algumas aproximações. Para maioria das aplicações de transferência radiativa atmosférica é fisicamente apropriado considerar que a atmosfera em porções localizadas é um plano paralelo no qual as variações de intensidade e de parâmetros atmosféricos (temperatura e constituição de gases) são permitidos apenas na direcção vertical. No entanto quando esta última hipótese é demasiado simples para a situação real há que incluir considerações para condições de heterogeneidade num meio tridimensional.

Pode acompanhar-se a discussão e dedução da equação de transferência radiativa em Chandrasekhar (1960) e em Liou (1980).

1.2 Astronomia esférica

1.2.1 Geometria orbital

A trajectória da Terra é uma elipse, embora com pequena excentricidade em torno do Sol. A órbita da Terra em torno do Sol e a sua rotação sobre o seu próprio eixo são os factores mais determinantes da quantidade de energia solar que atinge a superfície terrestre. Na figura 1 podemos identificar a declinação do Sol δ , variável bastante usada em cálculos subjacentes a métodos de quantificação da energia solar incidente na Terra.

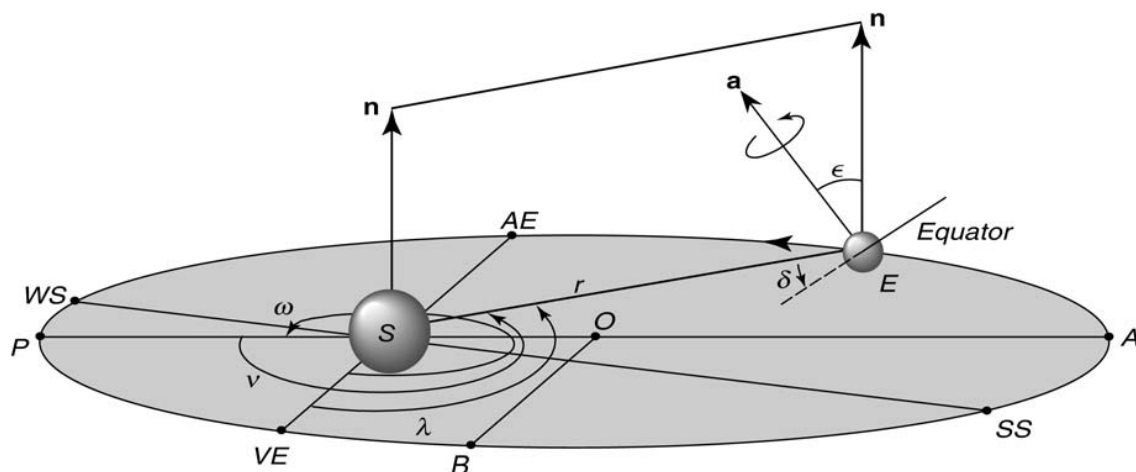


Figura 1 – Geometria Terra-Sol. Identifica-se o equinócio de Outono (AE) e de Primavera (VE), o solstício de Inverno (WS) e Verão (SS). A normal ao plano da elipse é representado por n , a é paralelo ao eixo da terra, δ é a declinação do sol, ϵ é o ângulo oblíquo do eixo da terra, ω é a longitude do periélio relativo ao equinócio de primavera, v é a verdadeira anomalia da Terra num dado instante, λ a verdadeira longitude da terra, O o centro da elipse, OA (e OP) são o semieixo maior da elipse, OB o semieixo menor, S a posição do sol, E a posição da Terra e ES a distância entre a Terra e o Sol. A distância média Terra-Sol (ou, por definição, uma unidade astronómica) é definida recorrendo ao cálculo da média das distâncias correspondentes ao periélio (P) e ao afélio (A). (Liou, 1980).

1.2.2 Sistema de coordenadas solares

A posição do sol na esfera celestial pode ser especificada através de um sistema de coordenadas. Podemos recorrer ao sistema horizontal ou ao sistema equatorial. No sistema horizontal a posição do sol é especificada pela distância zenital e azimute. No sistema equatorial a posição do sol é especificada pela distância polar (Robinson, 1966).

Normalmente recorre-se ao ângulo zenital para definir a posição do sol (sistema horizontal). Na figura 2 estão esquematizados os parâmetros necessários para a definição do sistema de coordenadas que permitem determinar o ângulo zenital. Consideremos P o ponto onde um observador se encontra no qual se define OZ como o zénite desse ponto. O Sol encontra-se na posição de OS ou PS sendo D o ponto directamente abaixo do sol. O plano definido por OZ e OS irá intersectar a superfície da Terra pelo semi-círculo E . O ângulo ZOS (ou ZPD) medido pela distância PD representa a distância zenital do Sol, θ_0 . O arco ND é igual a 90° menos a declinação solar, δ , e o arco NP é igual a 90° menos a latitude do local do observador, ϕ . O ângulo h é o ângulo horário (o ângulo sobre o qual a Terra deve girar de modo a colocar o local P directamente sob o Sol).

1.3 Sistema astronómico de tempo

O tempo pode ser definido de acordo com diferentes fenómenos tais como a rotação da Terra, fenómenos atómicos de mecânica quântica ou equações físicas que descrevem o movimento de corpos celestes envolvendo uma variável temporal.

No sentido de abordarmos a temática relativa às horas de observação da radiação (horas em que ocorrem registos na instrumentação utilizada) é adequado fazer-se aqui referência ao tempo solar verdadeiro (TSV) e ao tempo determinado pelos nossos relógios.

O meio-dia solar corresponde ao momento em que o Sol se encontra no seu ponto mais alto no céu.

A velocidade com que a Terra percorre a sua órbita não é constante e portanto o movimento aparente de ascensão do Sol ao longo da elíptica não tem uma velocidade constante. De modo a definir um tempo solar é então definido um sol médio fictício que se considera mover ao longo do equador celestial com uma velocidade angular constante fazendo assim uma revolução completa num ano. Usando então este sol médio define-se o tempo solar médio (TSM) como o ângulo horário do centro do sol médio acrescido de 12 horas. A diferença entre o TSV e o TSM é denominada equação do tempo. Esta quantidade varia ao longo do ano e pode ser determinada aproximadamente usando a seguinte expressão, em minutos:

$$ET = 0,0172 + 0,4281 \cos(B) - 7,3515 \sin(B) - 3,3495 \cos(2B) - 9,3619 \sin(2B) \quad (7)$$

$$B = 2\pi n/365 \quad (8)$$

sendo n o numero de dias desde o inicio do ano.

Tanto o TSV como o TSM são tempos locais pois dependem do ângulo horário do sol. No nosso dia-a-dia usamos não o tempo local mas o tempo que foi determinado para pertencer a uma mesma zona, as zonas horárias (ou fusos horários). Estas zonas horárias foram criadas por motivos de conveniência à vida humana numa era mais globalizada. Cada zona horária varia de uma hora das zonas vizinhas e, na superfície da Terra, essa hora corresponde a 15° em termos de longitude.

O meridiano de Greenwich é usado como referência internacional (longitude= 0°).

Em muitos países é feito um ajuste de modo a fazer coincidir a luz natural do dia com o período em que as pessoas estão mais activas de modo a possibilitar alguma poupança em gastos em electricidade (Aries *et al.*, 2008).

O tempo utilizado nos nossos relógios comuns deriva do Tempo Universal Coordenado (UTC) e este difere das zonas horárias de um número inteiro de horas. O UTC é uma medida de tempo derivada do Tempo Atómico Internacional (TAI) que é por sua vez uma média de vários relógios atómicos precisos (Karttunen *et al.*, 2007).

O tempo médio local (TML) é o tempo solar médio num dado local onde se encontre um observador e difere de UTC apenas na diferença de longitudes entre esse local e o meridiano de referência.

$$TSM - UTC = TML - UTC = \pm 4 (L_s - L) = \pm 4 (0^\circ - L) \quad (9)$$

O sinal positivo emprega-se para longitudes a oeste do meridiano de referência (ou seja de acordo com a convenção o resultado da expressão será negativo) e o factor 4 deriva do facto de a Terra rodar 1° a cada 4 minutos.

Recordando que ET é igual à diferença entre TSV e TSM e através de manipulação algébrica da equação (6) obtém-se a seguinte igualdade (em minutos):

$$TSV - UTC = \pm 4 (0^\circ - L) + ET \quad (10)$$

Pode deduzir-se então também o tempo solar verdadeiro (em horas UTC):

$$TSV = UTC \pm \frac{4 (0^\circ - L) + ET}{60} \quad (11)$$

Em Portugal Continental a hora legal é sempre igual ao próprio UTC excepto nos períodos em que o horário de verão está em vigor. No arquipélago dos Açores, pelo contrário, a hora legal coincide com a hora UTC no período em que o horário de Verão está em vigor (entre último domingo de Março e último domingo de Outubro) e menos uma hora que UTC no período de horário de Inverno. As medições de radiação solar deverão ser sempre efectuadas em TSV. É no entanto aceitável que as mesmas sejam efectuadas em tempo universal (de uso fácil e por isso mais atractivo para os sistemas automáticos) se a redução dos dados a TSV não introduzir uma perda significativa de informação, ou seja, se a taxa de amostragem e armazenagem de dados seja suficientemente alta (WMO, 2008).

1.4 Duração do dia

Para o presente trabalho é particularmente relevante a determinação do comprimento do dia, ou seja, da hora a que ocorre o nascer e o pôr de sol. Esta informação permite rejeitar os valores registados pela instrumentação em períodos em que não existe radiação solar pois estes por vezes registam valores negativos — *offset* do piranómetro (descrito na secção Medidas de radiação global, directa e difusa).

Na determinação da duração do dia são utilizadas as equações descritas na secção anterior.

1.5 Observação de radiação e instrumentos

1.5.1 Medidas de radiação global, directa e difusa

Radiação solar é um termo genérico usado para a radiação electromagnética emitida pelo sol. Parte desta radiação pode ser capturada e convertida, usando uma grande variedade de tecnologias disponíveis, em formas de energia passíveis de serem utilizadas tal como electricidade ou calor. Nesta secção será descrita a instrumentação corrente utilizada para medidas de radiação solar em estações meteorológicas habituais.

Os instrumentos utilizados mais comuns absorvem a radiação incidente como calor. Nestes instrumentos um receptor de cor preta (ou parcialmente preto, parcialmente branco), que não é espectralmente selectivo, é usado para fornecer uma medida quantitativa proporcional à energia incidente. Esta energia absorvida pelo receptor provoca uma diferença de temperatura que por sua vez conduz a um fluxo de calor que é convertido num sinal eléctrico que permite assim o seu registo. A tensão registada é então tratada de forma a obter uma medida em Wm^{-2} .

O piranómetro é o instrumento com maior aplicabilidade tanto nas áreas de meteorologia como de determinação de potencial energético de uma dada região uma vez que mede a radiação global total que chega à superfície da Terra, quer seja directa, difusa ou reflectida. É essencialmente constituído por um corpo metálico, um sensor protegido por uma cúpula transparente de vidro ou quartzo e uma ligação eléctrica. A cúpula protege o sensor contra a exposição ao ambiente exterior e preserva um campo de visão de 180° . O elemento sensível dos piranómetros é normalmente uma termopilha com um absorvedor térmico composto por tinta preta e com uma série de termopares

colocados horizontalmente cujos extremos são soldados com barras de metais verticais. O fluxo de calor é transmitido à termopilha gerando uma tensão eléctrica proporcional à diferença de temperatura entre os metais dos termopares. Outra configuração bastante utilizada é composta por um absorvedor térmico de tintas preta e branca, ordenadamente depositadas na forma de triângulos brancos nas junções passivas e triângulos pretos nas junções activas.

Tendencialmente, os piranómetros registam um *output* negativo (*offset*) durante a noite cujo efeito se propaga nas medidas efectuadas durante o dia. Este fenómeno é provocado pela existência de trocas energéticas entre o sensor e a cúpula que o protege. O *offset* constitui uma fonte primária de erros nas medidas efectuadas. Como referência quantitativa menciona-se o valor médio resultante de estudos já efectuados: $-1,67\text{Wm}^{-2}$ o *offset* nocturno de um instrumento *Kipp & Zonen CM11* (modelo utilizado na aquisição de algumas medidas de radiação aqui tratadas) (Jeffries, 2001).

Os pirheliómetros são os instrumentos utilizados para a medida da radiação solar directa e são caracterizados por uma forma tubular fechada com uma abertura frontal com um pequeno campo de visão (ângulo sólido) que deverá incluir, tanto quanto possível, apenas o disco solar e a região vizinha do mesmo (um pequeno desvio na direcção do instrumento com uma pequena abertura adaptada a apenas o disco solar pode introduzir grandes erros). O sensor encontra-se posicionado na base do tubo. Este equipamento requer, para precisão, um sistema automático acoplado de seguimento do sol de modo a manter o seu alinhamento. As medidas obtidas pelo pirheliómetro são particularmente interessantes para estudos de aproveitamento da energia solar, mais precisamente, para captadores solares concentradores uma vez que são munidos de tecnologia de seguimento do movimento aparente do sol.

Para determinar a radiação difusa é possível fazer a diferença entre as medidas simultâneas das radiações global e directa ou pode ser medida usando um piranómetro no qual é feito a intercepção da radiação directa sobre o sensor usando um pequeno disco ou, mais frequentemente, usando um anel metálico com posição ajustável. Para manter o piranómetro sombreado este deve estar posicionado sobre o eixo do anel e há que posicionar esse mesmo anel de forma que o seu eixo permaneça paralelo ao eixo da polar da terra. O anel deve então ser deslocado periodicamente para compensar a variação da declinação solar. A parte interna do anel deve ser revestida em preto fosco para minimizar a reflexão sobre o sensor do piranómetro e a externa revestida a branco para reflectir a radiação incidente.

Calibração e instalação de piranómetros e pirheliómetros

Piranómetros e pirheliómetros são os instrumentos mais comuns para medições de irradiância e também os mais relevantes para o presente trabalho. Nesse sentido far-se-á referência, no entanto não exaustiva, aos métodos de calibração e cuidados de instalação dos mesmos.

Uma calibração precisa dos instrumentos utilizados na recolha de dados é crítica uma vez que incertezas nas medidas podem prejudicar as séries temporais de registos assim como estudos de validação de modelos radiativos.

Na calibração de um piranómetro ou pirheliómetro determina-se o factor de calibração e a sua dependência com a temperatura; nível e distribuição espectral e angular da irradiância; inclinação do instrumento.

Os métodos utilizados para calibração de piranómetros englobam comparações com pirheliómetro padrão e piranómetro com anel de sombra, com piranómetro padrão ou medidas em laboratório com fonte luminosa artificial (Carvalho et al., 2010). Alguns destes métodos são métodos ISO, por exemplo: ISO 9846 — *Calibration of a Pyranometer using a Pyrheliometer*; ISO 9847 — *Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer*.

Para calibração de pirheliómetros é normalmente feita uma comparação com um pirheliómetro absoluto (de referência): ISO 9059 — *Calibration of field pyrheliometers by comparison to a reference pyrheliometer* (Carvalho et al., 2010).

O sinal de saída tanto do piranómetro como do pirheliómetro é então afectado do respectivo factor de calibração de modo a obter valores de radiação em unidades W/m^2 .

O *World Radiation Center* em Davos (WRC) é responsável por manter a referência básica dos instrumentos do grupo mundial de *standards* (*World Standard Group* – WSG) que são usados para estabelecer a referência radiométrica mundial (*World Radiometric Reference* – WRR). O WRR é periodicamente transmitido aos centros nacionais permitindo assim a calibração individual dos instrumentos de que dispõem de acordo com os seus próprios *standards*. Os instrumentos do WSG são submetidos a inter-comparações em pelo menos uma vez por ano e os factores de calibração são também ajustados todos os cinco anos com comparações internacionais (WMO, 2008)

Para a instalação de um piranómetro há que ter em conta uma nivelção apropriada e a escolha de um local livre de obstáculos (sombras, fontes luminosas artificiais, superfícies reflectoras). Um pirheliómetro apresenta os mesmos requisitos de instalação que os piranómetros nomeadamente num local livre de obstruções ao feixe solar em todas as horas do dia e em todas as estações do ano. No caso de registo contínuo poderá ser necessária uma protecção contra a chuva ou neve. Deve se ter também em conta que o local escolhido seja o mais típico possível da área envolvente em termos de condições de poluição atmosférica, fumos ou névoas.

Em Robinson (1966), Duffie et al. (2006) e WMO (2008) são apresentados e discutidos em detalhe os tópicos relacionados com a instrumentação aqui referida.

1.5.2 Outros instrumentos

O heliógrafo, um outro instrumento pertencente a uma abordagem clássica de medições, permite o registo do número de horas de insolação (parâmetro muitas vezes utilizado para descrição de recurso em sistemas de aproveitamento energético solar). O modelo mais difundido é conhecido como heliógrafo de *Campbell-Stokes*, que dispõe de uma esfera de quartzo que focaliza os raios solares sobre uma fita de papel graduada, em horas, que queima localmente marcando o período em que a radiação directa não se encontra obstruída por nebulosidade.

Outra instrumentação é utilizada quando se pretende medidas de radiação solar numa banda espectral superior à normalmente considerada para aplicações de aproveitamento energético (banda correspondente ao visível), como por exemplo pirradiómetros que permitem a medição do fluxo radiativo descendente de longo comprimento de onda. O pirradiómetro por sua vez permite o registo de radiação de pequeno comprimento de onda (de origem solar) e de grande comprimento de onda (de origem terrestre e atmosférica). Este tipo de sensor permite a medida de não só fluxos descendentes de radiação como também de fluxos ascendentes.

Em anexo, Anexo A, encontra-se uma tabela descritiva e a título de resumo dos diferentes instrumentos meteorológicos destinados à medida de fluxos radiativos (WMO, 2008).

2. Observações de radiação *in situ*

Oa valore observados utilizados para comparação com as simulações WRF dizem respeito a duas (ilhas) localizações geográficas:

- Terceira: 38,673° Latitude; -27.251° Longitude
- Graciosa: 39.091° Latitude; -28.029° Longitude

Todos os ficheiros e cálculos foram processados e executados em Matlab.

Para ambas as ilhas, os ficheiros horários foram construídos considerando que uma certa hora H compreende os valores entre H-1 e H: por exemplo para as 5 horas corresponde o período 4:10, 4:20, ..., 4:50 e 5:00.

2.1 Terceira

Os dados a processar são ficheiros CSV diários com registos efectuados em UTC e em intervalos de 5 segundos obtidos durante o período de 06/08/2004 a 22/12/2007 na estação meteorológica do Instituto de Meteorologia – Delegação dos Açores em Angra do Heroísmo.

No Anexo B encontra-se discriminado o conteúdo dos ficheiros. No âmbito deste trabalho foram analisados apenas os dados de interesse: valores médios de radiação global, difusa e directa.

Na tabela 2 faz-se referência aos instrumentos utilizados na estação meteorológica da ilha Terceira e aos respectivos factores de calibração (tal como já foi mencionado nas secções anteriores é necessário corrigir os valores registados em mV para unidades Wm^{-2}).

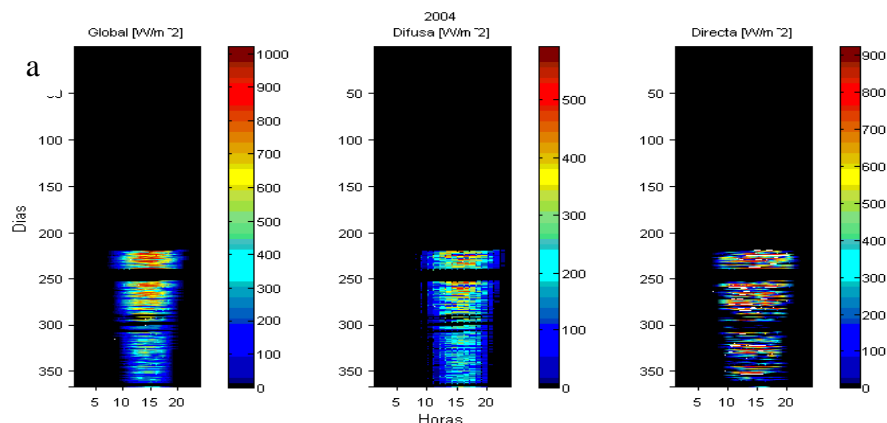
Tabela 2 – Instrumentos e respectivos modelos e factores de calibração utilizados para aquisição de medidas de radiação solar na estação meteorológica da ilha Terceira (Carvalho et al. 2010).

Componente radiativa		Modelo / Factor calibração [$W.m^{-2}mV^{-1}$]
Global	Piranómetro	Kipp & Zonen CM 11/14 190.48
Difusa	Piranómetro	Kipp & Zonen CM 11/15 + anel sombreamento 195.31
Directa	Piréliometro	Eppley NIP 122.25
Aquisição de dados	AWS	Milus 500 (Vaisala)

O *offset* dos dados foi considerado negligenciável pois o seu valor médio diário é inferior a $1 Wm^{-2}$. Assim sendo, determinou-se a hora de nascer e pôr de Sol e anularam-se os valores nocturnos.

2.1.1 Componentes radiativas: médias horárias, diárias e mensais

Nas figuras abaixo estão representadas as medidas correspondentes a radiação global, difusa e directa (medida na direcção do Sol) .



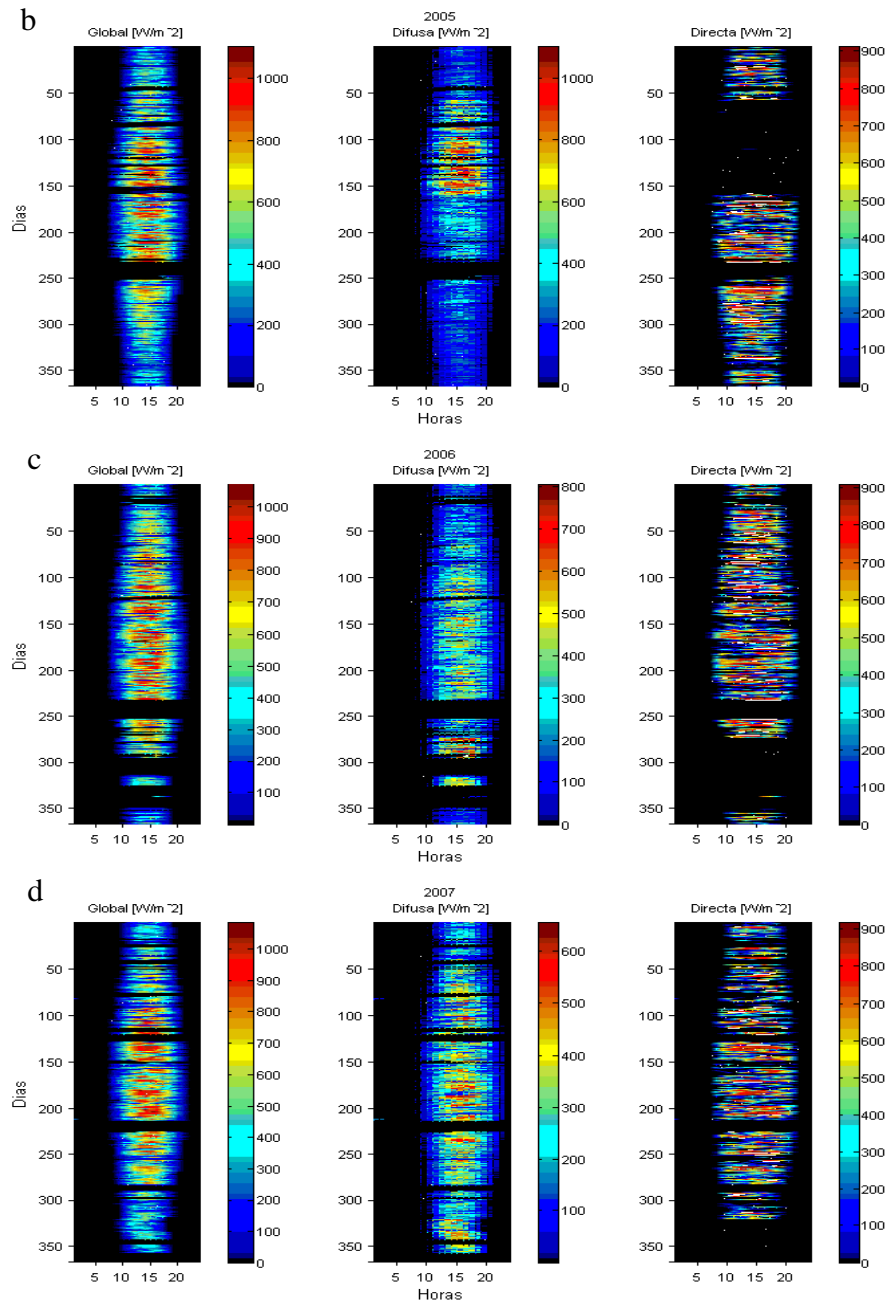


Figura 1 – Médias horárias das componentes radiativas medidas na ilha Terceira. Registos de (de cima para baixo): a) 2004; b) 2005; c) 2006 e d) 2007.

Observam-se vários períodos com falhas de registos. Na realidade algumas destas falhas são apenas aparentes uma vez que, e principalmente na componente directa, verificou-se existir medidas com valores bastante reduzidos particularmente pronunciados em 2005 e 2006. Estes valores não são favorecidos em representação gráfica. No entanto e dado que não se verificou anomalia no registo dos mesmos são, embora a sua baixa magnitude, utilizados em todas as comparações e correlações efectuadas no trabalho subsequente.

Na figura 2 figuram as médias radiativas diárias e mensais. Para uma melhor análise visual e relação com as outras componentes, são também representados os valores correspondentes ao plano horizontal para a radiação directa. São bastante evidentes os períodos onde se observa radiação directa extremamente baixa mas por outro lado os registos de radiação difusa complementam-os comparando estas duas componentes com a radiação global.

Decidiu-se assim manter na análise os valores reduzidos de directa que ao início foram classificados como suspeitos. Ainda assim não se exclui a hipótese da existência de um qualquer erro ocorrido nas medidas (como por exemplo, falhas no alinhamento do pirheliómetro com o Sol). O padrão de radiação difusa no período correspondente ao primeiro semestre do ano 2005 e ao último trimestre de 2006 sugerem também que os registos poderão ter fraca qualidade.

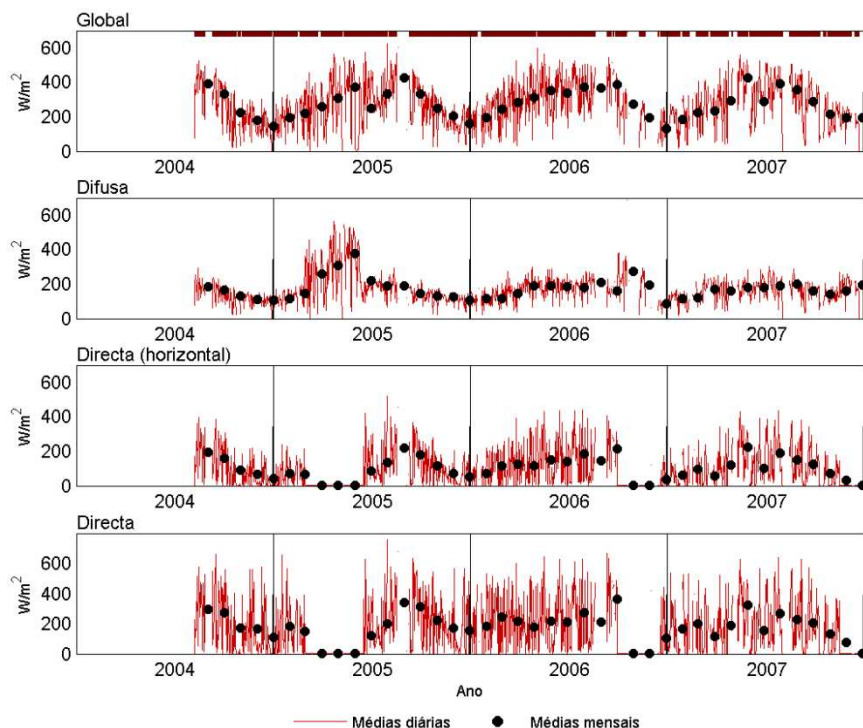


Figura 2 – Séries temporais de médias diárias e mensais da radiação global, difusa e directa registadas na ilha Terceira. **Nota:** No topo da representação de radiação global figura uma linha cronológica dos dias excluídos neste estudo (187 entre 1242).

Foram excluídos 187 dos 1242 dias disponíveis com dados registados. Esta exclusão contempla os dias em que se verificou existirem falhas no registo de alguma das componentes, ou seja, são contemplados na análise deste trabalho apenas os dias em que se verifica ocorrência de registos completos de todas as componentes radiativas em simultâneo. As medidas de radiação directa foram as principais responsáveis desta exclusão. Para auxiliar a leitura do gráfico acima apresenta-se também a distribuição dos dias excluídos por mês ao longo da série de dados.

Tabela 3 – Distribuição por mês e ano do número de dias excluídos na análise aos dados de radiação da ilha Terceira.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<i>2004</i>	-	-	-	-	-	-	-	10	8	3	2	2
<i>2005</i>	0	3	4	0	3	0	0	14	6	0	0	0
<i>2006</i>	6	0	0	0	2	0	0	11	14	13	18	13
<i>2007</i>	4	8	4	4	9	0	0	11	0	7	0	14

2.2 Graciosa

Para a ilha Graciosa foram utilizados os dados disponibilizados no *Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Climate Research Facility (mobile facility- AMF)*. O período de aquisição de dados foi entre 16/04/2009 e 31/12/ 2010 no âmbito do projecto *Clouds, Aerosol and Precipitation in the Marine Boundary Layer (CAP-MBL)* (ARM, 2011).

Tal como na ilha Terceira o conjunto de radiómetros utilizados diz respeito a piranómetros para medidas de radiação global e difusa e pirheliómetro para radiação directa. Embora não tenha sido possível identificar os modelos da instrumentação utilizada na tabela 4 identificam-se os factores de calibração correspondentes.

Tabela 4 – Factores de calibração para os radiómetros utilizados na aquisição de medidas de radiação solar na estação AMF-ARM da ilha Graciosa (ARM, 2011).

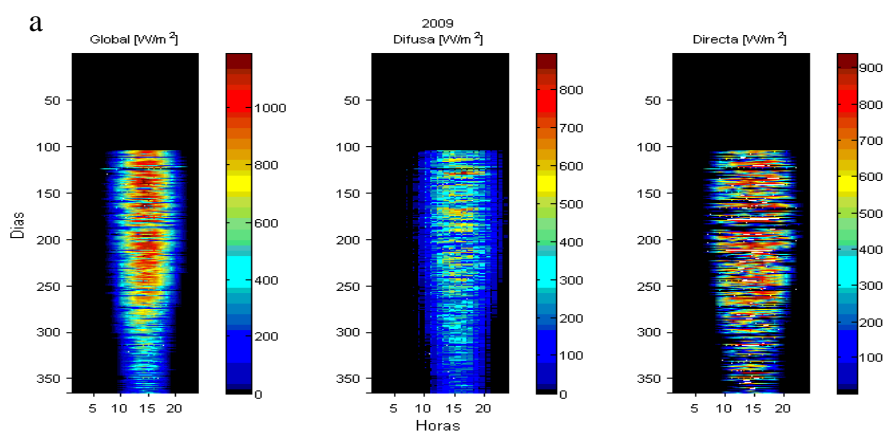
Componente radiativa		Factor calibração [$W.m^{-2}mV^{-1}$]
Global	Piranómetro	108.48
Difusa	Piranómetro	120.91
Directa	Pirheliómetro	124.97

Os dados utilizados correspondem às medidas de *Shortwave broadband total downwelling irradiance* em ficheiros netCDF diários com registos efectuados em UTC e em intervalos de 20 segundos. Pode ser consultado o conteúdo dos ficheiros no Anexo C.

À semelhança dos dados da ilha Terceira, o *offset* dos dados foi também considerado negligenciável.

2.2.1 Componentes radiativas: médias horárias, diárias e mensais

Apresentam-se então aqui as médias horárias calculadas para os dados *in situ* da ilha Graciosa.



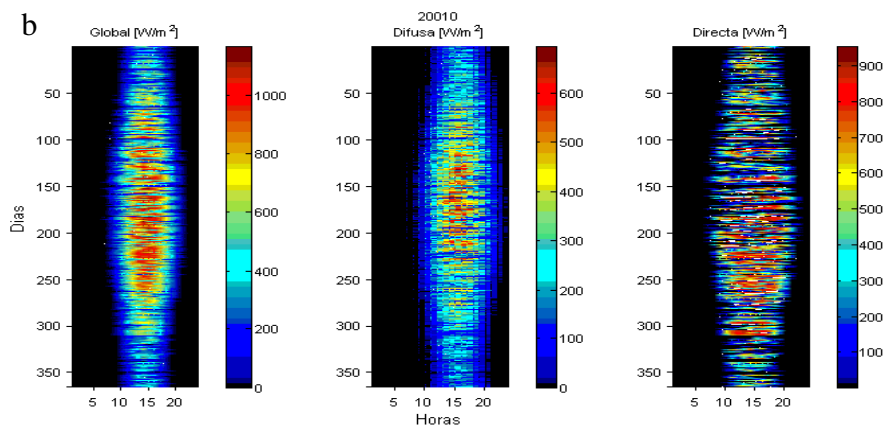


Figura 3 – Médias horárias das componentes radiativas medidas na ilha Graciosa. Registos (de cima para baixo) de: a) 2009; b) 2010.

Estes dados são bastante regulares com falhas quase inexistentes. Dos 625 dias com registos apenas 2 foram negligenciados por falta de simultaneidade nos registos de radiação global, difusa e directa. Da mesma forma que na ilha Terceira também se verificam aqui alguns casos de radiação directa bastante baixa que se assemelham a valores nulos na representação gráfica mas, tal como já foi exposto na secção anterior, estes dados integram a análise realizada.

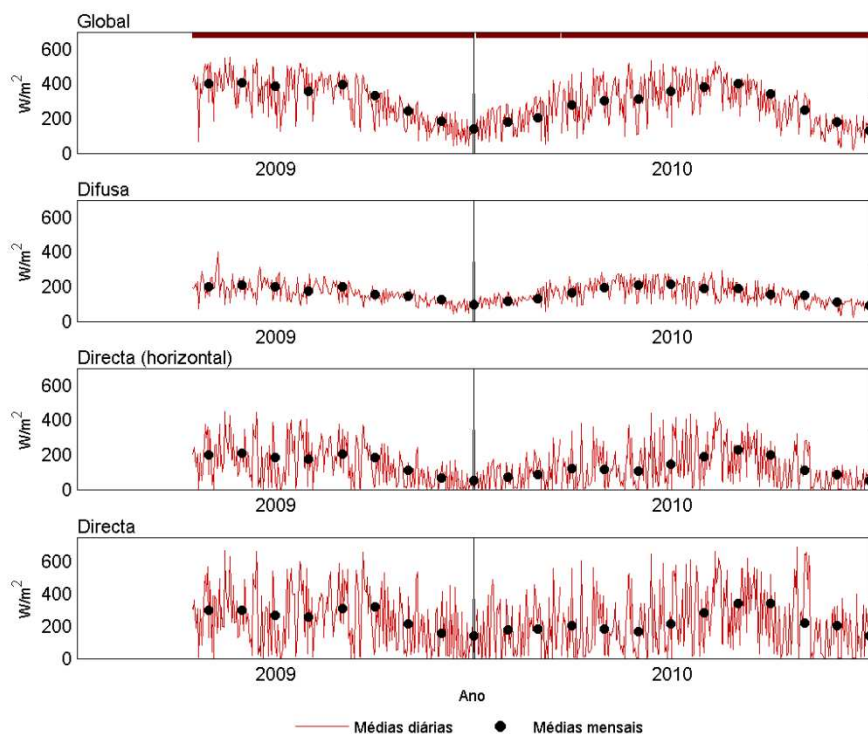


Figura 4 – Séries temporais de médias diárias e mensais da radiação global, difusa e directa registadas na ilha Graciosa. **Nota:** No topo da representação de radiação global figura uma linha cronológica dos dias excluídos neste estudo (2 entre 625).

As médias diárias e mensais da radiação à superfície na ilha Graciosa (figura 4) são nitidamente mais regulares que no caso da ilha Terceira.

3. Simulações WRF

3.1 WRF

O WRF (*Weather Research and Forecast*) é um sistema de modelação numérica da atmosfera orientado para a pesquisa de fenómenos atmosféricos de microescala e de mesoscala e para a previsão do tempo de mesoscala. O WRF é um modelo em constante desenvolvimento na direcção em que seja aperfeiçoada a capacidade de modelar correctamente os fenómenos atmosféricos. Uma descrição detalhada da física e dinâmica do modelo pode ser consultada na documentação *ARW User's Guide* (Wang et al., 2008) e em *A description of the Advanced Research WRF version 3* (Skamarock et al., 2008).

O domínio de simulação do WRF é o espaço físico representado por uma malha tridimensional no espaço de cálculo. A posição da malha no globo terrestre pode ser definida pelas coordenadas de latitude e longitude correspondentes ao centro geométrico ou a outro qualquer ponto. Como o modelo representa uma área limitada, depende do fornecimento de condições fronteira laterais e que devem representar tanto quanto possível o estado real da atmosfera vizinha ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Esta informação diz respeito a resultados de um outro modelo de previsão numérica do tempo em escala global e que considera todo o globo terrestre.

No WRF é possível aninhar (*nesting*) um domínio mais pequeno (*nest*), com uma malha mais fina, no interior de um domínio maior com uma malha mais larga (*parent*). As condições fronteiras do domínio interior são controladas pelo domínio principal. Uma vez que o incremento temporal de integração é normalmente reduzido pela proporção entre os espaçamentos da malha de menor resolução e da malha fina esta abordagem é vantajosa em termos computacional definindo uma malha mais fina para uma área restrita (a qual requer uma solução) ao invés de se ter a mesma malha em toda a parte de um só domínio. Além disso uma corrida feita unicamente com um domínio de elevada resolução “encostado” à malha do modelo global teria uma definição espacial e temporal das suas condições fronteira mais pobre (Ferreira, 2007). Um *parent* pode conter mais do que um *nest* salvaguardando a condição de que as suas áreas não se sobreponham. Evidentemente qualquer *nest* se pode tornar no domínio principal de um outro mais pequeno aninhado neste. Requer-se ainda que os domínios aninhados tenham os lados alinhados pela malha mais larga e que os cantos dos sub-domínios também sejam coincidentes com os nós desta. É também aconselhado uma razão de 3:1 entre os domínios *parent* e *nest*.

O modelo com *nesting* pode ser corrido sem que ocorra transferência de informação de um *nest* para o seu *parent*, podendo os dois ser corridos em simultâneo ou não (neste caso para o seu processamento o *nest* recorre ao *output* do seu *parent*) ou, então, há uma transmissão bidireccional de informação do sub-domínio para o domínio principal (*two-way nesting*). Como num mesmo intervalo de incremento de tempo o sub-domínio dá mais passos que o domínio principal este transmite informação do seu estado actual a todos os nós da malha maior coincidentes com os nós da malha inferior (Ferreira, 2007; Gill et al., 2011). Os dados simulados para este trabalho foram processados em *one-way nesting* (sem a interacção *two-ways*).

Os processos físicos de sub-escala são parametrizados e o modelo WRF apresenta inúmeros esquemas alternativos para a sua representação. Os esquemas de parametrização que representam as trocas radiativas de pequeno comprimento de onda (SW) são: Dudhia (Dudhia, 1989), Goddard (Chou et al., 1994), Eta Geophysical Fluid Dynamics Laboratory – GFDL (Lacis et al., 1974), NCAR Community Atmosphere Model – CAM (Collins et al., 2004). Os valores de SW são determinados tendo em conta a absorção e difusão; fluxos ascendentes são dependentes do albedo, na atmosfera são determinados pelo conteúdo de vapor/nuvens, dióxido de carbono, ozono e concentrações de gases na

atmosfera. Várias opções são possíveis para a parametrização do modelo (Iacono, 2011). A simulação analisada no presente estudo foi realizada utilizando o esquema CAM pois este permite que haja uma alteração na concentração dos gases de estufa na atmosfera ao longo do tempo.

Para validar os resultados de um modelo atmosférico como o WRF podem realizar-se comparações dos mesmos com os de um modelo analítico análogo, com formulações alternativas do próprio modelo em análise, com observações, com outro modelo numérico ou até com verificação dos balanços que exprimem conservação de massa e energia. Embora neste trabalho tenha sido apenas contemplado a comparação com observações é nesta matéria que se verifica existir o principal obstáculo devido à escassez destas. As medidas à superfície são bastante importantes, muitas vezes não substituíveis por outros meios (observações de satélite) e no entanto não existe uma cobertura suficientemente densa para o mapeamento detalhado à escala de interesse (Ferreira, 2007). Em radiação solar e quando se considera áreas com condições de nebulosidade bastante intermitente este tema é crítico.

3.1.1 Topografia e radiação global WRF (SWDOWN)

Do WRF a variável de saída que interessa ao propósito deste trabalho é a *Downward short wave flux at ground surface* (SWDOWN) que vem dada em W/m^2 e que se refere a radiação solar global.

O domínio das simulações corresponde a uma resolução de 2 km. As simulações analisadas neste trabalho partiram de simulações com domínios superiores de trabalhos realizados para a região do arquipélago dos Açores no período 1989-2010 (Tomé, 2011). As simulações WRF foram efectuadas como *downscaling* para o período 2004-2010 pois compreendia o período dos dados analisados das estações Terceira e Graciosa.

O *downscaling* (simulações realizadas com domínios aninhados sucessivos) promove uma melhoria nas simulações pois implicará resultados com uma maior exactidão e representação da realidade de várias variáveis características do escoamento atmosférico, topografia, usos do terreno (Mass et al., 2002).

A topografia associada aos domínios estudados no WRF é determinada por interpolação (métodos de interpolação descritos na secção *Available Interpolation Options in Geogrid and Metgrid* do *WRF User's Guide* (Wang et al., 2010)). A topografia no WRF (variável de saída *Terrain height – HGT*), portanto, não corresponde exactamente à realidade. Quando o objecto de estudo se refere a uma porção pequena de terra a discrepância entre realidade e modelo chega a tornar-se bastante evidente.

Além do HGT o WRF também determina quais os pontos da grelha que correspondem a uma superfície terrestre ou caso contrário água (oceano). A LANDMASK (LM) no WRF define com valor unitário os pontos correspondentes a terra e como valor nulo os pontos correspondentes a oceano (neste caso que se refere a ilhas no oceano). Nas figuras 6a e 6b a linha vermelha representa o limite entre esta distinção terra-água. É este o limite das ilhas “vistas” pelo WRF. Nas figuras também se representa, em linha branca, os limites das ilhas segundo o modelo de relevo de superfície mundial ETOPO1 (Amante et al., 2009) e que se considera como a melhor representação da topografia local.

Tal como se esperava existe alguma diferença entre os limites “vistos” pelo WRF e a realidade. É na ilha Graciosa que existe a maior diferença não só entre os limites da ilha (a branco e a vermelho) como também no limite associado à topografia.

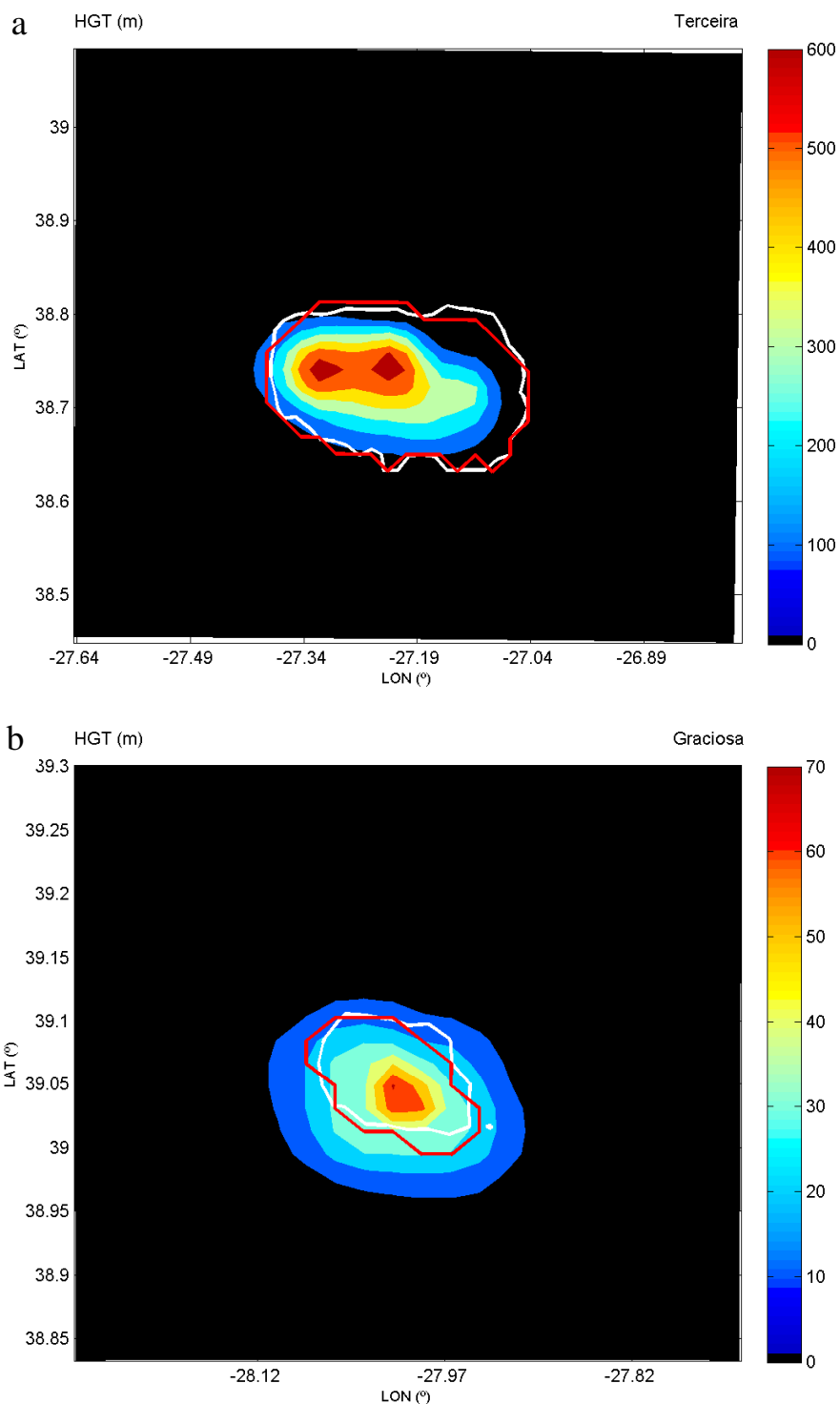


Figura 6 – Topografia no domínio do WRF na ilha Terceira (a) e Graciosa (b). Contorno branco corresponde a limite da ilha segundo o modelo topografia ETOPO1. Contorno vermelho corresponde a limite da ilha de acordo com a variável LANDMASK do WRF.

Nas figuras 7a e 7b estão representados os resultados das simulações para, respectivamente, a Terceira e Graciosa, definidos em médias diárias e mensais, apenas para os pontos correspondentes à localização das estações onde foram efectuadas as medidas *in situ*. Estes pontos foram determinados analisando qual o par latitude-longitude da grelha mais próximo das coordenadas das estações e calculando o valor médio de SWDOWN das quatro células da grelha contíguas a esse mesmo par. As

figuras com os resultados do WRF estão acompanhadas pela representação das medidas de radiação global para mera comparação da extensão temporal de ambos

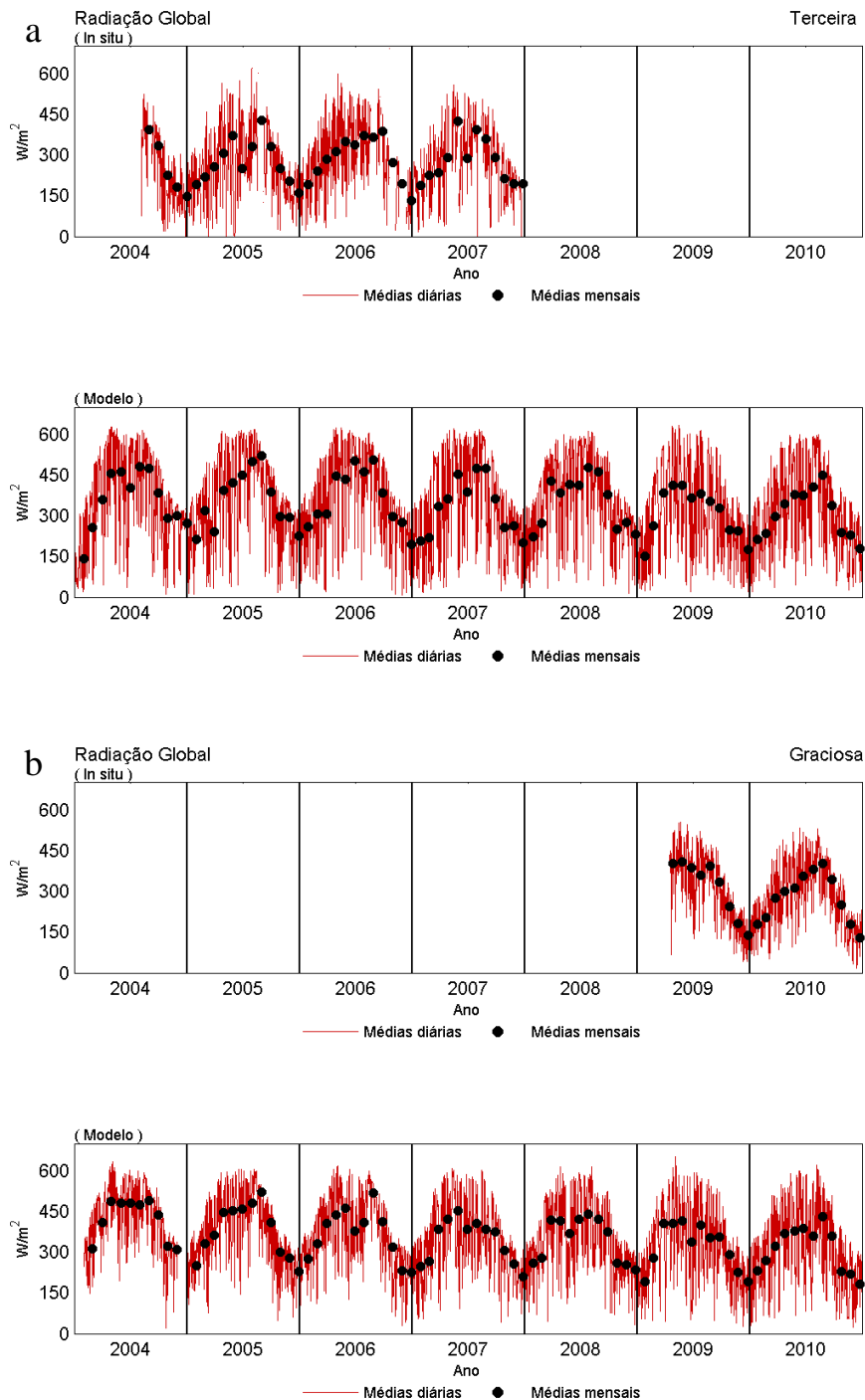


Figura 7 – Séries temporais de médias diárias e mensais da radiação global medida na ilha Terceira (a) e Graciosa (b) simuladas no WRF no ponto correspondente à localização da respectiva estação.

Os valores médios das séries temporais completas observadas e previstas são, respectivamente, 293 W/m^2 - 353 W/m^2 para Graciosa e 276 W/m^2 - 340 W/m^2 para Terceira.

4. Avaliação WRF com radiação *in situ*

4.1 Comparação SWDOWN e radiação global observada

Numa primeira análise foram comparados os valores estimados e valores medidos de radiação global nos períodos para os quais os mesmos existem em simultâneo. Tanto para a ilha Graciosa como para a ilha Terceira há indícios, observando as figuras seguintes, de que o modelo tende a sobrestimar a radiação global.

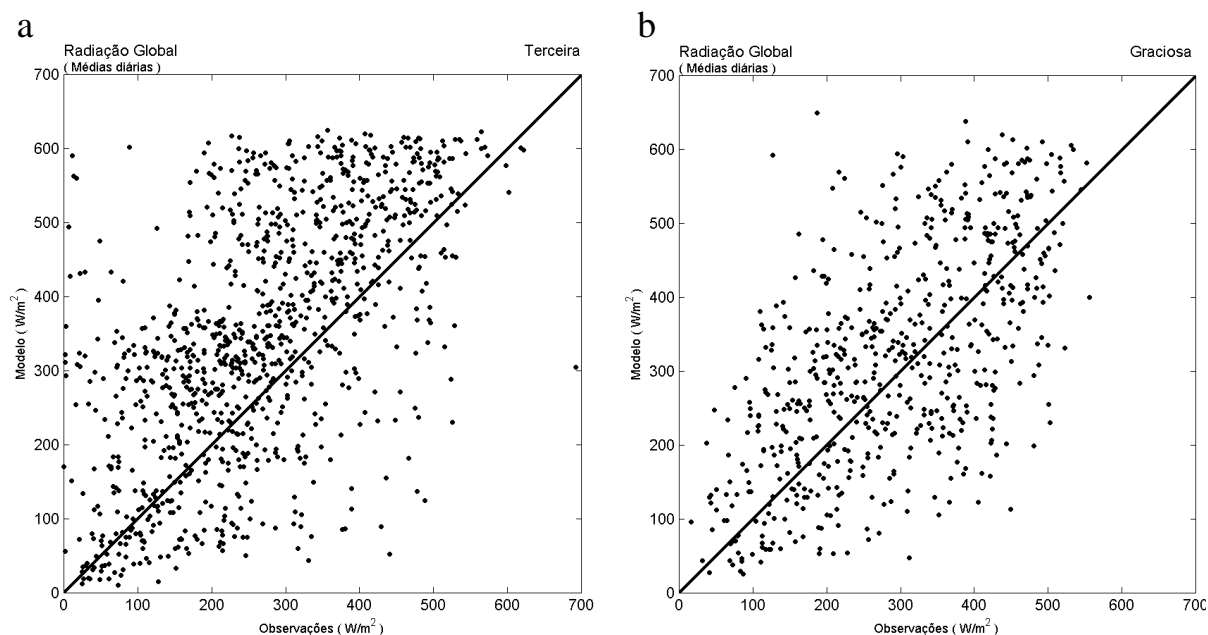


Figura 8 – Comparação entre as médias diárias calculadas pelas estimações do modelo e medidas nas estações da a) Terceira (1057 pontos) e b) Graciosa (623 pontos). A linha 1:1 é mostrada apenas como referência.

4.1.1 Métodos de análise estatística

O desempenho das simulações de SWDOWN do WRF é avaliado sendo, portanto, objecto de análise estatística. Descreve-se então aqui as variáveis determinadas nesta análise.

O erro médio (BIAS) como o desvio médio dos valores estimados para com os valores medidos e o erro médio percentual (BIASP), o erro absoluto médio (MAE), o erro percentual absoluto médio (MAPE), o erro quadrático médio (RMSE) representando uma medida de precisão, e o coeficiente de correlação (r). O MAE e o RMSE são medidas semelhantes, indicam a magnitude do erro médio mas a indicação do tamanho relativo da diferença média entre observações e previsões é descrita pelo viés (BIAS), um BIAS negativo indica que as previsões são subestimadas comparadas com as observações. Não obstante alguma redundância entre estes índices estatísticos serão apresentados os seus resultados para os três modelos em análise.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (p_k - o_k) \quad (12)$$

$$BIASP = \frac{BIAS}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N o_k} \quad (13)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |p_k - o_k| \quad (14)$$

$$MAPE = \frac{MAE}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N o_k} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (p_k - o_k)^2} \quad (16)$$

$$r = \frac{\sum_{k=1}^N (o_k - \bar{o})(p_k - \bar{p})}{\sqrt{(\sum_{k=1}^N (p_k - \bar{p})^2)(\sum_{k=1}^N (o_k - \bar{o})^2)}} \quad (17)$$

4.1.2 Análise de erros

Os erros e correlações calculados entre os dados de radiação global medida na ilha Terceira e Graciosa e simulados pelo WRF são surpreendentemente bons para os valores médios. Na ilha Graciosa a correlação linear é sempre superior a 0.9, os valores de MAE e BIAS não são superiores a 45 W/m² e MAPE está no intervalo [10 -15] %.

Na Terceira, também para valores médios mensais, o MAPE, em toda a série de dados, é de cerca de 28%, o valor de BIAS cerca de 75 W/m² e as correlações são ligeiramente inferiores mas sempre acima dos 0.8.

No caso dos valores diários os resultados são, como seria de esperar, significativamente piores. Em particular o coeficiente de correlação é próximo de 0.6, o que é sinal de dificuldades para modelos de previsão diária que se baseiem na radiação global. No entanto para investimentos em sistemas de aproveitamento energético da radiação solar, nomeadamente fotovoltaico, a quantificação da conversão energética mensal e/ou anual tem maior interesse que o respectivo valor diário. Por este motivo é destacado o desempenho do modelo conseguido tendo em conta os valores médios mensais.

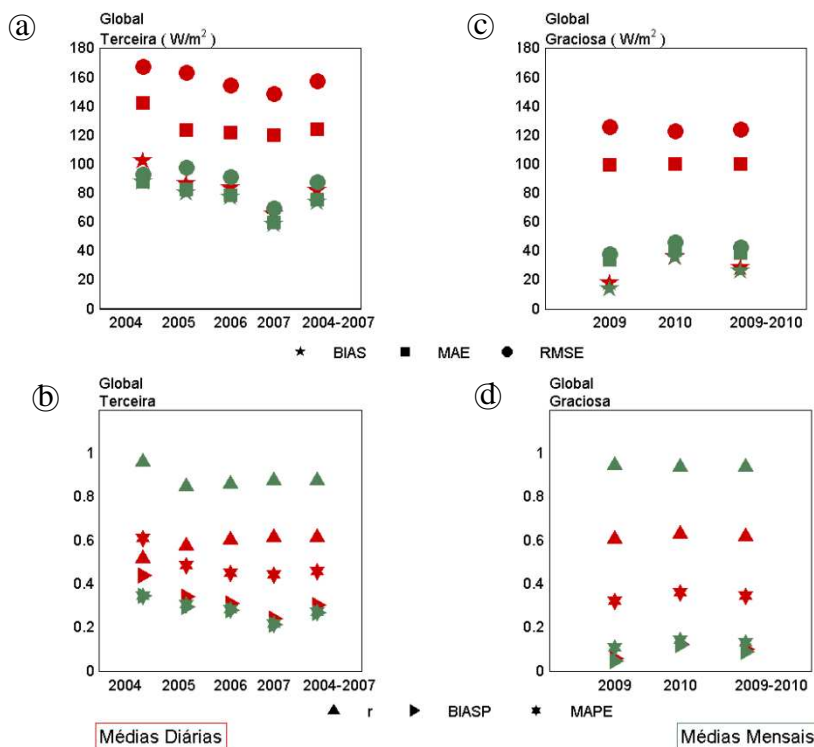


Figura 9 – Análise estatística entre as médias diárias (a vermelho) e mensais (a verde) dos dados simulados pelo WRF (SWDOWN) com radiação global observada na ilha Terceira (a e b) e Graciosa (c e d): valores de BIAS, MAE e RMSE (a e b) e r, BIASP e MAPE (b e d). Nos figuras r, BIASP e MAPE são representados em escala unitária.

Note-se que os dados da ilha Graciosa, expostos na secção anterior, são bastante coerentes entre si, ou seja, há nexos no padrão das componentes difusa e directa por si e como partes da radiação global. Para os dados da ilha Terceira a mesma afirmação não tem validade. Os erros mais elevados na análise para a Terceira poderão ser consequência da inclusão de dados em análise com baixa qualidade. As características dos dados relativos ao primeiro semestre de 2005, por exemplo, podem levar a esse tipo de leitura sobre os mesmos.

Na figura 10 apresentam-se os erros determinados para avaliar o desempenho do WRF em previsões sazonais e não anuais. Esta análise foi feita com os valores médios diários separados por trimestres. Para a Terceira os dados incluídos nos cálculos – Set/2005 a Ago/2006 – foram seleccionados de forma a excluir o período correspondente ao primeiro semestre de 2005 e ao último trimestre de 2006 e a considerar os períodos com o mínimo de falhas possíveis (ver tabela 3). Para a Graciosa considerou-se o período Set/2009 a Ago/2010.

Verifica-se que as correlações dos dados entre modelo e observações na ilha Terceira não foram favorecidas nesta análise sazonal assim como os erros MAPE e BIASP que se mantêm com a mesma amplitude. Nos trimestres Jun-Jul-Ago (JJA) e Dez-Jan-Fev (DJF) o BIASP supera em cerca de 10% o valor apurado para os trimestres Set-Out-Nov (SON) e Mar-Abr-Mai (MAM). Na ilha Graciosa também a correlação se mantém baixa com erros MAPE a variar entre trimestres num intervalo de [30-45] %. As percentagens de erro no trimestre JJA são as mais baixas mas é também nesse mesmo trimestre que a correlação entre os dados é mais baixa.

Para concluir quais das estações, médias ou extremas, são melhor previstas pelo modelo seria necessário comparar um maior número de trimestres de diferentes anos.

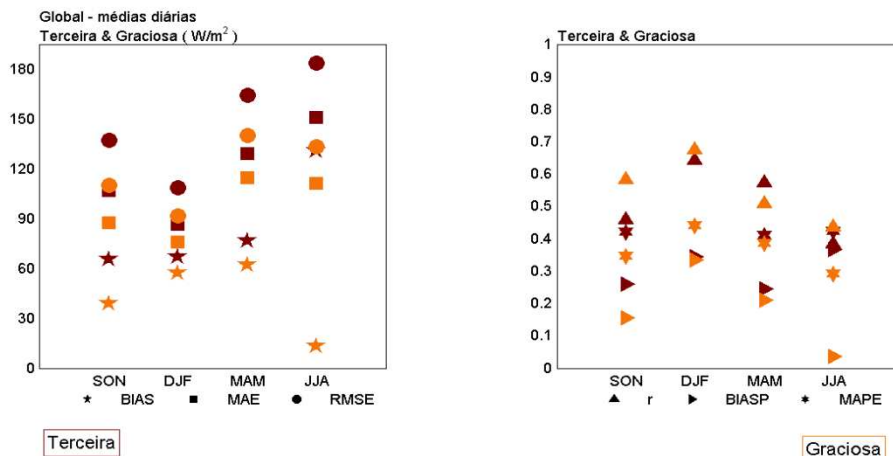


Figura 10 – Análise estatística sazonal entre as médias diárias dos dados simulados pelo WRF (SWDOWN) com radiação global observada na ilha Terceira (acastanho) e Graciosa (a laranja): valores de BIAS, MAE e RMSE, r , BIASP e MAPE. Nos figuras r , BIASP e MAPE são representados em escala unitária.

4.2 Componente difusa e directa de SWDOWN

Uma “limitação” do WRF mas incontornável neste trabalho diz respeito à variável SWDOWN representar a radiação global e não existir portanto de forma directa informação sobre a componente difusa e directa da radiação. Uma análise de existência (e possivelmente tipo) de nuvem numa dada célula da grelha do domínio estudado pode constituir uma via de inferência para a modelação da componente difusa e conseqüente componente directa.

Neste trabalho houve, portanto, a necessidade de modelar a componente difusa e directa partindo de valores de radiação global.

Mais adiante será descrito uma abordagem que constituirá uma análise paralela entre nebulosidade observada e prevista pelo WRF para assim constituir também uma validação do modelo. A nebulosidade é uma variável inerente a um estudo da radiação solar que atinge a superfície terrestre.

4.2.1 Modelos Erbs, Collares-Pereira e Ridley-Boland-Lauret

No estudo de eficiências e previsão de desempenhos de sistemas energéticos solares importa existir um conhecimento alargado sobre a radiação solar disponível não só na perspectiva global mas também dos padrões esperados de radiação difusa e directa. A componente directa é especialmente determinante para análise de desempenho de sistemas concentradores.

Os modelos de estimação de componentes difusa (e directa) partindo de valores conhecidos de radiação global podem ser adequados para uma dada região e não apropriados para uma outra pois as características atmosféricas (tal como a turbulência (Gueymard, 2005)) não são estáticas de local para local (Katsoulis, 1991; Oliveira et al., 2002; Boland et al., 2007; Ridley et al., 2010; Gueymard, 2005).

Na sua maioria os modelos que decompõem radiação global em difusa-directa através da análise da fracção de radiação global numa superfície horizontal que é difusa (I_D/I_G) usando uma variável independente – o *clearness index* (índice de céu limpo), diário K_T ou horário k_T . As equações 12 e 13 definem estas variáveis.

$$k_T = \frac{I_G}{H_0} \quad (18)$$

$$K_T = \frac{\sum_{j=1}^{24} I_{G_j}}{\sum_{j=1}^{24} H_{0_j}} \quad (19)$$

H_0 representa a radiação extraterrestre (equação 14) e I_G a radiação global medida, ambas médias horárias (Duffie et al., 2006).

$$H_0 = H_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) (\cos \phi \cos \delta \cos h + \sin \phi \sin \delta) \quad (20)$$

$H_{sc} = \text{constante solar}$

$n = \text{dia do ano}$

Vários e diferentes modelos têm sido desenvolvidos com o objectivo de decompor as mais comumente registadas medidas de radiação global. Para uma consulta sobre as diferentes categorias de modelos existentes e exemplificação de cada uma delas reporta-se à secção *Decomposition models* do trabalho desenvolvido por Lanini (2010).

No trabalho aqui desenvolvido foram analisados três modelos distintos. O modelo estabelecido por Erbs tal como exposta em Duffie et al., (2006) para determinação de média horária de componente difusa e directa:

$$\frac{I_{Df}}{I_G} = \begin{cases} 1.0 - 0.09 k_T, & k_T \leq 0.22 \\ 0.09511 - 0.1604 k_T + 4.388 k_T^2 - 16.638 k_T^3 + 12.336 k_T^4, & 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165, & k_T > 0.80 \end{cases} \quad (21)$$

bem como o modelo de Collares-Perreira e Rabl (cf Duffie et al., 2006) para cálculo de médias diárias das mesmas componentes:

$$\frac{I_{Df}}{I_G} = \begin{cases} 0.99, & K_T \leq 0.17 \\ 1.188 - 2.272 K_T + 9.473 K_T^2 - 21.865 K_T^3 + 14.648 K_T^4, & 0.17 < K_T < 0.75 \\ -0.54 K_T + 0.632, & 0.75 < K_T < 0.80 \\ 0.2, & K_T \geq 0.80 \end{cases} \quad (22)$$

Estes modelos foram escolhidos apenas por se tratar de modelos simples largamente utilizados e que foram validados no passado (embora para localizações nos EUA e Austrália) com bons resultados (Duffie et al., 2006). Um terceiro modelo, Boland-Ridley-Lauret é analisado, também para correlações médias horárias, uma vez que se mostrou produzir bons resultados para localizações em ambos os hemisférios:

$$\frac{I_{Df}}{I_G} = \frac{1}{1 + e^{-5.38+6.63k_T+0.006TSV-0.007el+1.75K_T+1.31\psi}} \quad (23)$$

$$\psi = \begin{cases} \frac{k_{T-1} + k_{T+1}}{2} & \text{nascer sol} < T < \text{pôr sol} \\ k_{T+1} & T = \text{nascer sol} \\ k_{T-1} & T = \text{pôr sol} \end{cases} \quad (24)$$

Neste modelo el é o ângulo da altitude solar – calculado com a equação 3 e o ângulo zenital (equivalente a 90° menos o ângulo da altitude solar) –, e o parâmetro ψ é uma medida de persistência do *clearness index* pretendendo considerar uma uniformização da variabilidade desse índice. Lisboa foi uma das localizações incluídas neste estudo na qual se verificou um bom desempenho deste modelo em comparação com outros (Ridley et al., 2010) o que de certa forma determinou a selecção deste método como um dos utilizados neste trabalho.

4.2.2 Comparação entre os modelos e observações

No seguimento da modelação difusa-directa foram aplicados os instrumentos estatísticos descritos anteriormente para avaliar a performance desses mesmos modelos.

Nas figuras 11 e 12 apresentam-se os valores determinados para os índices estatísticos para , respectivamente, dados da Terceira e Graciosa. As figuras com índice a) possuem a informação do valor de BIAS, MAE e RMSE e as figuras com índice b) indicam os resultados para BIASP, MAPE e r para os três modelos calculados anualmente de modo a captar também essa variabilidade, caso ocorra. Para uma melhor visualização os resultados são separados por componente directa e difusa (o par na horizontal da figura) e por classe, ou seja, se os pontos comparados dizem respeito a valores médios diários ou mensais (o par na vertical da figura).

A componente directa tende a ser subestimada (BIAS negativo) por todos os modelos, tanto na Graciosa como na Terceira. Tal como se intuía a magnitude dos erros calculados diminui quando os mesmos são determinados em função dos valores médios mensais.

A correlação linear entre os dados observados e os dados calculados pelos modelos que correlacionam radiação global com difusa-directa é bastante fraca. É claramente evidente que o modelo Collares-Pereira é, dos modelos analisados, o mais adequado para a modelação da radiação difusa e directa porque se verifica em conjunto uma ligeira diminuição de MAPE e ligeiro aumento de coeficiente de correlação comparando com os outros modelos. Existe apenas uma excepção no MAPE do modelo Erbs da média diária da componenete directa na série 2009-2010 da ilha Graciosa que não se considera invalidar a escolha efectuada com o modelo Collares-Pereira.

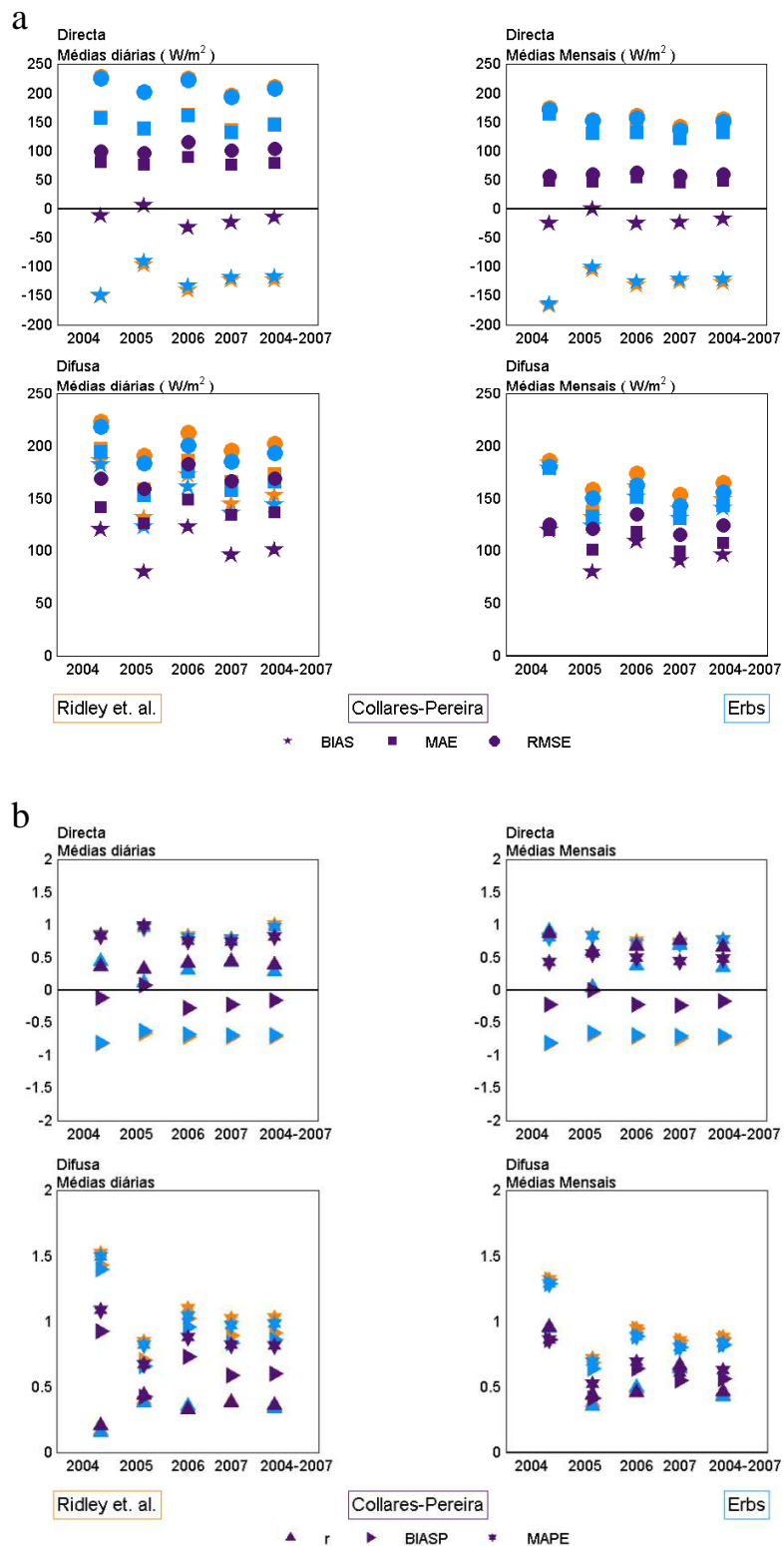


Figura 11 – Análise estatística entre as médias diárias e mensais dos dados calculados de componente difusa e directa pelos três modelos (partindo da radiação global prevista pelo WRF) com os valores observados para a ilha Terceira: a) BIAS, MAE e RMSE; b) r, BIASP e MAPE. As diferentes cores representam os diferentes modelos.

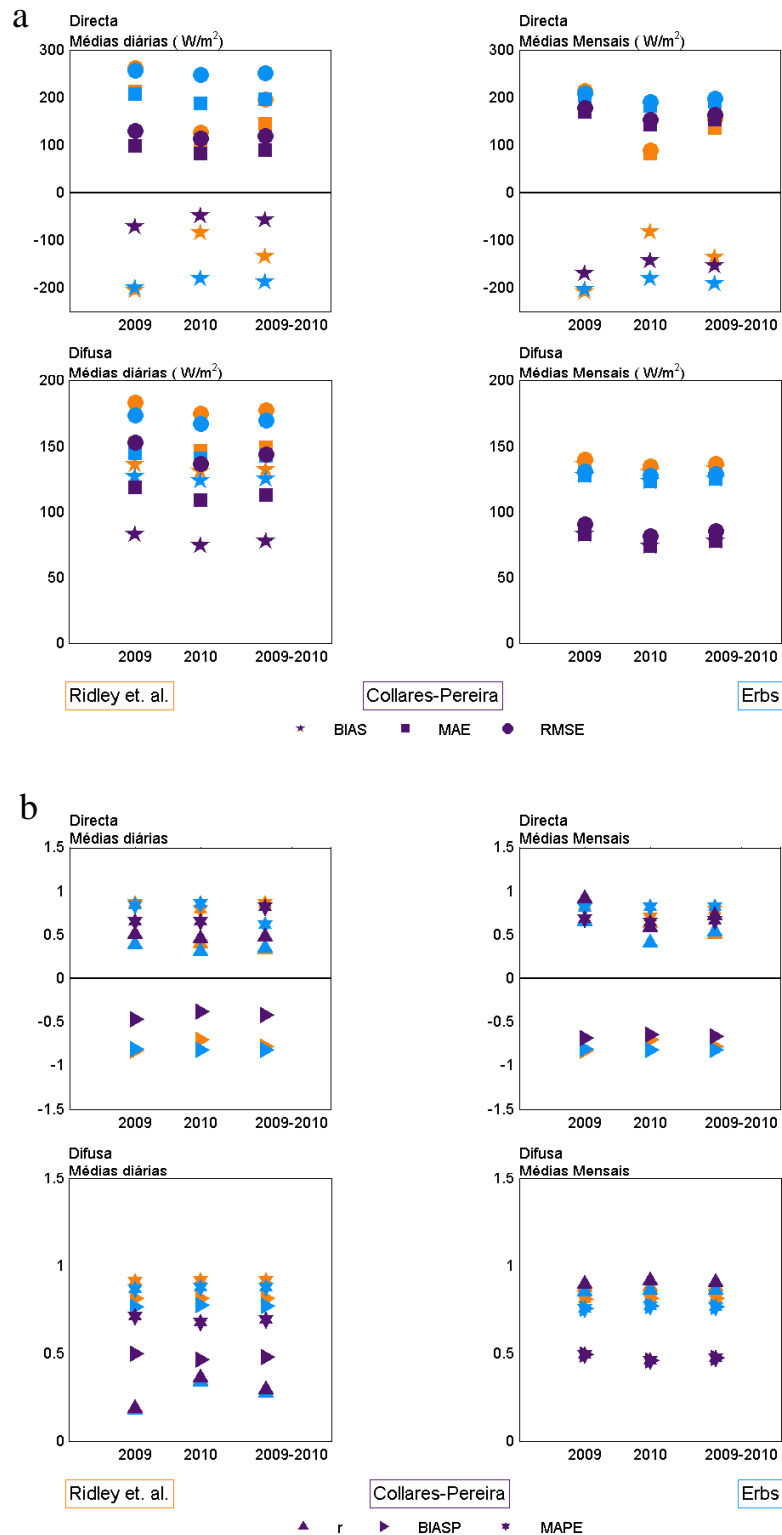
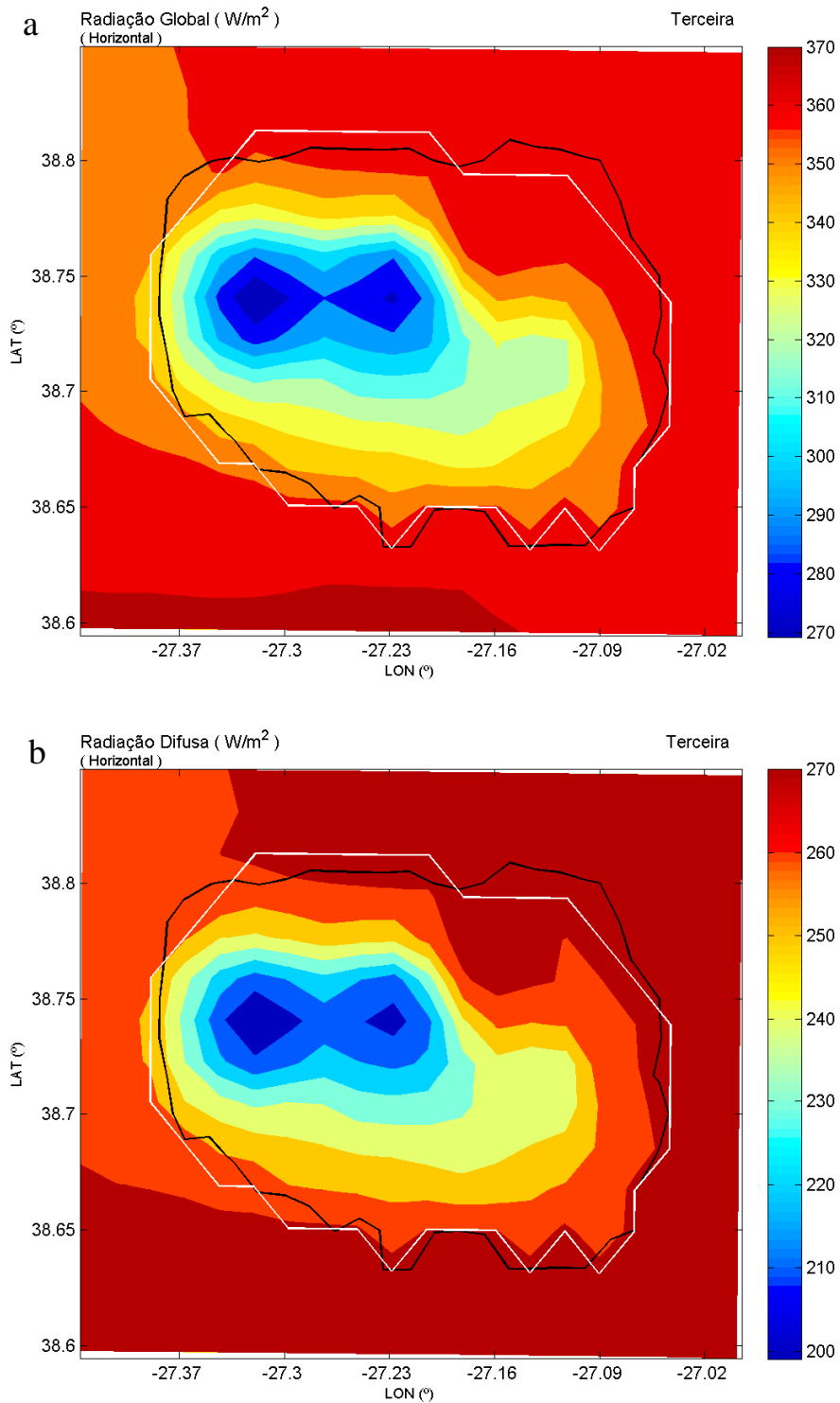


Figura 12 – Análise estatística entre as médias diárias e mensais dos dados calculados de componente difusa e directa pelos três modelos (partindo da radiação global prevista pelo WRF) com os valores observados para a ilha Graciosa: a) BIAS, MAE e RMSE; b) r, BIASP e MAPE. As diferentes cores representam os diferentes modelos.

4.3 Mapas solares

Como o desempenho do modelo Collares-Pereira se mostrou ser o mais indicado foi então usando a sua formulação que se determinaram médias anuais (de toda a série temporal) de radiação difusa, directa para todo o domínio das simulações WRF e que constituem portanto uma primeira aproximação ao mapa solar para a ilha Terceira (figura 13) e Graciosa (figura 14).



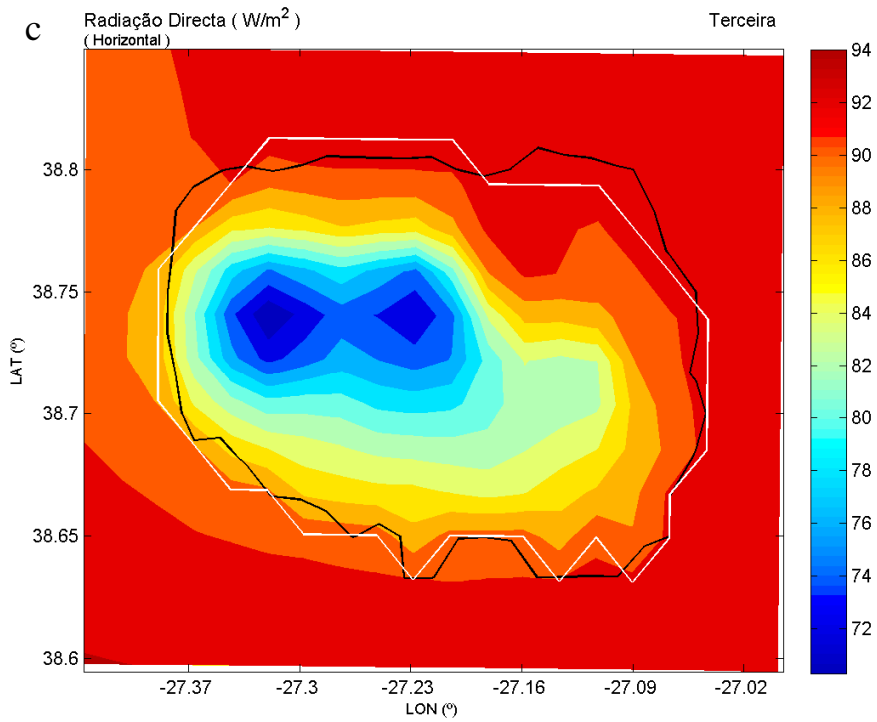
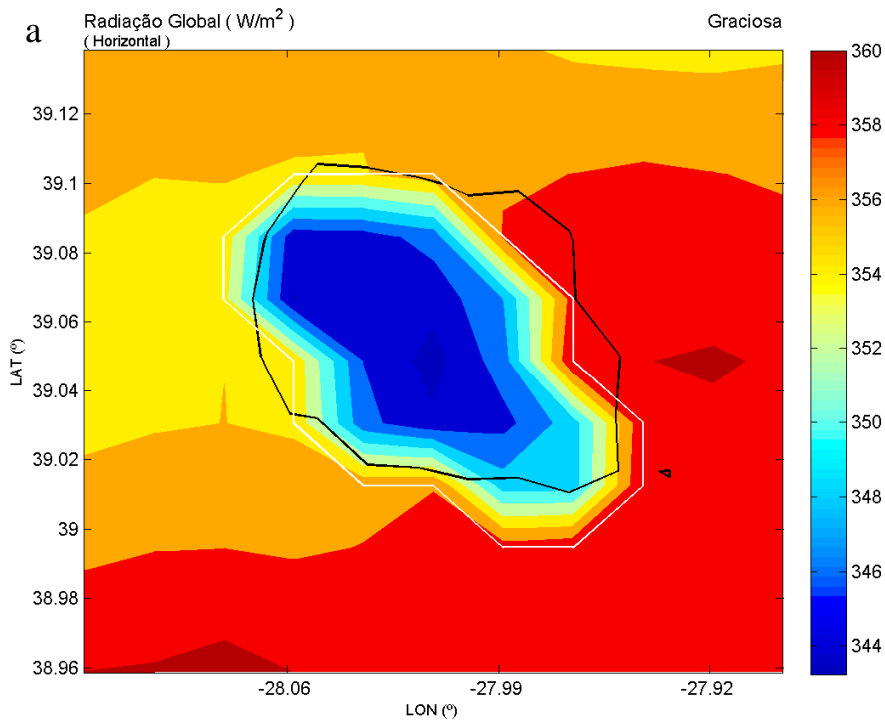


Figura 13 – Mapa de radiação solar na ilha Terceira. Médias anuais de: a) radiação global; b) radiação difusa; c) radiação directa. Componentes determinadas a partir da correlação Collares-Pereira e dos valores anuais médios de radiação global simulados pelo WRF. Limites da ilha: a branco - definidos pelo WRF; a preto – segundo o modelo ETOPO1. **Nota:** Chama-se a atenção para a escala da *colorbar* com escala não idêntica nos figuras a, b e c.



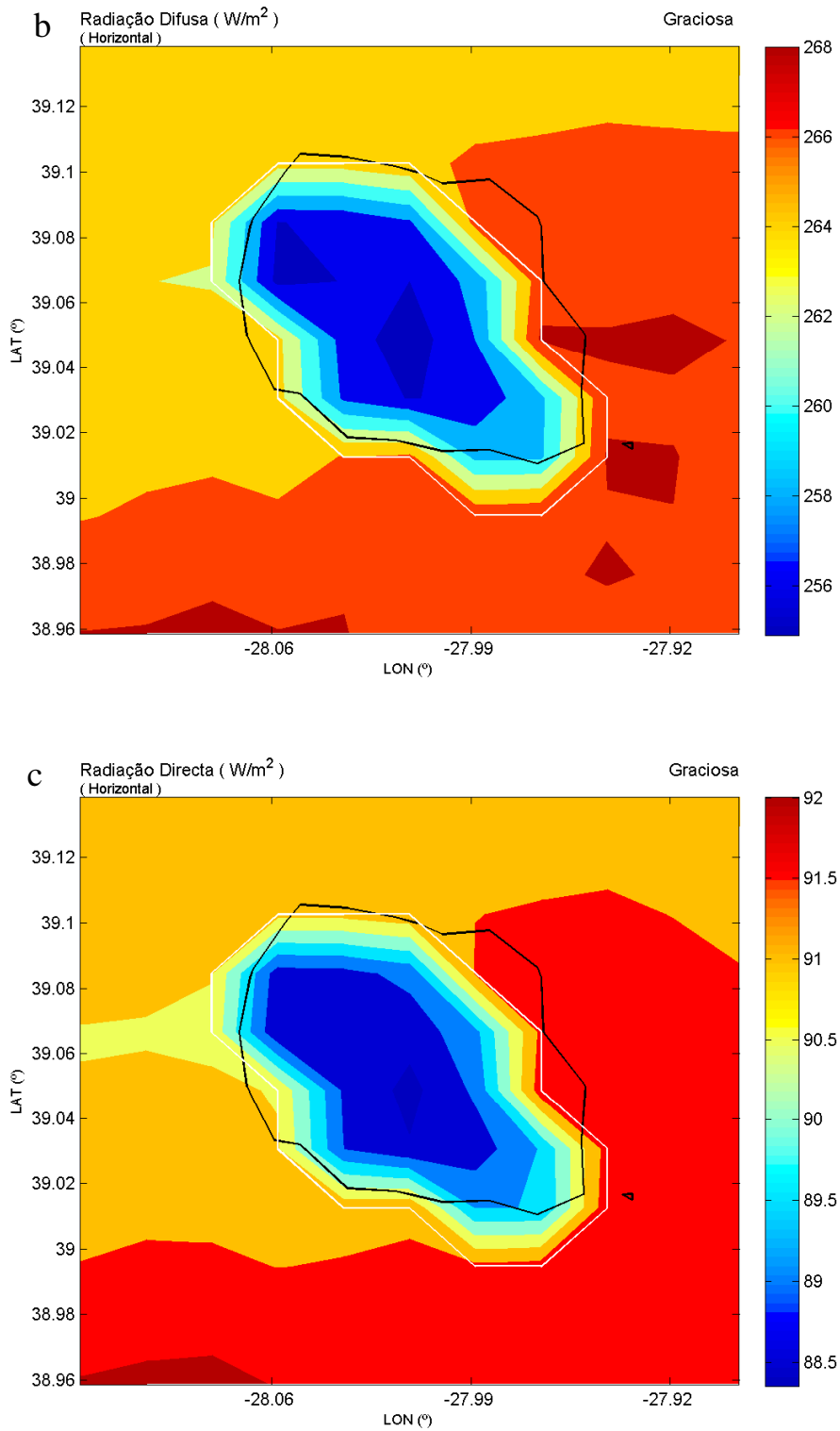


Figura 14 – Mapa de radiação solar na ilha Graciosa. Médias anuais de: a) radiação global; b) radiação difusa; c) radiação directa. Componentes determinadas a partir da correlação Collares-Pereira e dos valores anuais médios de radiação global simulados pelo WRF. Limites da ilha: a branco - definidos pelo WRF; a preto – segundo o modelo ETOPO1. **Nota:** Atenção às escalas da *colorbar* não idênticas nos figuras a, b e c.

Ao observar os mapas de radiação solar verifica-se que a topografia das ilhas parece influenciar marcadamente a determinação pelo WRF de radiação global (SWDOWN). Se se considerar que as previsões de nebulosidade pelo modelo neste local são preponderantemente afectadas pelos efeitos orográficos poderemos indicar esta razão como uma hipótese justificativa para o padrão de radiação solar simulado. À partida não se esperava que este efeito pudesse ser tão marcante. Um estudo local que levasse à aquisição de dados de radiação solar em pontos estratégicos nos locais com maior altitude poderia aferir se existe realmente alguma autenticidade nesta hipótese.

4.3.1 Potencial Fotovoltaico

O potencial fotovoltaico depende directamente do nível de insolação numa dada região. Para determinar qual a sua produção média há que se contabilizar não só a radiação solar que o painel recebe como também a sua eficiência técnica e bem como a eficiência das componentes que lhe são associadas (inversores, cabos, reguladores de carga). Numa aproximação simplista, considerando apenas o módulo fotovoltaico determina-se a sua energia produzida através da área de módulo (ou módulos a considerar) (S), a radiação global média horária (G_h), intervalo de tempo com exposição solar (h) e rendimento do módulo (η) (equação 25).

$$E = S \times G_h \times h \times \eta \quad (25)$$

A título exemplificativo, se se considerar uma eficiência do módulo de 12% em irradiância de 350 W/m^2 (valor este da ordem de grandeza dos valores de radiação solar determinada neste trabalho para as ilhas Terceira e Graciosa) obter-se-á como *output* energético 42 Wh/m^2 . Considerando ainda um *output* igual e constante ao calculado durante um período de 7 horas por dia ter-se-á anualmente uma conversão de cerca de 107 kWh/m^2 .

Ilhas como os Açores, remotas, são particularmente interessantes numa análise com vista ao levantamento detalhado dos seus recursos pois a implementação de um sistema sustentável promoverá a autonomia energética.

5. Nebulosidade: WRF e SAFNWC

A radiação solar que atinge a superfície terrestre está também directamente relacionada com a fracção nebulosa que está presente num local.

Como já se referiu na secção anterior o modelo WRF estima valores de radiação global num padrão que se julga estar relacionado com a possibilidade de formação de nuvens orográficas.

Para avaliar o desempenho do WRF na previsão de presença ou ausência nebulosa nos domínios estudados são comparados os seus resultados com variáveis similares processadas por um outro *software* que se aplica à análise de dados observados por satélite. Estas variáveis serão então consideradas como sendo as observações locais.

5.1 SAFNWC

O software SAFNWC (*Satellite Application Facility to Nowcasting & Very Short Range Forecasting*) gera produtos que suportem com dados meteorológicos de tempo quase real as previsões “de momento” (*nowcasting*) e as previsões de muito curto prazo (*short range forecasting*). A aplicação SAFNWC/MSG baseia-se em dados MSG SEVIRI. O radiómetro SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) a bordo dos satélites geoestacionários MSG (*Meteosat Second*

Generation) localizados a 0° longitude registam dados de radiância reflectida e emitida em 11 canais espectrais com uma resolução espacial no nadir de 3 km e um canal de alta resolução no visível (HRV – 0.4-1.1 μm) com resolução 1 km. As imagens para todo o disco da Terra (Europa, Atlântico, África) são produzidas a cada 15 minutos.

As imagens SEVIRI são constituídas por 8 segmentos (que juntos constituem todo o disco) excepcionando apenas o canal HRV que possui 24 segmentos. Por si cada segmento engloba 464 linhas de imagem. Estes segmentos são sempre acompanhados por um ficheiro com parâmetros da escala usada, o prólogo, e um ficheiro que contém informação sobre a qualidade dos dados, o epílogo. No anexo I do SAFNWC/MSG *User Manual* (EUMETSAT, 2011) estão descritos quais os canais necessários dos dados SEVIRI para a geração de cada um dos produtos da SAFNWC. As imagens são transmitidas como *High* ou *Low Rate Information Transmission* (HRIT/LRIT) (EUMETSAT, 2006). Em LRIT apenas 5 canais espectrais são considerados enquanto que em HRIT todos os 12 canais estão presentes. Tanto os LRIT como os HRIT compreendem dados já georreferenciados e com pré-processamento dos valores radiométricos (dados *Level 1.5*) (EUMETSAT, 2010b).

As imagens MSG são o *input* necessário para a execução da SAFNWC mas também é requerida a disponibilização de valores previstos por um modelo numérico (NWP- *Numerical Weather Predictions*) que são dados auxiliares usados para correções atmosféricas. No anexo H do SAFNWC/MSG *Software User Manual* (EUMETSAT, 2010a) encontra-se a descrição das características requeridas nestes ficheiros NWP e uma listagem das variáveis que deve conter necessárias para a geração dos diferentes produtos da SAFNWC/MSG (em diante, mencionada apenas com o acrónimo SAFNWC).

A SAFNWC pode ser executada com dados SEVIRI referentes apenas ao segmento respectivo ao local a analisar. Nesse segmento define-se a região de interesse através das coordenadas latitude-longitude do centro desse mesmo local, respectivas coordenadas em índice de linha e coluna da imagem SEVIRI completa e dimensões da região também nos mesmos índices. Para melhor descrição destas e outras configurações recomenda-se a consulta à secção *SAFNWC Configuration Files* no *Software User Manual* (EUMETSAT, 2010a).

Existem dois modos de execução do *software*: *Real-Time* e *Off-Line*. O modo *Real-Time* para *nowcasting* e *forecasting* de curto prazo e *Off-Line* para geração de produtos da SAFNWC a partir de dados históricos. Neste trabalho a SAFNWC é executada em modo *Off-Line*. (Descrição detalhada a toda a execução do software em *Software User Manual or the SAFNWC Application* (EUMETSAT, 2010a)).

Produtos SAFNWC

A SAFNWC gera 13 diferentes produtos (PGE's) derivados das imagens SEVIRI. O Anexo D contém a listagem de todos os PGE's.

Dependendo do produto que se pretende poderá haver dependência de geração de um outro produto que será prioritário e necessário para o processamento do que se lhe associa (Figura D1 no Anexo D).

Neste trabalho foram gerados os produtos *Cloud Mask* (CMA) e *Cloud Type* (CT) e, por esse motivo, descrevem-se aqui brevemente apenas estes PGE's.

O PGE CMA providencia informação sobre a possível ocorrência de nuvem em cada pixel da região processada na SAFNWC. Este resultado é bastante importante e necessário também para outros produtos pois requerem apenas os pixels livres de nebulosidade (*clear*) no seu processamento.

O algoritmo CMA consiste numa série de testes aplicados a todos os pixels da região com várias combinações de análise de canais espectrais, análise da variação temporal (para detectar o movimento rápido de nuvens) e sua coerência. Os testes aplicados, tanto para pixels de terra como de água, dependem da iluminação solar, dos ângulos de observação (amanhecer, dia, noite, crepúsculo são definidos num intervalo de elevação solar) e sendo feita uma comparação entre as imagens com

limites estabelecidos para as suas características (por exemplo quantidade total de vapor de água contido na atmosfera) determinados pelos parâmetros dos dados NWP e tendo em conta a geometria Terra-Sol-satélite.

O *output* do CMA inclui também, quando existente, informação da presença de aerossóis (nuvens de poeiras ou aerossóis vulcânicos) e de neve ou gelo. A tabela D2 no Anexo D lista as seis categorias possíveis do *output* CMA.

O objectivo do PGE CT é produzir uma análise detalhada do tipo de nuvem presente em cada pixel com atribuição de nebulosidade (*cloudy*) do PGE que lhe antecede CMA distinguindo-os em classes: nuvens fraccionadas, semi-transparentes, altas, médias ou baixas. O *output* do PGE CT está listado na tabela D3 no Anexo D.

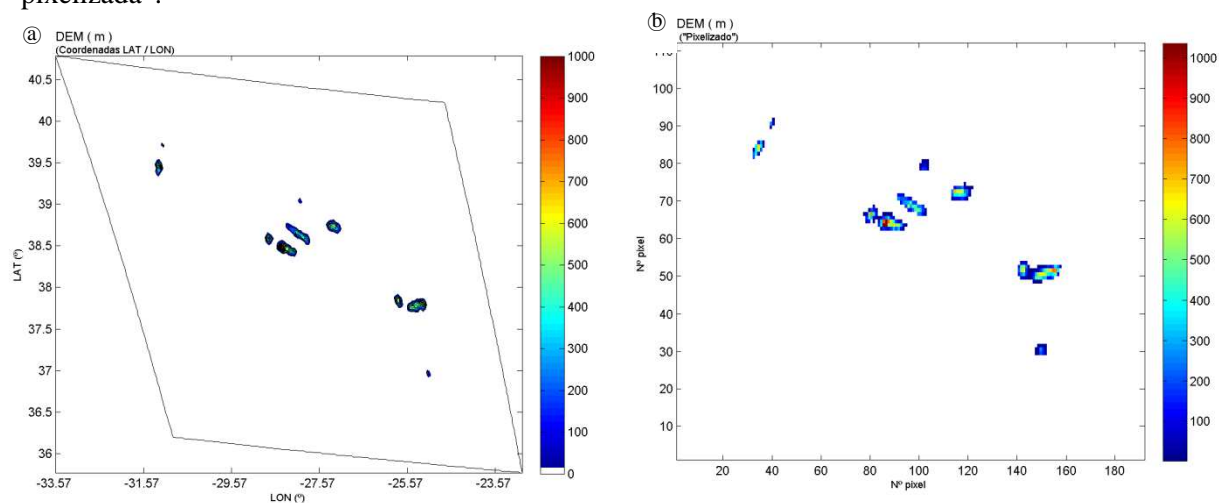
O algoritmo de CT é semelhante ao de CMA em termos de parâmetros considerados e encadeamento de testes aplicados.

Para informação adicional sobre o *output* dos PGE's CMA e CT, preparação para a execução, *inputs* necessários e validação dos mesmos bem como algoritmos recomenda-se a consulta aos documentos respectivos *SAFNWC Output Products Format Definition* (EUMETSAT, 2005); *Product User Manual for "Cloud Products"* (EUMETSAT, 2011a) e *Algorithm Theoretical Basis Document for "Cloud Products"* (MF/CMS, 2011b).

Como tanto o CMA como o CT possuem apenas informação qualitativa (sem indicação da percentagem nebulosa que cobre cada um dos pixéis) da região estudada sobre a nebulosidade e dado que o *output* do WRF não possui tal classificação de forma directa estabeleceu-se então que a avaliação do desempenho do WRF na previsão de nebulosidade é efectuada considerando somente o *output* do CMA. Uma vez que CT não foi tida em conta na análise (embora tenha sido gerada na execução SAFNWC) exemplifica-se na figura D2 (Anexo D) a visualização típica do seu *output*.

5.1.1 Configuração SAFNWC

A topografia (DEM - *Digital Elevation Model*) na SAFNWC que tem origem no modelo GTOPO30 (USGS, 2011), com resolução horizontal de cerca de 1 km, é determinada através de uma média dos pontos contidos em cada pixel. As imagens abaixo mostram a região estudada em coordenadas latitude-longitude e, para dar alguma sensibilidade sobre o numero de pixéis associados às ilhas Terceira e Graciosa, apresentam-se também as correspondentes imagens em forma "pixelizada".



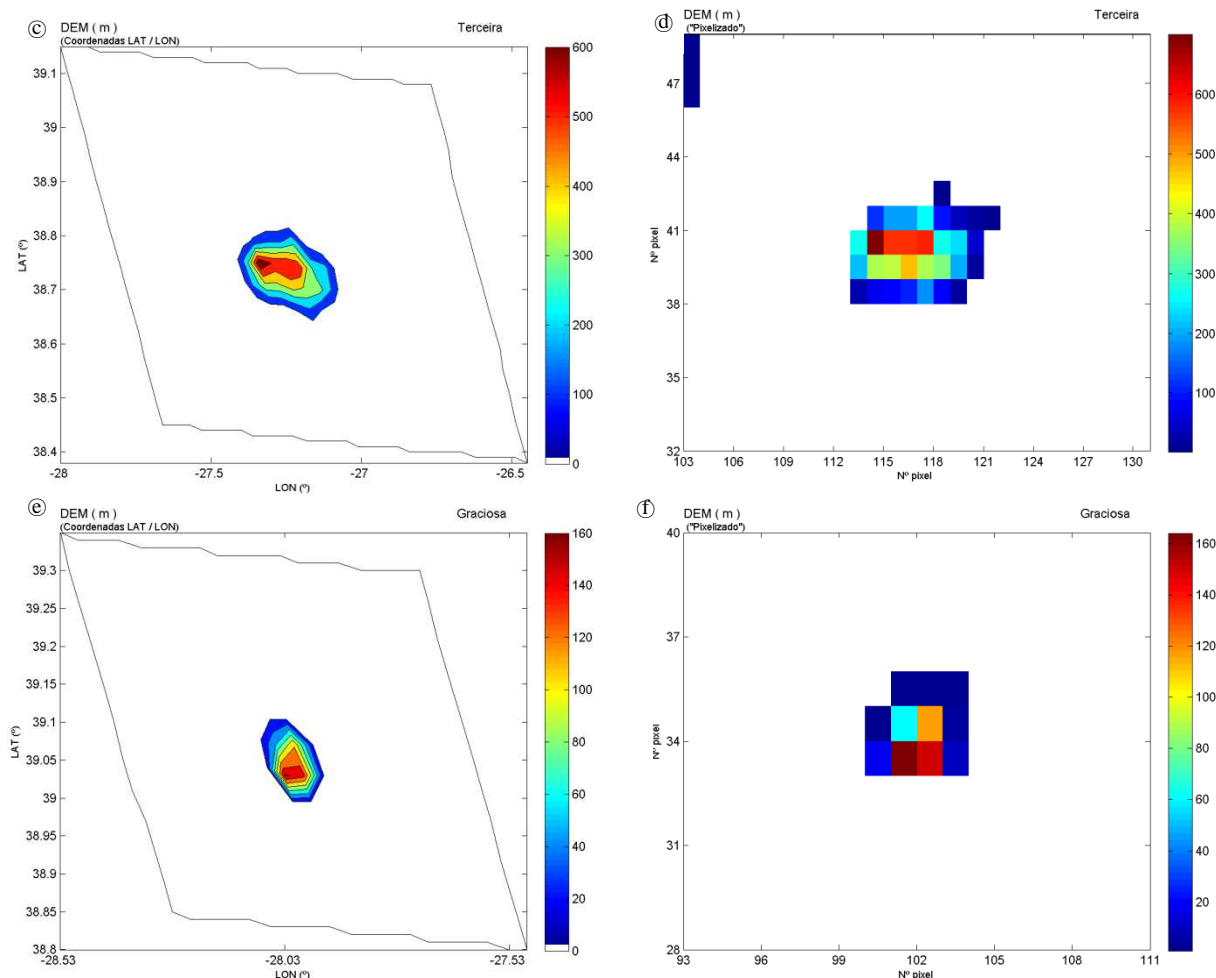


Figura 15 – Mapas topografia (DEM) em coordenadas latitude-longitude (a, c, e) e em forma “pixelizada” (b, d, f) para a toda região analisada na SAFNWC (a, b) e corte correspondente às ilhas Terceira (c, d) e Graciosa (e, f).

A resolução das imagens MSG para o arquipélago dos Açores de acordo com a sua localização geográfica é, na direcção Este-Oeste, 4 km por 5 km, na direcção Norte-Sul (Cihlar et al., 1999). A região analisada na imagem SEVIRI tem centro em latitude 38.14° e longitude 27.77° (linha-coluna: 623-1116 (*0-based*)) e dimensões linhas-colunas 112-192 (i.e. 112x192 pixels).

Os NWP usados são previsões ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*) com uma resolução temporal de 3 horas. A série temporal estudada correspondeu ao período 10/10/2010 a 31/12/2010 (correspondendo a uma amostra de 1986 horas) limitado pela disponibilização de dados NWP.

5.2 Comparação entre WRF e SAFNWC

Embora o passo de tempo do *output* SAFNWC seja 15 minutos foram apenas correlacionados os resultados de hora em hora pois é nesse intervalo que as variáveis WRF são arquivadas.

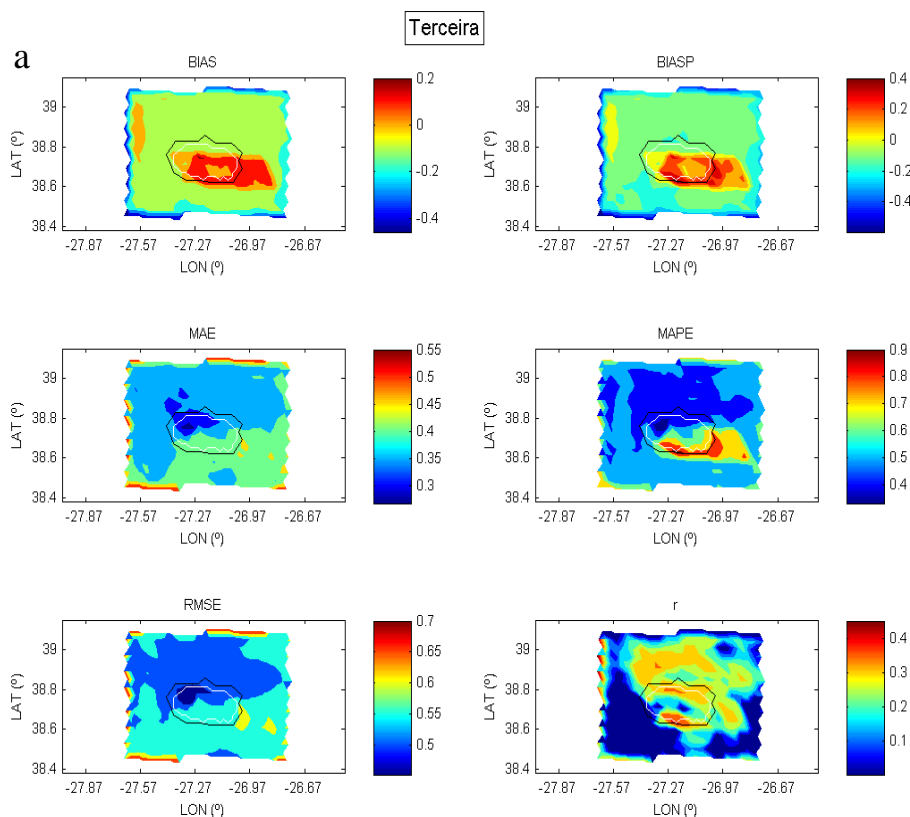
Uma análise preliminar de CMA para a região estudada em todo o seu domínio temporal identificou que existe apenas ocorrências de três das classes possíveis: *cloud-free* (pixel sem nuvem); *cloud contaminated* (pixel parcialmente com nuvem) e *cloud filled* (pixel totalmente com nuvem).

Como o WRF não possui variáveis de nebulosidade definidas em classes recorreu-se ao valor de fracção de nebulosidade (CLFRA – *Cloud Fraction*) determinando o seu valor máximo nos níveis verticais (49): valores entre 0 e 1 para respectivamente 0% e 100% de presença de nuvem.

No entanto, de CMA, a percentagem de pixel coberto com nuvem não é conhecido o que dificulta o tratamento dos dados com classe *cloud contaminated*. Como consequência desta limitação a análise da correlação entre CLFRA e CMA é feita seguindo os critérios:

- *Cloud-free* ↔ 0 % presença de nuvem
- *Cloud filled* ↔ 100 % presença de nuvem
- *Cloud contaminated* ↔ estabelece-se duas hipóteses:
 - 50 % presença de nuvem (H1)
 - 100 % presença de nuvem (H2)

As imagens seguintes demonstram em mapa os resultados da análise. Como a resolução horizontal da SAFNWC é superior à do WRF foram determinados previamente quais os pontos da malha WRF contidos em cada pixel da malha SAFNWC. A estes últimos atribuiu-se-lhes a média de CLFRA dos pontos WRF que lhe correspondem. Este processo usou a relação entre pares latitude-longitude do WRF e SAFNWC. Estes pontos, em ambos, dizem respeito ao centro de cada uma das células das respectivas malhas (pixel no caso de SAFNWC). Quando o centro de uma célula (um ponto latitude-longitude) WRF se encontra perto da fronteira de um pixel a sua área total deve ser partilhada com o pixel adjacente. Não foram tidas em conta estas situações e por isso poderá existir alguma incongruência neste método: uma célula WRF poderá ter a maior parte da sua área num pixel mas o valor correspondente de CLFRA apenas será considerado na média de valores do pixel que contiver o seu centro. Não obstante esta aproximação grosseira assume-se que a mesma não introduzirá erros significativos nos resultados finais.



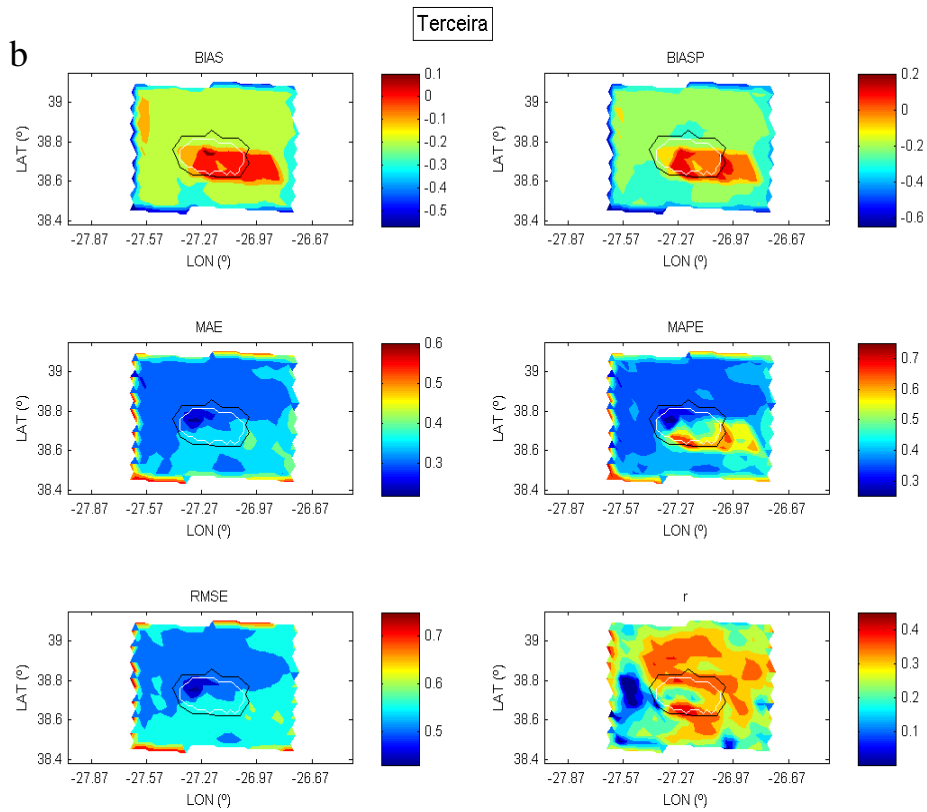
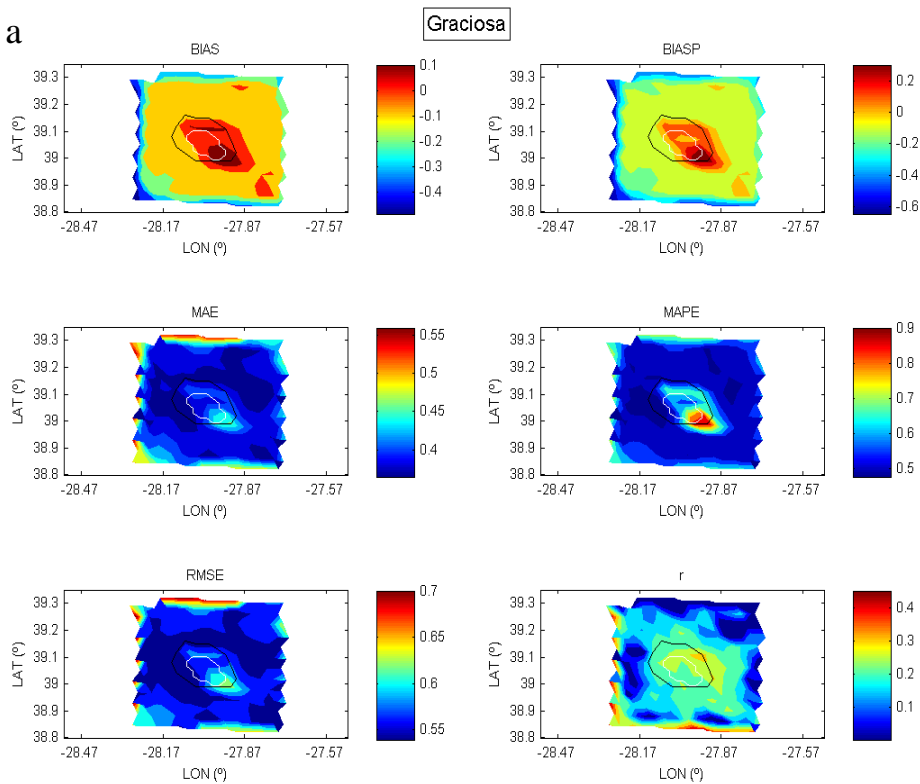


Figura 16 – Mapas de BIAS, BIASP, MAE, MAPE, RMSE e r para a previsão de nebulosidade da ilha Terceira considerando os critérios H1 (a) e H2 (b). A preto representa o limite da ilha de acordo com os valores de DEM da SAFNWC. A branco o limite segundo a LM do WRF. *Nota:* Atenção às escalas da *colorbar* não idênticas em todos os sub-figuras.



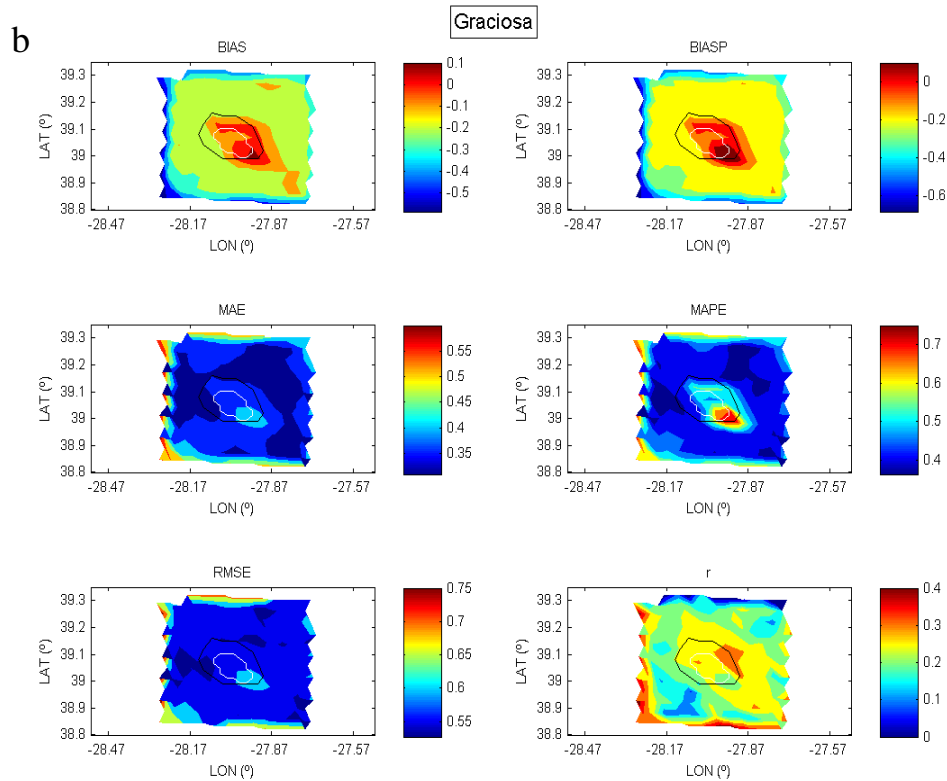


Figura 17 – Mapas de BIAS, BIASP, MAE, MAPE, RMSE e r para a previsão de nebulosidade da ilha Graciosa considerando os critérios H_1 (a) e H_2 (b). A preto representa o limite da ilha de acordo com os valores de DEM da SAFNWC. A branco o limite segundo a LM do WRF. **Nota:** Atenção às escalas da *colorbar* não idênticas em todos os sub-figuras.

A correlação linear entre SAFNWC e WRF é bastante baixa, no entanto verifica-se um ligeiro melhoramento quando se processa uma análise considerando o critério H_2 onde todos os valores-píxeis de CMa são definidos como tendo 100% nebulosidade para as classes *cloud filled* e *cloud contaminated*. Os valores de BIAS e MAPE diminuem, também ligeiramente, com o critério H_2 . A variabilidade dos valores comparados (0, 0.5 e/ou 1 dos resultados de CMa) não favorece esta análise. Existe no entanto uma outra importante característica que se destaca ao examinar as figuras para ambas as ilhas com ambos os critérios. Os erros BIAS, BIASP e MAPE são mais elevados no local onde se encontra a ilha. Os valores máximos de BIAS nestas regiões indicam sobrestimação de ocorrência de nebulosidade que se presume estar associado à orografia das ilhas.

Dado a característica de CMa considera-se uma outra aproximação à análise dos resultados, comum em situações definidas com dados bivariados.

Para testar a habilidade do WRF em detecção de apenas presença ou ausência de nuvens construí-se uma tabela de contingência que compara os seus resultados com os valores de CMa. Nesta abordagem segue-se, obviamente, o critério H_2 e estabelece-se que:

- Probabilidade de pontos WRF com resultado correcto – detecção de *clear* ou *cloudy*

$$Correctos = \frac{n_a + n_d}{n_a + n_b + n_c + n_d} \quad (26)$$

- Probabilidade de falhas pelo WRF na previsão de nuvens – subestimação de nuvens

$$Falhas_{cloudy} = \frac{n_b}{n_a + n_b} \quad (27)$$

- Probabilidade de falhas pelo WRF na previsão de céu limpo – sobrestimação de nuvens

$$Falhas_{clear} = \frac{n_c}{n_c + n_d} \quad (28)$$

Tabela 5 - Legenda das variáveis usadas nos cálculos probabilísticos entre observação (SAFNWC) e previsão (WRF) de pontos com ou sem nebulosidade (Terceira (♣) com 357*1986 pontos e Graciosa (♦) com 167*1986 pontos).

	Previstos <i>Cloudy</i>		Previstos <i>Clear</i>	
Observados <i>Cloudy</i>	n _a		n _b	
	♣ 470972	♦ 209357	♣ 118244	♦ 63702
Observados <i>Clear</i>	n _c		n _d	
	♣ 90341	♦ 43214	♣ 29445	♦ 15389

A tabela 6 indica os resultados da performance do WRF. Em $Falhas_{cloudy}$ pretende-se determinar qual a percentagem de subestimação de nuvens pelo WRF considerando como possíveis os casos em que ou falha ou acerta na previsão de nebulosidade (dado se observar nebulosidade). Em $Falhas_{clear}$ por outro lado pretende-se apurar qual a percentagem de sobrestimação de nuvens considerando as possibilidades de falhar ou de acertar a previsão de céu limpo (dado se observar céu limpo). Note-se que a amostra considerada para $Falhas_{cloudy}$ engloba apenas os pares de pontos onde se observa (SAFNWC) presença de nebulosidade tal como para $Falhas_{clear}$ se considera uma amostra de apenas pares de pontos onde se observa (SAFNWC) céu limpo. Estes resultados são portanto não complementares.

De um modo geral a performance do WRF é satisfatória tanto para a ilha Terceira como Graciosa com valores correctos em cerca de 70% da amostra total. Em observações de *clear* o WRF prevê presença de nuvens em cerca de 75% e em observações de *cloudy* falha a previsão em cerca de 20%. Há uma tendência para sobrestimar a presença de nebulosidade. Infelizmente não é possível analisar quantitativamente a fracção de nebulosidade com o produto satélite disponível.

Tabela 6 – Performance do WRF na previsão de ocorrência de nebulosidade ou céu limpo.

	<i>Correctos (%)</i>	<i>Falhas_{cloudy} (%)</i>	<i>Falhas_{clear} (%)</i>
<i>Terceira</i>	70.6	20.1	75.4
<i>Graciosa</i>	67.8	23.3	73.7

6. Conclusões e trabalho futuro

Os padrões anuais de radiação solar nas ilhas analisadas são tal como se intui marcados pela sazonalidade entre Verão e Inverno, no entanto a radiação directa possui uma dispersão ao longo do ano associada também aos padrões de nebulosidade intermitentes que tanto caracterizam a região.

A performance do WRF para previsão de radiação global mostrou uma tendência para sobrestimar os seus valores. Verifica-se uma tendência em melhores resultados quando se pretendem médias mensais dos valores de radiação: em radiação global a correlação entre previsão e observação é cerca de 0.9 e os erros MAPE variam em 28% na ilha Terceira e 13% na ilha Graciosa. Refere-se que os dados da ilha Graciosa são bastante coerentes entre as componentes difusa e directa da radiação global e que o mesmo não se pode afirmar para os dados da ilha Terceira. Os erros mais elevados na análise para a Terceira crêem-se ser consequência da inclusão de dados em análise com baixa qualidade.

A qualidade na aquisição dos dados medidos *in situ* é relevante. Na ilha Graciosa os desvios do modelo em relação aos valores observados são menores que na ilha Terceira mas, além das diferenças nas características orográficas, localização, etc., poderá estar acoplado aos erros questões de qualidade da amostra usada na análise da performance do modelo. As observações da ilha Terceira contêm significativas falhas de registos em todas as componentes radiativas sendo particularmente marcantes em radiação directa. As séries temporais de observações por serem relativamente curtas poderão penalizar os resultados inferidos, um padrão atípico de radiação observada deixará de ser evidente quando se analisa um curto período de tempo.

No WRF a orografia das ilhas é marcante na previsão de radiação solar. Apura-se o mesmo efeito na previsão de presença de nebulosidade. Na análise comparativa entre nebulosidade prevista e nebulosidade observada em imagens de satélite (SAFNWC) reafirma-se a performance do WRF com cerca de 70% de concordância entre previsto e observado. Existe sobrestimação de ocorrência de nuvens no WRF pois este mostrou falhas em mais de 70% dos pontos onde é observado céu limpo.

Foram aplicados três modelos diferentes para a modelação da componente difusa onde em dois dos quais foi possível determinar a relação difusa-directa em valores médios horários e no terceiro em valores médios diários. O modelo com melhor desempenho, a relação estabelecida por Collares-Pereira e Rabl, foi então o utilizado na construção dos mapas de radiação difusa e directa para ambas as ilhas.

A modelação da componente difusa deverá inevitavelmente ser objecto de estudo e análise intensiva. Outros modelos devem ser testados e idealmente constituir um novo modelo desenvolvido de forma adequada que considere as condições climáticas características da região.

Existe presentemente, na mesma base de dados onde se obtiveram os valores de radiação para a ilha Graciosa, dados relativos à presença de nebulosidade *in situ*. O limite temporal estabelecido para este trabalho não permitiu a sua análise pois a totalidade dos ficheiros relativos a estes mesmos dados foram disponibilizados tardiamente após solucionada uma anomalia identificada pelo próprio gestor da base de dados. Assim sendo, estes e outros dados de radiação que se possam reunir deverão ser submetidos numa análise subsequente.

Uma vez que foram consideradas apenas as ilhas Terceira e Graciosa deverá também ser introduzido num estudo similar as restantes ilhas do arquipélago dos Açores. Uma campanha no local, com disposição de radiómetros em locais estrategicamente seleccionados poderia inferir sobre qual o efeito da orografia das ilhas no padrão de radiação solar previsto pelo modelo WRF. Outras

configurações do modelo WRF poderão também ser avaliadas como por exemplo considerar diferentes esquemas físicos na parametrização das trocas radiativas de curto comprimento de onda.

Seria ainda conveniente conduzir-se um estudo aplicado a um sistema energético solar, fotovoltaico ou térmico, em operação no local, correlacionando a sua eficiência/produção energética com os valores de radiação obtidos pelo método aqui discutido.

7. Referências

Amante, C. and B. W. Eakins, *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, 2009.

Aries M., Newsham G., *Effect of daylight saving time on lighting energy use: A literature review*, Energy Policy, 2008, 36(6), 1858-1866.

Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Climate Research Facility [WWW], disponíveis em: <http://www.arm.gov/sites/amf/grw> [Acedido em: 05/10/2011]

Belcher B., DeGaetano A., *A revised empirical model to estimate solar radiation using automated surface weather observations*, Solar Energy, 81, 2007, 329-345.

Boland J., Ridley B., Brown B., *Models of diffuse solar radiation*, Renewable Energy, 33(4), 2008, 575-584.

Carvalho, F., Henriques D., *Workshop de Radiação Solar – Ponta Delgada 2010* [Powerpoint], Instituto de Meteorologia – Delegação dos Açores, Setembro 2010.

Chandrasekhar, S., *Radiative Transfer*, Courier Dover Publications, 1960, 1-40.

Chou M., Suarez M., *An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models*, NASA Technical Memo. 104606, 3, 1994, 85.

Cihlar J., Belward A., Govaerts Y., *Meteosat Second Generation opportunities for land surface research and applications*, EUMETSAT Scientific Publications, 1999, 62-65.

Collins, W. et al., *Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0)*, NCAR Technical Note, NCAR/TN-464+STR, 2004, 226.

Derrien M., Gléau H., Daloze J., Haeffelin M., *Validation of SAFNWC products with one year of SEVIRI data*, Proceeding of the 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, 2005b.

Derrien M., Gléau H., *MSG/SEVIRI cloud mask and type from SAFNWC*, International Journal of Remote Sensing, 26(21), 2005a, 4707-4732.

Dudhia, J., *Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model*, J. Atmos. Sci., 1989, 46, 3077-3107.

Dudhia, J., *WRF Physics Options*, [WRF User's Page], disponível em: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/200807/WRF_Physics_Dudhia.pdf [Acedido em: 05/10/2011]

Duffie J., Beckman W., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Third Edition, John Wiley & Sons, INC., 2006, 60-64, 75-83.

EUMETSAT-Satellite Application Facility to Nowcasting & very short range forecasting, *Product User Manual for "Cloud Products" (Cma-PGE01 v3.1, CT-PGE02 v2.1 & CTTH-PGE03 v2.2)*, SAF/NWC/CDOP/MFL/SCI/PUM/01, Issue 3, Rev. 1, 2011a.

EUMETSAT-Satellite Application Facility to Nowcasting & very short range forecasting, *SAFNWC Output Products Format Definition*, SAF/NWC/IOP/INM/SW/ICD/3, Issue 1, Rev. 2, 2005.

EUMETSAT-Satellite Application Facility to Nowcasting & very short range forecasting, *Software User Manual SAFNWC Application: Software Part Products Format Definition*, SAF/NWC/CDOP/INM/SW/SUM/2, Issue 4, Rev. 0, 2010a.

EUMETSAT-Satellite Application Facility to Nowcasting & very short range forecasting, *MSG Level 1.5 Image Data Format Description*, EU/MSG/ICD/105, Issue v6, 2010b

EUMETSAT-Satellite Application Facility to Nowcasting & very short range forecasting, *MSG Ground segment LRIT/HRIT mission specific implementation*, EUM/MSG/SPE/057, Issue 6, 2006.

Ferreira, A., *Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal Continental*, Dissertação não publicada (Estágio em Meteorologia e Oceanografia Física), Universidade de Aveiro, 2007.

Fröhlich C., Brusa R. W., *Solar radiation and its variation in time*, Solar Physics, 1981, 74, 209-215.

Fröhlich C., *Total Solar irradiation observations* [Versão electrónica], 2011. Acedido a 05 de Outubro de 2011 em: ftp://pmodwrc.ch/pub/Claus/ISSI_EnergyFlows/EnergyFlows_cf.pdf.

Gill, D., Pyle, M., *Nesting in WRF*, [WRF User's Page], disponível em: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201107/WRFNesting.ppt.pdf> [Acedido em: 05/10/2011]

Gueymard C., *Importance of atmospheric turbidity and associated uncertainties in solar radiation and luminous efficacy modelling*, Energy, 2005, 30(9), 1603-1621.

Gueymard C., *The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models*, Solar Energy, 2004, 76(4), 423-453.

Iacono M.J., Nehr Korn T., 2010. *Assessment of Radiation Options in the Advanced Research WRF weather forecast model*, 1st Atmospheric System Research Science Team Meeting, Bethesda, MD, 15-19 Mar

Jeffries W.Q., *Nighttime offset and capping experiment results of the isothermal pyranometer at the 2001 diffuse shortwave IOP*, 12th ARM Science Team Meeting Proceedings, St. Petersburg, Florida, Abril 8-12, 2002.

Jorba O., Rincón, A., Baldasano J., Monache L., *Assessment of short-term irradiance forecasting based on post-processing tools applied on WRF meteorological simulations*, ES1002: Workshop March 22nd-23rd, 2011.

Karttunen H., Kröger P., Oja H., Poutanen M., Donner K., *Fundamental Astronomy*, 5th Edition, Springer, 2007, 32-38.

Katsoulis B., *A comparison of several diffuse solar radiation models for Greece*, Theoretical and Applied Climatology, 44, 1991, 181-186.

Kopp G., Lawrence G., Rottman G., *The Total Irradiance Monitor (TIM): science results*, Solar Physics, 2005, 230, 129-139.

Lacis, A., Hansen J, *A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere*. *J. Atmos. Sci.*, 1974, 31, 118-133.

Lanini, F., Division of global radiation into direct radiation and diffuse radiation, Dissertação não publicada (MsC), Universidade de Berna, 2010, 14-27.

Lefèvre, M., Albuisson M., Wald L., *Description of the software Heliosat-II for the conversion of images acquired by Meteosat Satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level*, Groupe Télédétection & Modélisation – Centre d’Energétique – Armines / Ecole des Mines de Paris, 2002

Li H., Yongwang L., Wang X., Ma W., Zhao L., *Solar constant values for estimating solar radiation*, Energy, 2011, 36, 1785-1789.

Liou, K.N., *An Introduction to Atmospheric Radiation – Second Edition*, International Geophysics Series, Academic Press, 1980, 57-67; 27-34; 45-50.

Martins F. *Et al.*, Mapeamento dos recursos de energia solar no Brasil, Anais do I CBENS, Fortaleza, Brasil, 2007.

Martins F., Pereira E., Echer M., *Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2, 2004, p. 145 – 159.

Mass C., Ovens D., Westrick K., Colle B., Does increasing horizontal resolution produces more skilful forecasts?, American Meteorological Society, 2002, 407-430.

Maxwell, E. R. George, S. Wilcox, *A Climatological Solar Radiation Model*, Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society, Albuquerque NM, 1998

Météo-France/Centre de Météorologie Spatiale, *Algorithm Theoretical Basis Document for “Cloud Products” (Cma-PGE01 v3.1, CT-PGE02 v2.1 & CTTH-PGE03 v2.2)*, SAF/NWC/CDOP/MFL/SCI/ATBD/01, Issue 3, Rev. 1, 2011b

NWCSAF - EUMETSAT Network of Satellite Application Facilities [WWW], disponíveis em: http://www.nwcsaf.org/HTMLContributions/CT/Prod_CT/1200_2006_10_08_Cloud_Type_newlogo.gif [Acedido em: 05/10/2011].

Oliveira A., Escobedo J., Machado A., Soares J., *Correlation models of diffuse solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil*, Applied Energy, 71(1), 2002, 59-73.

Perez, R., *et al.*, *A New Operational Satellite-to-Irradiance Model*, Solar Energy, 73(5), 2002, 307-317.

Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center, PMOD/WRC Annual Report 2010, 2011, 5.

Remund, J.; Perez, R.; Lorenz, E., *Comparison of Solar Radiation Forecasts for the USA*, 23rd European Photovoltaic and Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 2008

Ridley B., Boland J., Lauret P., *Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors*, Renewable Energie 35(2), 2010, 478–483.

Rivington M., *et al.*, *Evaluating regional climate model estimates against site-specific observed data in the UK*, Climate Change, 88, 2008, 157-185.

Robinson N., *Solar Radiation*, Elsevier Pub. Co., 1966, 15-22; 29-34.

Scharmer K., Grief J., *The European Solar Radiation Atlas, Vol. 1: Fundamentals and Maps*, Les Presses de l'École des Mines, 2000, 43-48

Skamarock, W. Et al., *A description of the Advanced Research WRF Version 3*, NCAR, 2008, disponível em: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/supports/tutorial.html>.

Súri M., Huld T., Dunlop E., *PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe*, *International Journal of Sustainable Energy*, 24(2), 2005, 55-67.

U.S. Geological Survey (USGS), *Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30)* [WWW], disponível em: http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30 [Acedido em:05/10/2011].

Tomé, R., *AMIC – Assessing the Mid Century Climate Transition* [Projecto de investigação], Não publicado, 2011

Wang, W. et al., *ARW Version 3 Modeling System User's Guide – July 2010*, NCAR, disponível em: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/supports/tutorial.html>.

World Meteorologic Organization (WMO), *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, No. 8 – Seventh Edition, 2008, I.7-2 – I.7-38.

8. Anexos

Anexo A

Instrumentos meteorológicos para medidas de fluxos radiativos

<i>Instrument classification</i>	<i>Parameter to be measured</i>	<i>Main use</i>	<i>Viewing angle (sr)</i> <i>(see Figure 7.1)</i>
Absolute pyrheliometer	Direct solar radiation	Primary standard	5×10^{-3} (approx. 2.5° half angle)
Pyrheliometer	Direct solar radiation	(a) Secondary standard for calibrations (b) Network	5×10^{-3} to 2.5×10^{-2}
Spectral pyrheliometer	Direct solar radiation in broad spectral bands (e.g., with OG 530, RG 630, etc. filters)	Network	5×10^{-3} to 2.5×10^{-2}
Sunphotometer	Direct solar radiation in narrow spectral bands (e.g., at 500 ± 2.5 nm, 368 ± 2.5 nm)	(a) Standard (b) Network	1×10^{-3} to 1×10^{-2} (approx. 2.3° full angle)
Pyranometer	(a) Global (solar) radiation (b) Diffuse sky (solar) radiation (c) Reflected solar radiation	(a) Working standard (b) Network	2π
Spectral pyranometer	Global (solar) radiation in broadband spectral ranges (e.g., with OG 530, RG 630, etc. filters)	Network	2π
Net pyranometer	Net global (solar) radiation	(a) Working standard (b) Network	4π
Pyrgeometer	(a) Upward long-wave radiation (downward-looking) (b) Downward long-wave radiation (upward-looking)	Network	2π
Pyrradiometer	Total radiation	Working standard	2π
Net pyrradiometer	Net total radiation	Network	4π

Figura A1 – Instrumentos meteorológicos para observação de fluxos radiativos (WMO, 2008).

Anexo B

Ficheiros de dados* – ilha Terceira

Table B1 – Descrição do conteúdo (*) ficheiros CSV com dados medidos na estação da ilha Terceira (Carvalho *et al.*, 2010).

Date, time_UTC, G_avg, G_std, D_avg, D_std, SP1_avg, SP2_avg, SP3_avg, SP4_avg, SP1_std, SP2_std, SP3_std, SP4_std, TSP_avg, TSP_std, NIP_avg, NIP_std, PR_avg, PR_std, TPR_avg, TPR_std

_avg: average (5 s)

_std: standard dev. (5 s)

G: Global radiation

D: Diffuse radiation

SP1: SP at wavelength 412 nm

SP2: SP at wavelength 500 nm

SP3: SP at wavelength 675 nm

SP4: SP at wavelength 862 nm

TSP: SP Temp.

Anexo CFicheiros de dados[†] – Graciosa (*ARM Mobile Facility*)[†]Ficheiros CDF

%% Global attributes :

```

nc.ingest_version = ncchar("process-ingest-sirs_ingest-10.0-0");
nc.libingest_version = ncchar("ds-dsutil-ingest_lib-1.7-0");
nc.libdslibc_version = ncchar("ds-dslib-c_lib-1.2-0");
nc.libdsdb_version = ncchar("database-dsdb-c_lib-1.2-0");
nc.ingest_software = ncchar("sirs_ingest.c,v 7.0 2006/08/19 06 :39 :54 ermold process-ingest-sirs_ingest-10.0-0 $");
nc.proc_level = ncchar("a0");
nc.input_source = ncchar("/data/collection/grw/grwskyradM1.00/SkyRadData.20090501000000.dat");
nc.site_id = ncchar("grw");
nc.facility_id = ncchar("M1 : Graciosa Island, Azores");
nc.sample_int = ncchar("20 seconds");
nc.averaging_int = ncchar("None");
nc.comment = ncchar("");
nc.resolution_description = ncchar(['The resolution field attributes refer to the number of significant' char(10)
'digits relative to the decimal point that should be used in' char(10) 'calculations. Using fewer digits might
result in greater uncertainty;' char(10) 'using a larger number of digits should have no effect and thus is'
char(10) 'unnecessary. However, analyses based on differences in values with' char(10) 'a larger number of
significant digits than indicated could lead to' char(10) 'erroneous results or misleading scientific conclusions.'
Char(10) " 'resolution for lat= 0.001' char(10) 'resolution for lon = 0.001' char(10) 'resolution for alt
= 1']);
nc.platform_id = ncchar("213");
nc.serial_number = ncchar(['PIR1-DIR :    34306F3' char(10) 'PIR2-DIR :    34303F3' char(10) 'Diffuse
PSP :    34284F3' char(10) 'NIP :    34097E6' char(10) 'PSP-DS :    34293F3' char(10) 'SKY-IR :
2301' char(10) "']);
nc.calib_coeff = ncchar(['calib_coeff_k0 = PIR1-DIR :    0.0000 W/m^2' char(10) 'calib_coeff_k1 = PIR1-
DIR :    0.2304 W/(m^2*uV)' char(10) 'calib_coeff_k2 = PIR1-DIR :    1.0000 unitless' char(10)
'calib_coeff_k3 = PIR1-DIR :    -4.0000 unitless' char(10) 'calib_coeff_kr = PIR1-DIR :    0.000000 K/uV'
char(10) 'calib_coeff_k0 = PIR2-DIR :    0.0000 W/m^2' char(10) 'calib_coeff_k1 = PIR2-DIR :    0.2475
W/(m^2*uV)' char(10) 'calib_coeff_k2 = PIR2-DIR :    1.0000 unitless' char(10) 'calib_coeff_k3 = PIR2-
DIR :    -4.0000 unitless' char(10) 'calib_coeff_kr = PIR2-DIR :    0.000000 K/uV' char(10) 'Diffuse PSP :
120.91 W/(m^2*mV)' char(10) 'NIP :    124.97 W/(m^2*mV)' char(10) 'PSP-DS :    108.48 W/(m^2*mV)'
char(10) 'SKY-IR :    26.00 K/V' char(10) 'SKY-IR-OFFSET :    173.2000 K' char(10) "']);
nc.zeb_platform = ncchar("grwskyrad20sM1.a0");
nc.history = ncchar("created by user dsmgr on machine ruby at 1-May-2009,22 :54 :40, using $State : ds-zebra-
zeblib-4.16-0 $");

```

%% Dimensions :

nc('time') = 4320 ; %% (record dimension)

%% Variables and attributes :

```

nc{'base_time'} = nclong ; %% 1 element.
Nc{'base_time'}.string = ncchar("30-Apr-2009,23 :59 :20 GMT");
nc{'base_time'}.long_name = ncchar("Base time in Epoch");

```

```

nc{ 'base_time' }.units = ncchar("seconds since 1970-1-1 0 :00 :00 0 :00");

nc{ 'time_offset' } = ncdouble('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'time_offset' }.long_name = ncchar("Time offset from base_time");
nc{ 'time_offset' }.units = ncchar("seconds since 2009-04-30 23 :59 :20 0 :00");

nc{ 'time' } = ncdouble('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'time' }.long_name = ncchar("Time offset from midnight");
nc{ 'time' }.units = ncchar("seconds since 2009-05-01 00 :00 :00 0 :00");

nc{ 'inst_down_long_hemisp1_dome_resist' } = ncfloat('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_down_long_hemisp1_dome_resist' }.long_name = ncchar("Instantaneous Downwelling Pyrgometer
Dome Thermistor Resistance, Pyrgometer1");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_dome_resist' }.units = ncchar("Kohms");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_dome_resist' }.missing_value = ncfloat(-9999);
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_dome_resist' }.ventilation_status = ncchar("Ventilated");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_dome_resist' }.shade_status = ncchar("Shaded");

nc{ 'inst_down_long_hemisp1_case_resist' } = ncfloat('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_down_long_hemisp1_case_resist' }.long_name = ncchar("Instantaneous Downwelling Pyrgometer
Case Thermistor Resistance, Pyrgometer1");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_case_resist' }.units = ncchar("Kohms");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_case_resist' }.missing_value = ncfloat(-9999);
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_case_resist' }.ventilation_status = ncchar("Ventilated");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_case_resist' }.shade_status = ncchar("Shaded");

nc{ 'inst_down_long_hemisp2_dome_resist' } = ncfloat('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_down_long_hemisp2_dome_resist' }.long_name = ncchar("Instantaneous Downwelling Pyrgometer
Dome Thermistor Resistance, Pyrgometer2");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_dome_resist' }.units = ncchar("Kohms");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_dome_resist' }.missing_value = ncfloat(-9999);
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_dome_resist' }.ventilation_status = ncchar("Ventilated");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_dome_resist' }.shade_status = ncchar("Shaded");

nc{ 'inst_down_long_hemisp2_case_resist' } = ncfloat('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_down_long_hemisp2_case_resist' }.long_name = ncchar("Instantaneous Downwelling Pyrgometer
Case Thermistor Resistance, Pyrgometer2");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_case_resist' }.units = ncchar("Kohms");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_case_resist' }.missing_value = ncfloat(-9999);
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_case_resist' }.ventilation_status = ncchar("Ventilated");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_case_resist' }.shade_status = ncchar("Shaded");

nc{ 'inst_down_long_hemisp1_tp' } = ncfloat('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_down_long_hemisp1_tp' }.long_name = ncchar("Instantaneous Downwelling Pyrgometer
Thermopile, Pyrgometer1");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_tp' }.units = ncchar("mV");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_tp' }.missing_value = ncfloat(-9999);
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_tp' }.ventilation_status = ncchar("Ventilated");
nc{ 'inst_down_long_hemisp1_tp' }.shade_status = ncchar("Shaded");

nc{ 'inst_down_long_hemisp2_tp' } = ncfloat('time') ; %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_down_long_hemisp2_tp' }.long_name = ncchar("Instantaneous Downwelling Pyrgometer
Thermopile, Pyrgometer2");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_tp' }.units = ncchar("mV");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_tp' }.missing_value = ncfloat(-9999);
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_tp' }.ventilation_status = ncchar("Ventilated");
nc{ 'inst_down_long_hemisp2_tp' }.shade_status = ncchar("Shaded");

nc{ 'inst_diffuse' } = ncfloat('time') ; %% 4320 elements.

```

```
Nc{ 'inst_diffuse' }.long_name = ncchar("Instantaneous Uncorrected Downwelling Shortwave Diffuse,
Pyranometer Thermopile Voltage");
nc{ 'inst_diffuse' }.units = ncchar("mV");
nc{ 'inst_diffuse' }.missing_value = ncfloat(-9999);
nc{ 'inst_diffuse' }.ventilation_status = ncchar("Ventilated");

nc{ 'inst_direct_normal' } = ncfloat('time'); %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_direct_normal' }.long_name = ncchar("Instantaneous Direct Normal Shortwave Irradiance,
Pyrheliometer Thermopile Voltage");
nc{ 'inst_direct_normal' }.units = ncchar("mV");
nc{ 'inst_direct_normal' }.missing_value = ncfloat(-9999);

nc{ 'inst_global' } = ncfloat('time'); %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_global' }.long_name = ncchar("Instantaneous Downwelling Hemispheric Shortwave, Pyranometer
Thermopile Voltage");
nc{ 'inst_global' }.units = ncchar("mV");
nc{ 'inst_global' }.missing_value = ncfloat(-9999);

nc{ 'inst_sky_ir_signal' } = ncfloat('time'); %% 4320 elements.
Nc{ 'inst_sky_ir_signal' }.long_name = ncchar("Instantaneous Sky/Cloud Infrared");
nc{ 'inst_sky_ir_signal' }.units = ncchar("V");
nc{ 'inst_sky_ir_signal' }.missing_value = ncfloat(-9999);

nc{ 'lat' } = ncfloat; %% 1 element.
Nc{ 'lat' }.long_name = ncchar("north latitude");
nc{ 'lat' }.units = ncchar("degrees");
nc{ 'lat' }.valid_min = ncfloat(-90);
nc{ 'lat' }.valid_max = ncfloat(90);

nc{ 'lon' } = ncfloat; %% 1 element.
Nc{ 'lon' }.long_name = ncchar("east longitude");
nc{ 'lon' }.units = ncchar("degrees");
nc{ 'lon' }.valid_min = ncfloat(-180);
nc{ 'lon' }.valid_max = ncfloat(180);

nc{ 'alt' } = ncfloat; %% 1 element.
Nc{ 'alt' }.long_name = ncchar("altitude");
nc{ 'alt' }.units = ncchar("meters above Mean Sea Level");
```

Anexo D

I

Produtos SAFNWC

Tabela D1 – Produtos gerados com a SAFNWC (METEOSAT, 2005; METEOSAT, 2010).

Produto	Acrónimo	Nome
PGE01	Cma	Cloud Mask and Cloud Amount
PGE02	CT	Cloud Type
PGE03	CTTH	Cloud Top Temperature/Height
PGE04	PC	Precipitating Clouds
PGE05	CRR	Convective Rainfall Rate
PGE06	TPW	Total Precipitable Water
PGE07	LPW	Layer Precipitable Water
PGE08	SAI	Stability Analysis Imagery
PGE09	HRW	High Resolution Wind Vectors from HRVIS
PGE10	ASII	Automatic Satellite Image Interpretation
PGE11	RDT	Rapid Developing Thunderstorms
PGE12	AMA	Air Mass Analysis
PGE13	SPHR	Seviri Physical Retrieval

II

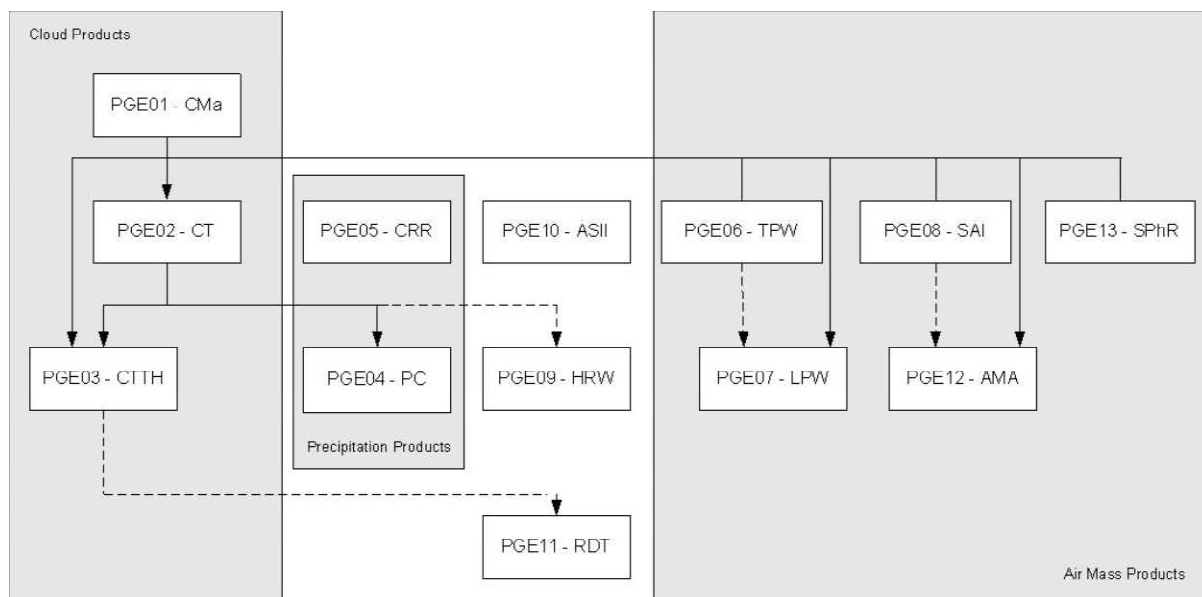


Figura D1 – Dependência entre os produtos gerados pela SAFNWC. As linhas tracejadas mostram dependências opcionais.

III

Tabela D2 – Descrição do output CMa (EUMETSAT, 2005).

Categories		Description
0		Non-processed containing no data or corrupted data
1	cloud-free	no contamination by snow/ice covered surface, no contamination by clouds ; but contamination by thin dust/volcanic clouds not checked
2	Cloud contaminated	partly cloudy or semitransparent. May also include dust clouds or volcanic plumes
3	Cloud filled	opaque clouds completely filling the FOV. May also include thick dust clouds or volcanic plumes
4	Snow/Ice contaminated	
5	Undefined	has been processed but not classified due to known separability problems

Tabela D3 - Descrição do *output* CT (EUMETSAT, 2005).

Categories	Description
0	non-processed containing no data or corrupted data
1	cloud free land no contamination by snow/ice covered surface
2	cloud free sea no contamination by snow/ice covered surface
3	land contaminated by snow
4	sea contaminated by snow/ice
5	very low and cumuliform clouds
6	very low and stratiform clouds
7	low and cumuliform clouds
8	low and stratiform clouds
9	medium and cumuliform clouds
10	medium and stratiform clouds
11	high opaque and cumuliform clouds
12	high opaque and stratiform clouds
13	very high opaque and cumuliform clouds
14	very high opaque and stratiform clouds
15	high semi-transparent thin clouds
16	high semi-transparent meanly thick clouds
17	high semi-transparent thick clouds
18	high semi-transparent above low or medium clouds
19	fractional clouds
20	undefined (undefined by CMA)

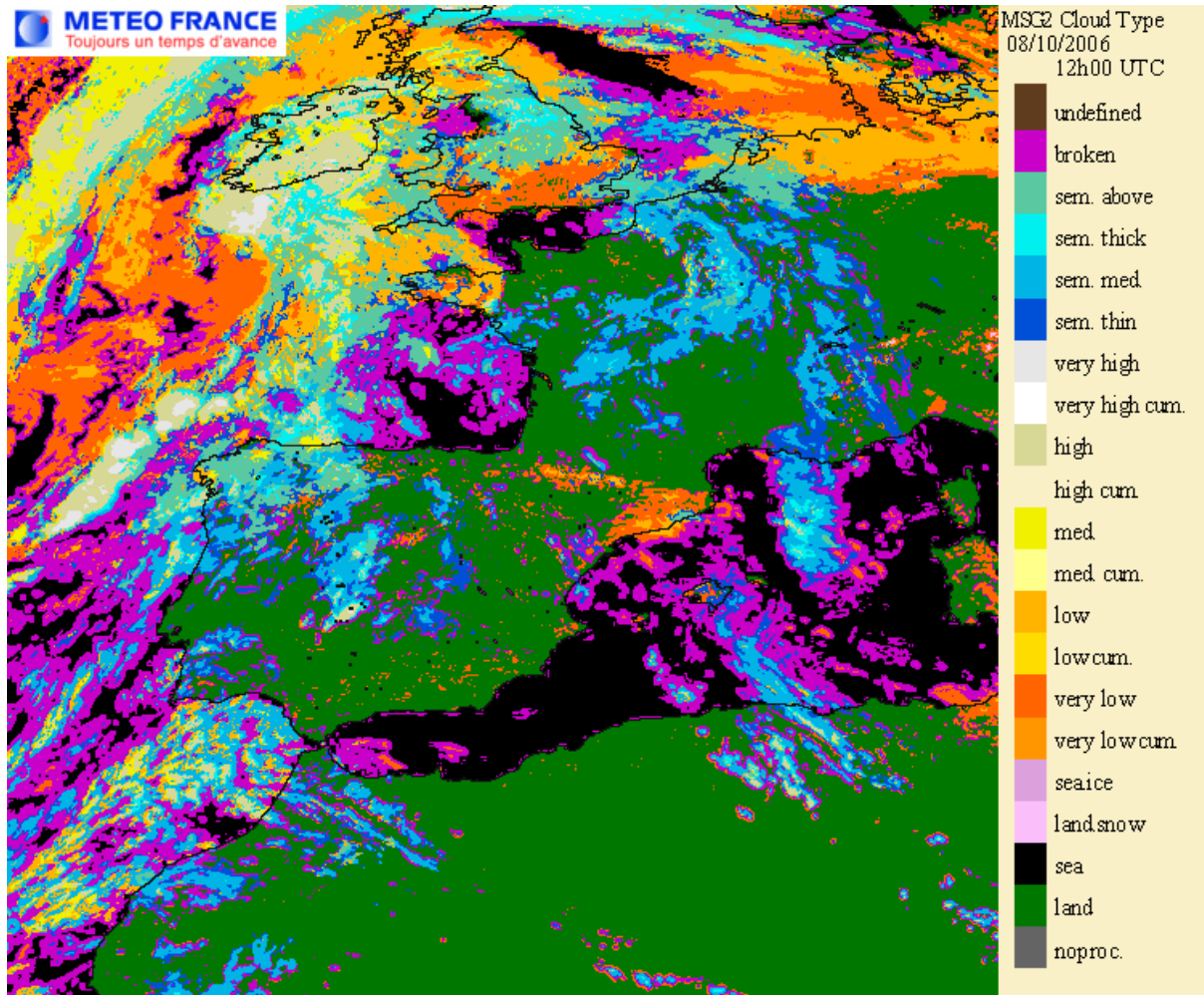


Figura D2 – Exemplo da visualização do output CT (NWCSAF,2011)