



***ERAMAC - Maximização da Penetração das Energias Renováveis e
Utilização Racional da Energia nas Ilhas da Macaronésia***

Contrato nº MAC/4.3/C1

Projecto co-financiado pela UE - INTERREG IIIB AMC, FEDER - e pela RAM, através da Vice-Presidência do Governo Regional da Madeira, com a colaboração da Direcção Regional do Comércio, Indústria e Energia

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR NA REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA

Agosto de 2005



Agência Regional da Energia e Ambiente
da Região Autónoma da Madeira



IDMEC
Institute of Mechanical Engineering

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR NA REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA

Relatório Final

Promotor:

AREAM - Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira

Elaboração:

LASEF

Coordenação geral:

AREAM

Coordenação técnico-científica:

Prof. José Carlos Pereira, LASEF

Equipa de Trabalho:

Bach. Ana Rita Ervilha, LASEF
Doutor José Chaves Pereira, LASEF

Agosto de 2005

ÍNDICE

1.	SUMÁRIO EXECUTIVO	4
2.	METODOLOGIA	5
3.	DADOS	11
4.	RESULTADOS E MAPAS ELABORADOS	15
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	22
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
	ANEXOS	25

1. SUMÁRIO EXECUTIVO

Numa ilha em que os recursos energéticos endógenos com viabilidade de utilização são limitados, a busca da redução da dependência energética leva, naturalmente, à procura de novos locais adequados à concretização de projectos no domínio das energias renováveis, em particular no que refere à energia solar térmica e fotovoltaica.

O presente relatório foi elaborado no âmbito de um estudo solicitado pela AREAM para as ilhas da Madeira e Porto Santo. Os estudos e análises efectuados tiveram como principal componente a determinação do potencial solar para as ilhas referidas.

O potencial solar foi calculado com base nos dados meteorológicos disponíveis, relativos a 5 anos. No decorrer do estudo efectuado foi utilizado o seguinte *software*: ArcGIS, AutoCAD, Visual Basic.

O presente relatório compõe-se de 6 secções. Na segunda secção é apresentada a metodologia seguida e na terceira secção constam os dados utilizados no decorrer do trabalho. Os resultados e os mapas elaborados constituem a quarta secção do relatório e a análise dos resultados e conclusões obtidas encontram-se na quinta secção. A sexta secção consiste nas referências bibliográficas tidas em consideração. Por fim, é apresentado em anexo uma listagem dos dados em formato digital (ArcGIS), representados em 30 ficheiros com um total de 55 MB.

2. METODOLOGIA

A radiação solar global, medida num plano horizontal durante uma hora, é dada pela seguinte relação:

$$I_h = (I_b * \cos \theta_z) + I_d$$

onde:

I_h – radiação solar global em plano horizontal (W/m^2);

I_b – radiação directa (W/m^2), ou seja, aquela que chega directamente do disco solar;

I_d – radiação difusa (W/m^2), resultante da diferença entre a radiação global e a radiação directa incidente no plano;

θ_z – ângulo de zénite (rad).

O cálculo da radiação directa, na horizontal e para um dia claro, pode ser estimado, sendo considerada a visibilidade atmosférica e a altitude acima do nível do mar, da seguinte forma:

$$I_b = I_{oef} * \left(a_0 + a_1 * \exp\left(-\frac{k}{\cos \theta_z}\right) \right)$$

onde:

I_{oef} – constante solar efectiva (W/m^2);

a_0 , a_1 e k – coeficientes (adimensionais).

A constante solar efectiva é dada por:

$$I_{oef} = 1373 * \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi * n}{365,25}\right) \right)$$

onde:

n – dia juliano (por exemplo, para $n = 1$ corresponde o primeiro de Janeiro).

Se o ângulo de zénite for maior ou igual a 90° ou se o local estiver numa zona de sombra, então a radiação directa será zero. Note-se que a detecção de zonas de sombra é feita pelo SIG em função da orografia do terreno e da posição solar.

O ângulo de zénite é definido como o ângulo entre o raio de incidência do Sol e a normal a um plano horizontal. A altitude solar é o complemento do ângulo de zénite, variando para cada hora do dia e sendo, portanto, máxima para o meio-dia (hora solar).

Desta forma, o ângulo de zénite é dado por:

$$\theta_z = 90 - \alpha = \text{sen}\delta * \text{sen}\phi + \cos\delta * \cos\phi * \cos\omega$$

onde:

δ – declinação solar (graus);

ϕ - latitude (graus), sendo o Norte positivo;

ω - ângulo horário (graus).

A declinação solar é dada pela seguinte relação:

$$\delta = 23,45 * \left(\frac{2\pi}{365} * (n + 248) \right)$$

O ângulo horário varia 15° por hora, sendo zero para o meio-dia (hora solar) e positivo para a manhã.

A hora do nascer do Sol é dada por:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi * \tan \delta)$$

Quanto aos coeficientes a_0 , a_1 e k são função da altitude e da visibilidade atmosférica. Para uma visibilidade de 23 km [1], vem:

$$\begin{cases} a_0 = r_0 * (0,4237 - 0,00821 * (6 - A)^2) \\ a_1 = r_1 * (0,5055 - 0,00595 * (6,5 - A)^2) \\ k = r_k * (0,2711 + 0,01858 * (2,5 - A)^2) \end{cases}$$

onde:

A – altitude (km).

Os coeficientes r_0 , r_1 e r_k são diferentes para cada clima. Estes coeficientes encontram-se na seguinte tabela.

Tipo de clima	r_0 (visibilidade de 23 km)	r_1	r_k
Tropical	0,95	0,98	1,02
Verão de meia latitude	0,97	0,99	1,02
Verão sub-ártico	0,99	0,99	1,01
Inverno de meia latitude	1,03	1,01	1,00

Neste trabalho, considerou-se o Verão de meia latitude como o tipo de clima das ilhas da Madeira e Porto Santo.

Com o valor da radiação directa, torna-se possível calcular a radiação difusa, na horizontal e para um dia claro, através da seguinte expressão:

$$I_d = (0,2710 * I_{oef} - 0,2939 * I_b) * \cos \theta_z$$

Se o ângulo de zénite for maior ou igual a 90º, então $\cos \theta_z$ será nulo e, portanto, a radiação difusa assume o valor zero. Note-se que a radiação difusa é afectada pelas sombras apenas através do valor da radiação directa.

Outras influências como humidade, nuvens, etc., são difíceis de contabilizar. Verifica-se porém que, para os dados disponíveis, a intensidade total calculada é próxima dos valores reais, tendo que se considerar o modelo bastante robusto e preciso para o caso presente.

Para uma superfície, o valor da radiação solar global num dia claro é dado pela seguinte relação:

$$I = I_s + I_d * \frac{(1 + \cos \theta_s)}{2} + I_h * \rho * \frac{(1 - \cos \theta_s)}{2}$$

onde:

I_s – radiação solar sobre uma superfície inclinada (W/m^2);

ρ - albedo, ou seja, o índice de reflectância do terreno (adimensional).

Neste trabalho, utilizou-se como valor médio para as ilhas um albedo de 0,2 [2].

A radiação solar sobre uma superfície inclinada é calculada da seguinte forma:

$$I_s = I_b * \cos \theta_s$$

onde:

θ_s – ângulo entre os raios solares e a normal à superfície (rad).

A trajectória solar pode ser definida não só pela altitude solar como também pelo azimute.

O azimute é o ângulo entre a direcção da projecção do Sol no horizonte e a direcção Sul, pelo que a rotação da Terra de Este para Oeste originará um ângulo entre -90° e 90° , respectivamente.

O cálculo do azimute pode ser efectuado através da seguinte expressão:

$$\Psi = \frac{\cos \delta * \text{sen} \omega}{\text{sen} \theta_z}$$

Para determinar a radiação global numa superfície, é necessário aplicar o índice de claridade ao cálculo já efectuado da radiação global (para um dia claro) nessa mesma superfície. Este índice provém da relação entre a radiação global calculada (para um dia claro) num dado momento e a radiação global registada nesse mesmo momento (a qual provém dos dados meteorológicos obtidos).

Para cada mês, o resultado final é dado por:

$$\text{resultado final} = (RDC_F * \alpha) + (RDC_C * (1 - \alpha))$$

onde:

$$\alpha = \frac{C + F}{C^2 + F^2}$$

e:

F – índice de claridade do Funchal;

C – índice de claridade do Caniçal;

RDC_F – resultados dia claro para o Funchal;

RDC_C – resultados dia claro para o Caniçal.

O alfa (α) foi obtido pelo método dos mínimos quadrados, minimizando a soma dos quadrados das distâncias relativas dos resultados dia claro aos reais.

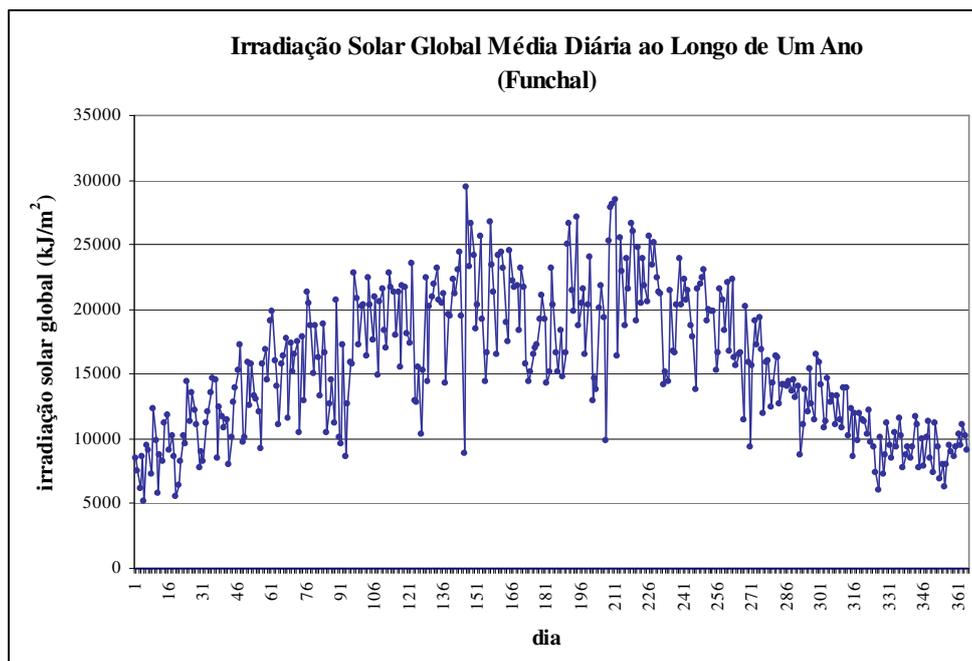
A minimização baseou-se em distâncias relativas para que a margem de erro final se situasse numa gama inferior a 15 % nas duas estações. Minimizando de forma absoluta, a estação com menos radiação incidente sofreria erros de aproximação de maior monta. Uma vez que os resultados de toda a ilha foram providenciados pela análise local destes dois conjuntos de dados, a abordagem referida acima parece ser a mais satisfatória.

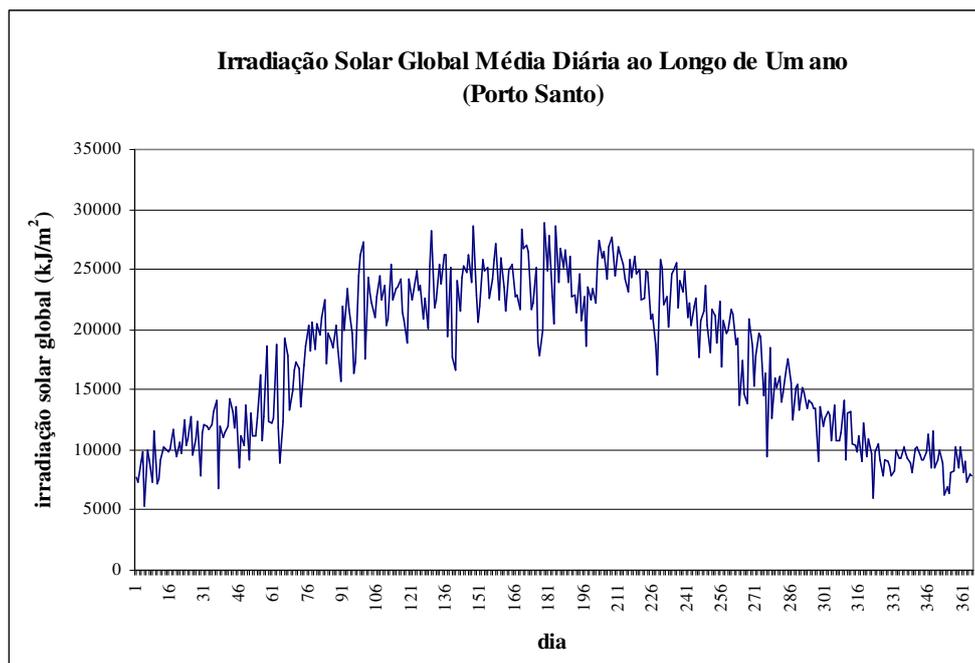
.

3. DADOS

A informação topográfica teve por base cartas geográficas das ilhas da Madeira e Porto Santo do Instituto Geográfico Português (IGP), à escala 1:50.000, com curvas de nível espaçadas de 25 em 25 metros. O Sistema de Coordenadas é Rectangulares com Projecção UTM (Fuso 28), Elipsóide de Hayford, Datum Porto Santo. Para a ocupação urbana, foram utilizados os dados do Instituto Geográfico do Exército (IGEOE), à escala 1:25.000.

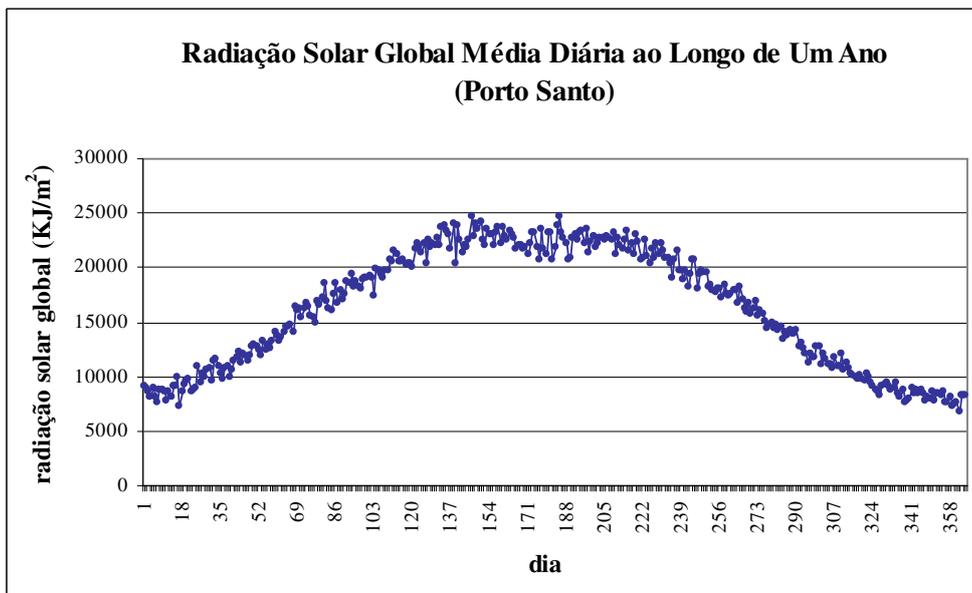
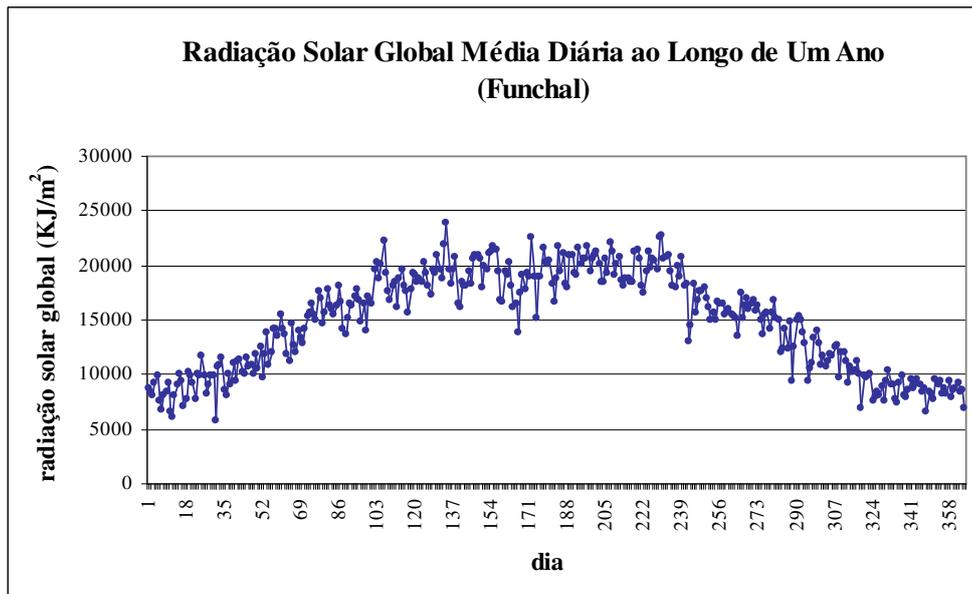
Os dados meteorológicos utilizados são dados horários referentes a um período de cinco anos (1999 – 2003) e encontram-se compilados nos gráficos em baixo, respectivamente, para as estações meteorológicas do Funchal e do Porto Santo.





Estes dados careceram de tratamento, nomeadamente no que se refere aos picos irrealistas que apresentavam, bem como às lacunas existentes em alguns períodos. Desta forma, foi necessário suprimir dados que pareciam díspares e proceder a uma intensiva interpolação de dados, quando os períodos em falta eram suficientemente curtos e passíveis de serem estimados com os valores existentes antes e depois.

Foram também tidos em conta dados meteorológicos diários para as ilhas da Madeira e Porto Santo [3], referentes a um período de nove anos (de 1964 a 1972) e a um período de vinte e seis anos (1964 a 1989), respectivamente, os quais se encontram representados graficamente em seguida.



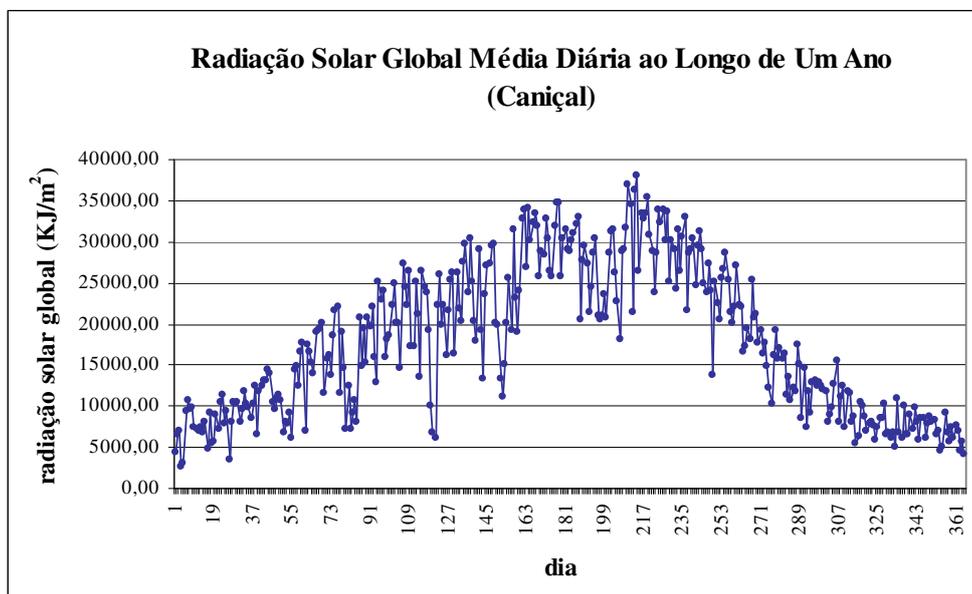
Por comparação, os últimos dados referidos validam os primeiros, nomeadamente no que respeita ao andamento das curvas, bem como à ordem de grandeza do valor da radiação solar obtida.

Desta forma se ilustra que os dados, embora restritos a duas estações, fazem denotar um comportamento geral estável tanto nas gamas de radiação quanto no padrão da variação da radiação solar ao longo do ano. Os cálculos foram

efectuados com os dados mais recentes, provenientes de EMA, como já foi referido, mas que interessa salientar.

Foram ainda utilizados, no cálculo do índice de claridade a aplicar aos resultados obtidos para um dia claro, os dados diários de radiação solar global média disponibilizados pela AREAM.

Estes dados são referentes ao Caniçal (Quinta do Lorde), correspondem a um período de 3 anos (de 2003 a 2005) e encontram-se sistematizados no gráfico seguinte.



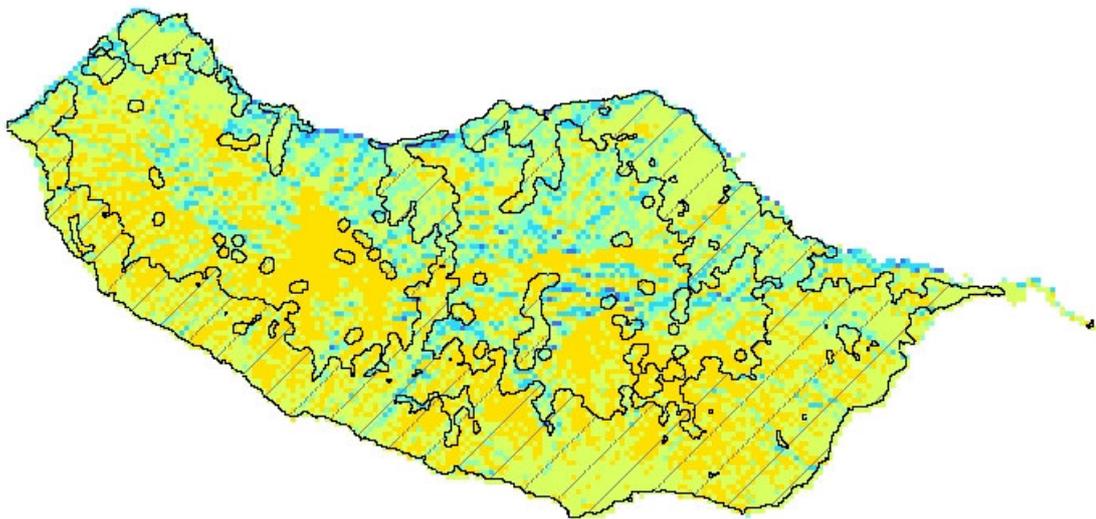
4. RESULTADOS E MAPAS ELABORADOS

Tendo em conta a metodologia já mencionada e os dados disponíveis, apresenta-se em seguida algumas figuras que reportam o cálculo efectuado da radiação solar média diária para os meses de Janeiro e Julho, bem como a média anual da radiação solar média diária para as ilhas da Madeira e Porto Santo.

As zonas de ocupação urbana encontram-se delineadas nas figuras, permitindo a visualização global dos níveis de potencial associados às várias regiões das duas ilhas. Estas zonas de ocupação urbana foram definidas como as áreas do território que reúnem simultaneamente as duas condições: i) 300 metros de raio em redor de qualquer edificação identificada nas cartas do IGEOE e ii) existência de pelo menos três edificações no interior de um raio de 300 metros em redor de cada uma delas.

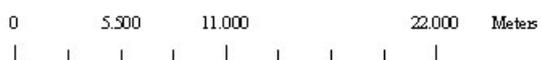
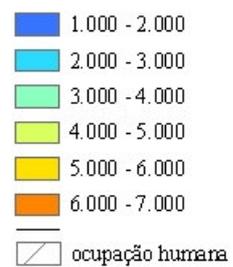
No caso do potencial solar, a delimitação das zonas de ocupação humana foi efectuada com o propósito de identificar a zona onde a aplicação da energia solar seria para fins domésticos, inseridos normalmente no edificado, bem como de identificar as zonas desocupadas onde se poderiam eventualmente instalar parques de painéis fotovoltaicos.

Radiação Solar Média Diária Madeira

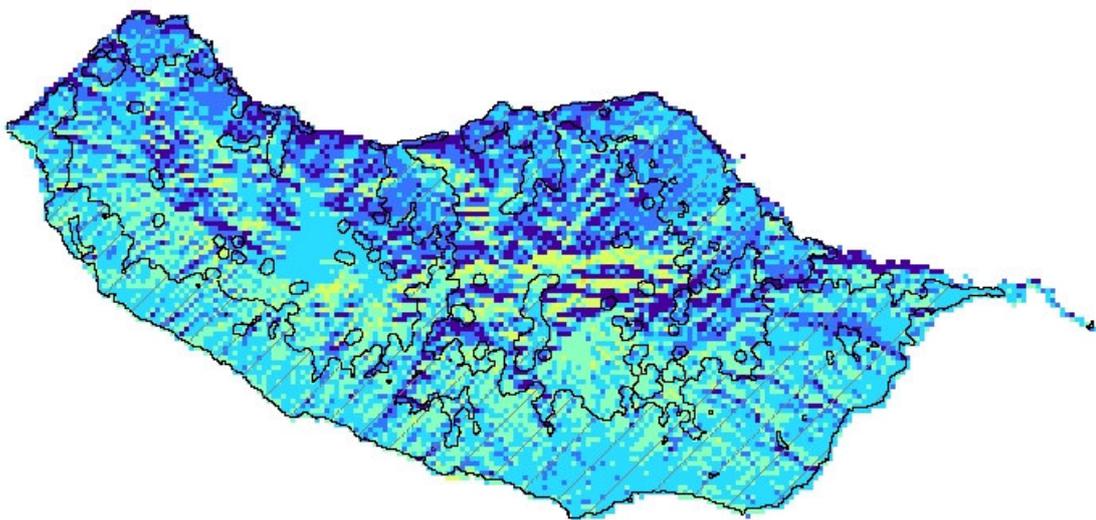


Legenda:

Radiação solar média diária (Wh/m².dia)

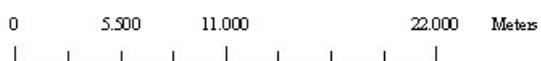
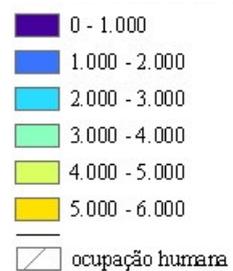


Radiação Solar Média Diária Madeira - Janeiro

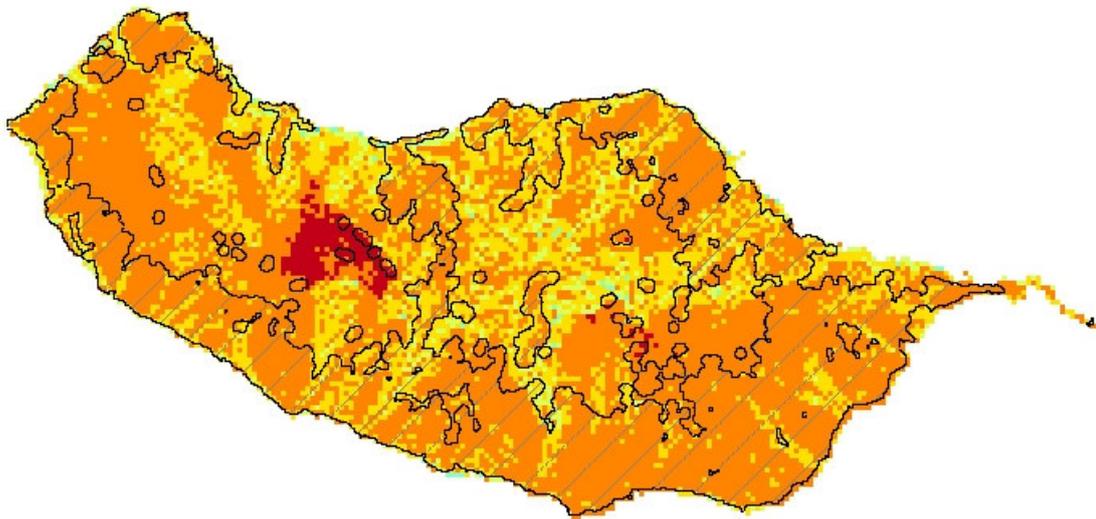


Legenda:

Radiação solar média diária (Wh/m².dia)



Radiação Solar Média Diária Madeira - Julho



Legenda:

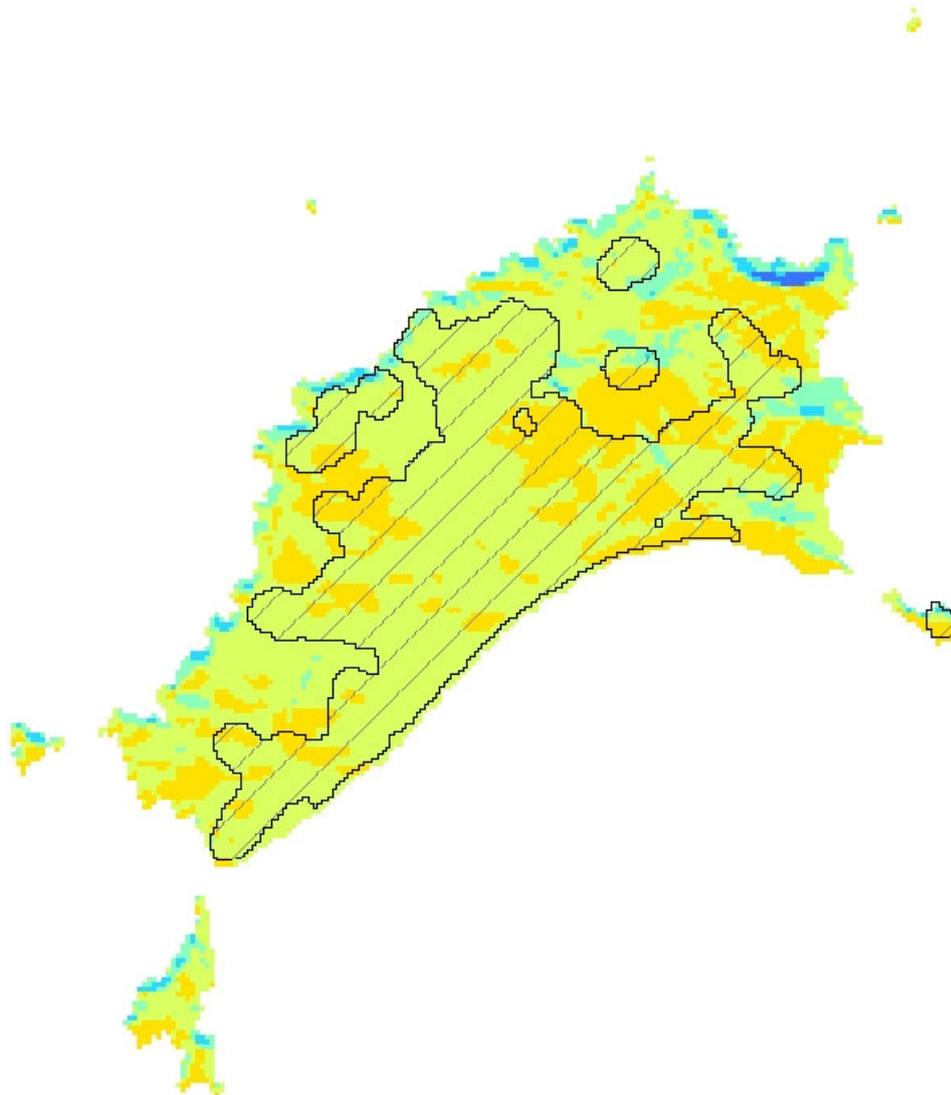
Radiação solar média diária (Wh/m².dia)

-  2.000 - 3.000
-  3.000 - 4.000
-  4.000 - 5.000
-  5.000 - 6.000
-  6.000 - 7.000
-  7.000 - 8.000

 ocupação humana

0 5.000 11.000 22.000 Metros

Radiação Solar Média Diária Porto Santo



Legenda:

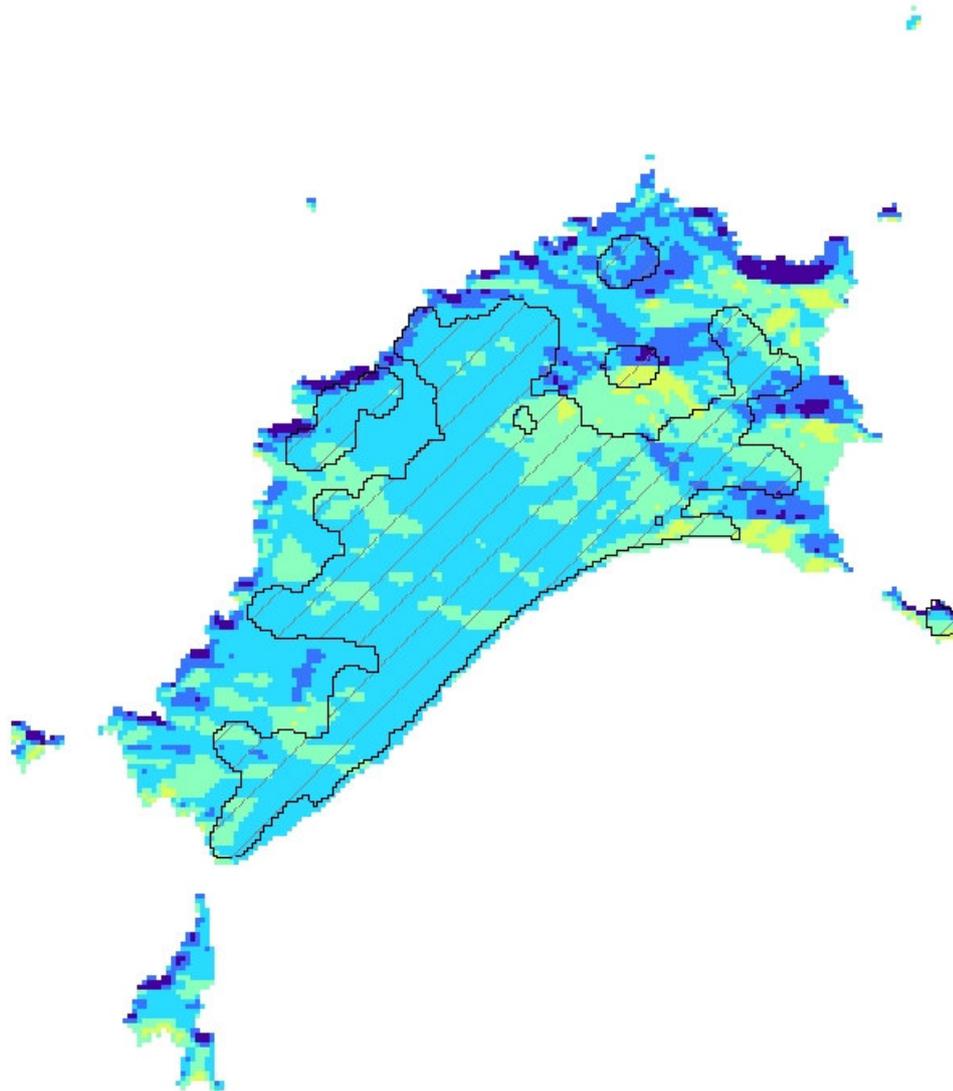
Radiação solar média diária (Wh/m².dia)

-  1.000 - 2.000
-  2.000 - 3.000
-  3.000 - 4.000
-  4.000 - 5.000
-  5.000 - 6.000

 ocupação humana

0 1.300 2.600 5.200 Metros

Radiação Solar Média Diária Porto Santo - Janeiro



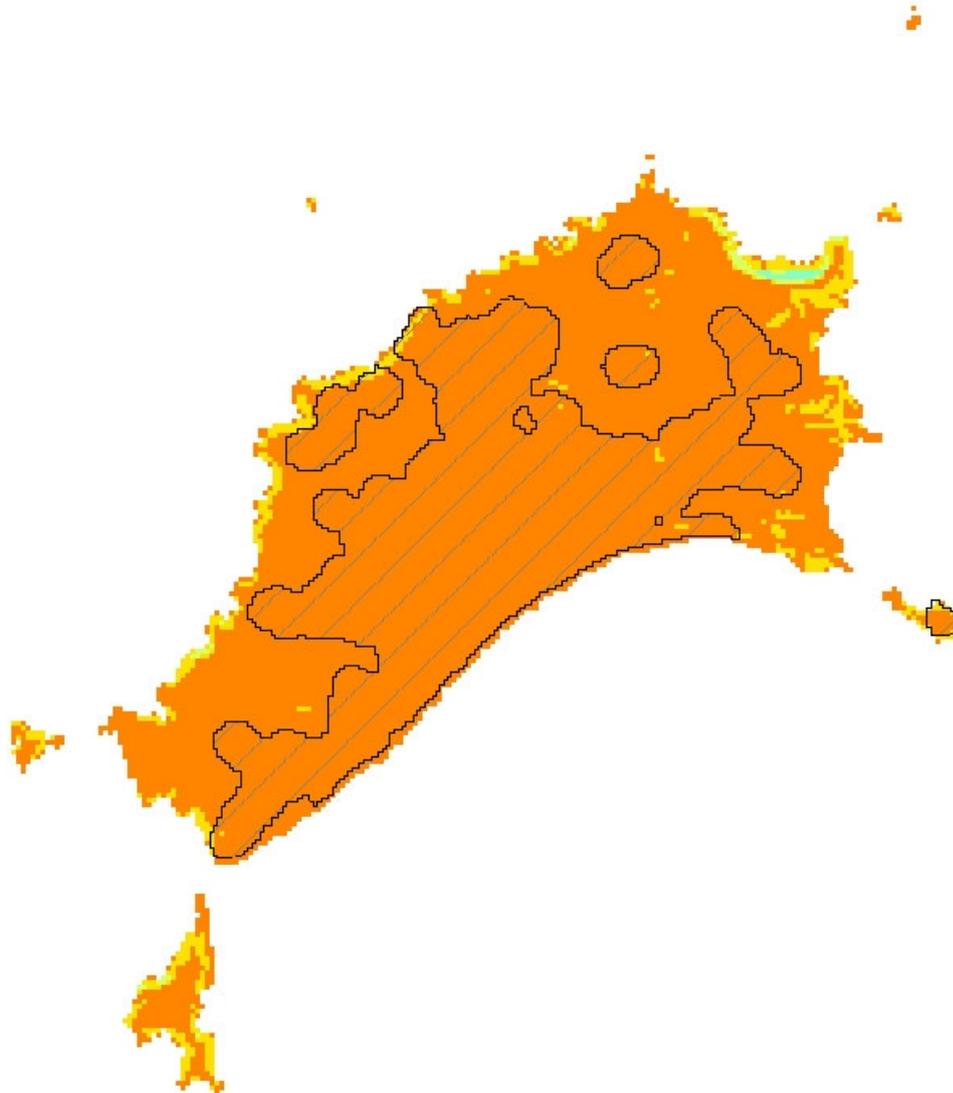
Legenda:

Radiação solar média diária (Wh/m².dia)

-  0 - 1.000
-  1.000 - 2.000
-  2.000 - 3.000
-  3.000 - 4.000
-  4.000 - 5.000
-  ocupação humana

0 1.300 2.600 5.200 Metros

Radiação Solar Média Diária Porto Santo - Julho



Legenda:

Radiação solar média diária (Wh/m².dia)

-  3.000 - 4.000
-  4.000 - 5.000
-  5.000 - 6.000
-  6.000 - 7.000
-  7.000 - 8.000

 ocupação humana

0 1.300 2.600 5.200 Metros

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Para a análise dos resultados solares da ilha da Madeira, o Instituto de Meteorologia apenas disponibilizou dados de radiação da estação do Funchal. Posteriormente, a AREAM providenciou dados (ainda que referentes a outro período temporal) do Caniçal.

Verificou-se que a previsão para o Caniçal obtida com os dados do Funchal apresentava um desvio de cerca de 20% em média (dependente do mês em questão). De forma similar, foram feitos cálculos baseados nos dados do Caniçal cuja estimativa para o Funchal também se situava em margens similares quando comparados com as medidas de radiação do Funchal.

Esta constatação apoiou os resultados preliminares, sugerindo que a radiação solar da Madeira apresenta, além de relativamente próxima da radiação teórica do dia claro (no caso presente admite-se que a radiação difusa será da ordem da radiação absorvida antes de chegar ao solo), índices de claridade relativamente uniformes para toda a região, apesar de existirem fenómenos microclimáticos não considerados, por limitação de dados, designadamente a ocorrência de nevoeiros em zonas mais altas.

Com duas fontes de dados e com as evidências referidas acima, o resultado final foi assumido como a média ponderada dos resultados obtidos independentemente, tendo por base os dados de radiação solar do Caniçal (dados da AREAM) e os da estação meteorológica do Funchal (dados do IM). Os dois valores para ponderação, α e $(1-\alpha)$, foram obtidos através dum método de minimização (mínimos quadrados).

Da análise dos mapas de radiação solar diária, média anual, pode-se inferir que tanto a ilha da Madeira como a do Porto Santo apresentam condições gerais propícias para a utilização deste recurso.

Em termos gerais, valores acima de 4 kWh/m².dia apresentam-se genericamente atractivos para o aproveitamento de energia solar fotovoltaica. Isto leva a concluir que, na generalidade da ilha da Madeira (superior a 50%) e na quase totalidade da ilha do Porto Santo (cerca de 90%), a energia solar é um recurso energético endógeno com interesse de exploração.

No caso da Madeira, refira-se, adicionalmente, que a distribuição do potencial solar se dá, de forma equilibrada, entre a zona de ocupação urbana e o restante território. No entanto, fica a salvo quaisquer factores climatológicos localizados que possam existir, designadamente a frequente ocorrência de nevoeiros nas zonas mais altas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Monteiro C., Integração de Energias Renováveis na Produção Descentralizada de Electricidade Utilizando SIG, Tese de Mestrado, INESC Porto
- [2] Monteith J. & Unsworth M., Principles of Environmental Physics, 2nd Edition, Arnold, London; New York. (1990)
- [3] World Radiation Data Centre, Solar Radiation and Radiation Balance Data (The World Network), World Meteorological Organization, Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, St. Petersburg, Russia

ANEXOS

MEMÓRIA DESCRITIVA DOS FICHEIROS DE DADOS PRODUZIDOS

MADEIRA:

Formato Raster:

m_janeiro - radiação média diária global incidente no mês de Janeiro (Wh/m².dia)

m_fevereiro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_marco - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_abril - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_maio - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_junho - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_julho - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_agosto - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_setembro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_outubro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_novembro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_dezembro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

m_media_dia - radiação média diária global incidente (Wh/m².dia)

m_ocuphum - delimitação da zona de ocupação humana

Formato Vectorial:

m_ocuphumana - delimitação da zona de ocupação humana

PORTO SANTO:**Formato Raster:**

ps_janeiro - radiação média diária global incidente no mês de Janeiro (Wh/m².dia)

ps_fevereiro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_marco - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_abril - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_maio - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_junho - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_julho - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_agosto - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_setembro - radiação média diária global incidente no mês de (W/m².dia)

ps_outubro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_novembro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_dezembro - radiação média diária global incidente no mês de (Wh/m².dia)

ps_media_dia - radiação média diária global incidente (Wh/m².dia)

ps_ocuphum - delimitação da zona de ocupação humana

Formato Vectorial:

ps_ocuphumana - delimitação da zona de ocupação humana

AGRADECIMENTOS

Instituto Geográfico Português (IGP)

Instituto de Meteorologia (IM)