

CÁLCULO DO EFEITO DE SOMBRA COM O SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA ILWIS 2.1

GONÇALO TELES VIEIRA

*Centro de Estudos Geográficos, Universidade de Lisboa, Faculdade de Letras, Alameda da Universidade, 1600-214 Lisboa,
e-mail: gtvieira@ceg.ul.pt*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da distribuição das áreas potencialmente à sombra, logo, recebendo apenas radiação solar difusa e das áreas expostas à radiação solar directa é um aspecto de grande importância em estudos de climatologia local, e com aplicações directas na fitossociologia, ordenamento do território, agricultura, etc. Também para a geomorfologia e, em especial para a geomorfologia periglaciária, é um dado importante, pois o regime energético, e consequentemente, térmico e higrométrico das áreas na sombra, é substancialmente diferente do regime das áreas expostas à radiação solar directa.

As observações de campo efectuadas nas serras do Gerês (Vieira, 1995) e Estrela têm demonstrado que num espaço de poucos metros a incidência de radiação solar directa pode ser suficiente para determinar a descongelação do solo durante o dia. Por outro lado, locais próximos, mas à sombra, podem manter-se gelados todo o dia. Nos primeiros, os ciclos de congelação-fusão são essencialmente diários, secando o solo de modo mais ou menos rápido (a água no solo é segregada em direcção à superfície durante a noite e fica disponível para ser evaporada de dia, durante e após a fusão). Nos locais à sombra, com a progressiva segregação em cada noite, a espessura de solo gelado aumenta e também o volume de água próximo da superfície. Mesmo que este fenómeno suceda durante um período de poucos dias (por exemplo uma vaga de ar frio anticiclónica de estação fria), quando o solo funde, a saturação da superfície vai originar uma dinâmica morfogenética particular, associada a fenómenos incipientes de solifluxão pelicular.

O cálculo do efeito de sombra encontra-se disponível em alguns pacotes de *software* para Sistemas de Informação Geográfica (SIG) vectoriais, normalmente de elevado custo, não só ao nível da aquisição, mas também da aprendizagem por parte do utilizador. Por outro lado, os actuais sistemas *raster*, mais simples e de baixo custo, raramente apresentam essas funções pré-programadas.

É apresentada uma metodologia desenvolvida para o SIG ILWIS 2.1 que permite calcular a distribuição das áreas potencialmente à sombra e potencialmente ao sol, partindo de um modelo digital de terreno (DTM) e conhecendo o azimute e altura do sol. Com os mapas

assim produzidos, e utilizando um outro algoritmo (ver Felicísimo, 1994 e Meijerink *et al.*, 1994) é possível modelizar a radiação solar directa potencial.

2. METODOLOGIA

A metodologia aqui apresentada foi desenvolvida para o software ILWIS 2.1, mas poderá, eventualmente, ser adaptada com poucas alterações a outros sistemas matriciais. Os processos adoptados tendem essencialmente a socorrer-se das potencialidades do *software*, mas também a solucionar lacunas relacionadas com a ausência de algumas funções pré-programadas importantes para o processo de cálculo. A principal limitação do processo relaciona-se com a funcionalidade das iterações no ILWIS 2.1, que implica quatro rotações consecutivas (ver Budde *et al.*, 1997 e Van Westen e Farifteh, 1997), e que para o processo em causa, são desnecessárias, facto que pode introduzir alterações de pormenor no resultado final. Mas como veremos, os resultados obtidos na modelização da sombra são rigorosos e muito satisfatórios.

O problema do cálculo do efeito de sombra a partir de um DTM compreende a modelização de duas situações: o auto-ocultamento e o ocultamento pelo relevo envolvente (Felicísimo, 1994, p.178). "O auto-ocultamento corresponde a uma situação em que o vector normal ao declive do pixel faz um ângulo superior a 90° com o vector solar (é o caso de um pixel exposto a norte, com declive de 45°, quando os raios solares provêm de sul, sendo a altura do sol de 30°)" (ob. cit., p. 178). O ocultamento pelo relevo circundante refere-se à sombra causada pelos outros pixels do DTM sobre o pixel em análise.

O cálculo do auto-ocultamento é relativamente simples e deverá obedecer à seguinte fórmula geral (Oke, 1995, p.345):

$$(1) \cos \theta = \cos \beta \cos (90^\circ - \gamma) + \sin \beta \sin (90^\circ - \gamma) \cos (\phi - \Omega)$$

θ - Ângulo de incidência (entre os raios solares e a normal à vertente); β - Declive do pixel; γ - Altura do sol; Ω - Exposição do pixel; ϕ - Azimute solar

Após a aplicação da fórmula, se $\theta > 90^\circ$, verifica-se uma situação de auto-ocultamento e o pixel está à sombra (fig. 1).

Para o cálculo do ocultamento pelo relevo envolvente, a solução encontrada compreende 3 fases distintas, partindo do conhecimento prévio do azimute solar e altura do sol (dependentes da latitude, data e hora).

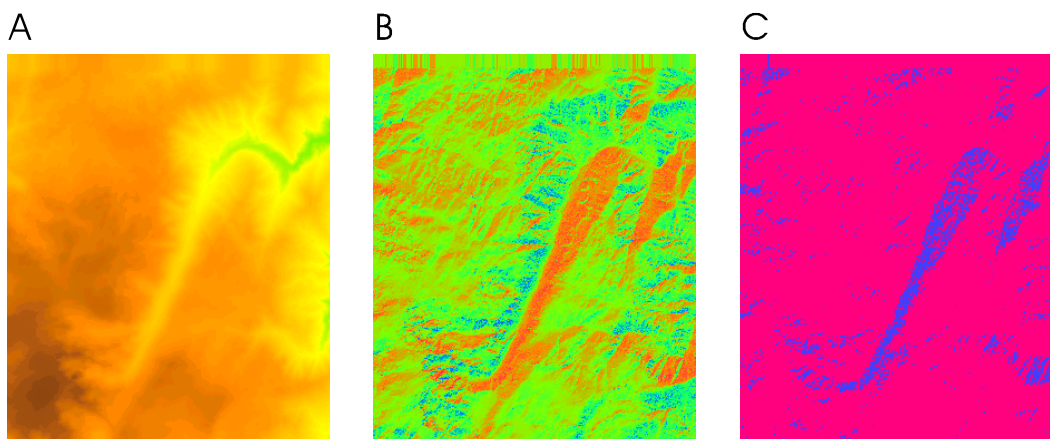


Figura 1 - Obtenção do mapa do auto-ocultamento, utilizando a fórmula (1). A - Modelo Digital de Terreno; B - Irradiância (fórmula (1)); C - Auto-ocultamento.

- 1) Rotação do DTM
- 2) Cálculo das áreas de sombra
- 3) Rotação do mapa das áreas de sombra para a georeferenciação correcta

2.1 Rotação do DTM

A modelização do efeito de sombra baseia-se no estudo da influência dos pixels que se encontram no limite do DTM ($PP_{(1,y)}$) mais próximo da origem dos raios solares (portanto no limite do DTM na direcção do azimute solar - ϕ), sobre o pixel adjacente no sentido oposto a ϕ ($PP_{(2,y)}$). Segue-se a análise da influência de $PP_{(2,y)}$ sobre o pixel adjacente seguinte, e assim consecutivamente até todo o DTM ter sido analisado. Este processo é explicado no ponto 2.2.

De modo a simplificar a análise, e devido ao modo de funcionamento do *software* usado, optou-se por estudar sempre a influência do pixel da esquerda ($PP_{(x,y)}$) sobre o pixel da direita ($PP_{(x+1,y)}$) num processo iterativo, considerando os raios solares como virtualmente provindo de Oeste. Na realidade, o DTM original deverá ser rodado considerando ϕ a analisar, sendo assim adoptada uma georeferenciação fictícia temporária que faz coincidir ϕ com o lado esquerdo do mapa (fig. 2). A rotação é assim definida como: $r = \phi - 270$.

A impossibilidade da rotação automática segundo intervalos que não sejam múltiplos de 90° usando o ILWIS 2.1 (o mesmo se passa com o *software Idrisi for Windows 2.0*) torna necessária a criação de uma nova georeferência onde se incorporam as coordenadas que o DTM deverá apresentar após a rotação. A esta nova georeferência

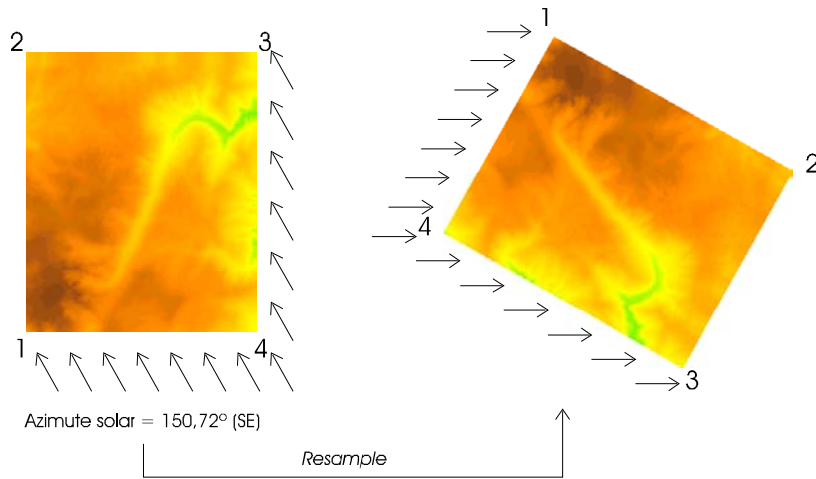


Figura 2 - Rotação do DTM considerando o azimute solar, de modo a que a radiação incida a partir do lado esquerdo do DTM

deverão corresponder 4 pontos de introdução de coordenadas, localizados nos vértices do DTM original (fig. 2).

O procedimento deverá ser o seguinte:

- 1) Calcular as novas coordenadas para os vértices do DTM depois de rodado ϕ (ver Quadro I);
- 2) Criar uma *georeference tiepoints* para o DTM;
- 3) Introduzir quatro *tiepoints*, um em cada vértice do DTM, atribuindo-lhes as novas coordenadas;
- 4) Fazer *resample* ao DTM, criando uma georeferência automática, e tendo o cuidado de definir o tamanho do pixel final.

Ficará então criado um novo mapa cuja rotação orientou o azimute de proveniência dos raios solares para o lado esquerdo, proporcionando assim o cálculo do efeito de

Quadro I

Vértice	Coord. X	Coord. Y
1	X	Y
2	$(Y_{\max}-Y_{\min})*\sin(\text{degrad}(r)) + X_{\min}$	$(Y_{\max}-Y_{\min})*\cos(\text{degrad}(r)) + Y_{\min}$
3	$\text{Hyp}(Y_{\max}-Y_{\min}, X_{\max}-X_{\min})*\cos(\text{atan}(Y_{\max}-Y_{\min}/(X_{\max}-X_{\min}))- \text{degrad}(r))+X_{\min}$	$\text{Hyp}(Y_{\max}-Y_{\min}, X_{\max}-X_{\min})*\sin(\text{atan}(Y_{\max}-Y_{\min}/(X_{\max}-X_{\min}))- \text{degrad}(r))+Y_{\min}$
4	$(X_{\max}-X_{\min})*\sin(\text{degrad}(90+r))+X_{\min}$	$(X_{\max}-X_{\min})*\cos(\text{degrad}(90+r))+Y_{\min}$

$r = \phi - 270$; degrad - comando para transformar graus em radianos; X_{\max} - abcissa máxima; X_{\min} - abcissa mínima; Y_{\min} - ordenada mínima; Y_{\max} - ordenada máxima; hyp - hipotenusa; sin - seno; cos - cosseno; atan - arcotangente
 Nota: nas fórmulas estão integrados os comandos, tal como usados no *software* ILWIS 2.1

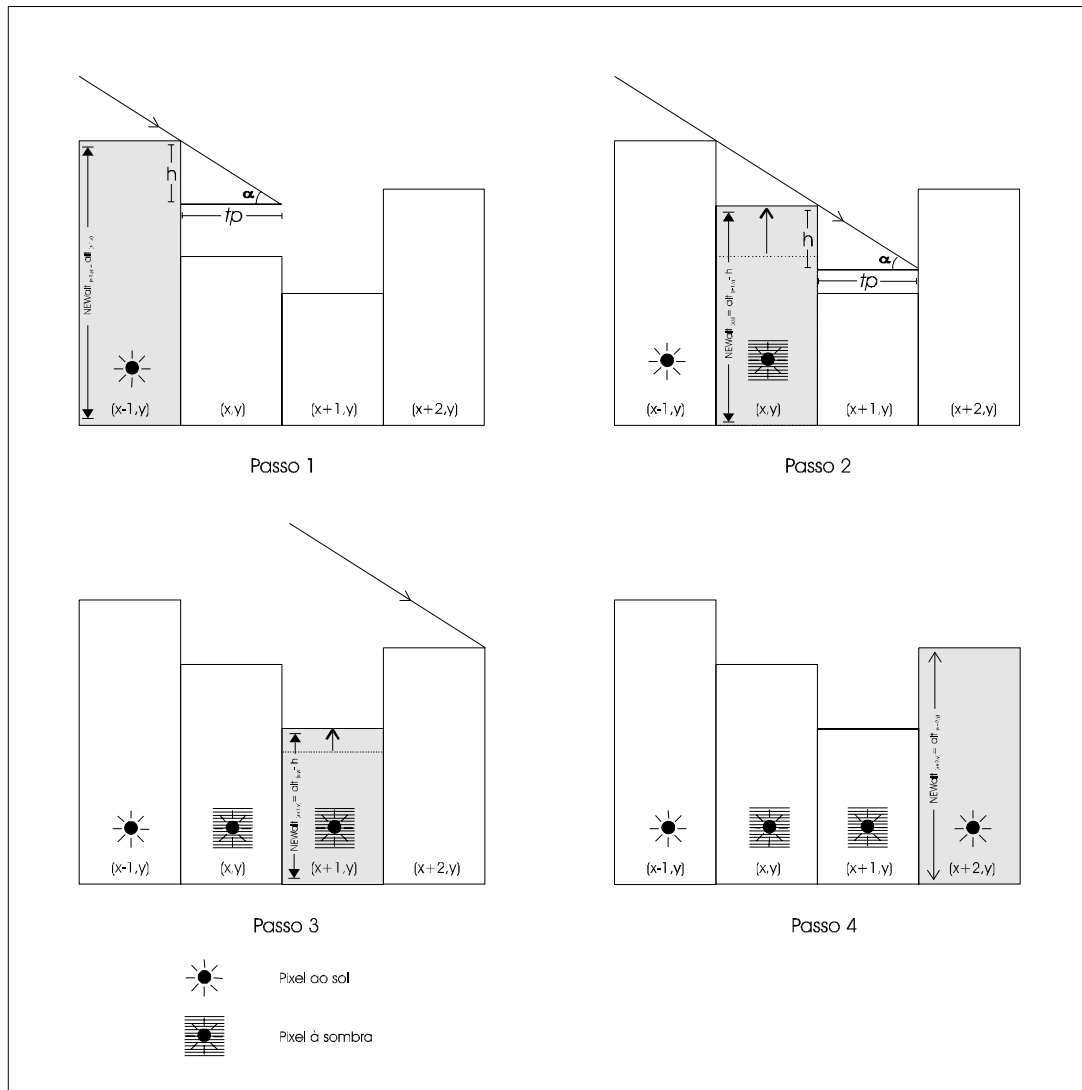


Figura 3 - Processo de cálculo do efeito de sombra, usando iterações sucessivas, em linha, da esquerda para a direita no DTM.

sombra usando vectores daí provenientes. É de notar que ao fazer o *resample*, se vai introduzir algum erro no DTM, pois a rotação e mudança de coordenadas efectuada sobre cada pixel vai fazer com que os seus valores sejam recalculados em função dos valores dos pixels vizinhos. O erro é desprezável para o cálculo do efeito de sombra.

2.2 Cálculo das áreas à sombra

O processo seguido para o cálculo das áreas à sombra modeliza a acção do relevo envolvente num determinado pixel. O algoritmo de cálculo é aplicado individualmente a cada pixel do DTM, considerando sempre o efeito causado sobre ele pelos pixels que se encontram na direcção do azimute solar (lado esquerdo).

Deste modo, se num exemplo simples, considerarmos dois pixels adjacentes, o pixel problema ($PP_{(x,y)}$) está à sombra se a sua altitude for inferior à altitude do pixel que está à sua

esquerda ($PP_{(x-1,y)}$ - na direcção do azimute solar) menos $tp \cdot \tan \gamma$, sendo que tp é o tamanho do pixel e γ a altura do sol (ver figura 3). Usando este algoritmo, apenas os pixels que estão na sua totalidade à sombra, são considerados como áreas de sombra.

No entanto a iluminação de $PP_{(x,y)}$ não depende apenas da comparação com $PP_{(x-1,y)}$, mas do potencial efeito causado por todos os pixels que se encontram na direcção do azimute solar (figura 3). A solução para este problema reside no cálculo iterativo das relações entre os vários pixels, sempre feito comparando os pixels dentro de uma mesma linha. Assim, deverá ser escolhido um processo iterativo em que para todos os pixels se verifica se a condição acima apresentada é verdadeira, ou falsa. Se for verdadeira, ou seja se a altitude de $PP_{(x-1,y)}$ for superior a $PP_{(x,y)} + tp \cdot \tan \gamma$, então $PP_{(x,y)}$ está à sombra; se for falso está ao sol. No caso de a condição ser verdadeira, deverá ser atribuído um novo valor a $PP_{(x,y)}$ igual a $PP_{(x-1,y)} - tp \cdot \tan \gamma$. Deste modo, quando a coluna seguinte estiver a ser analisada, a comparação entre o novo pixel problema ($PP_{(x+1,y)}$) e $PP_{(x,y)}$, já tomará em consideração que este se encontrava à sombra, e a sua nova altitude servirá para avaliar o efeito de $PP_{(x-1,y)}$ em $PP_{(x+1,y)}$, usando sempre a condição inicial. Quando um determinado pixel está ao sol, a sua altitude não deverá ser alterada e vai servir para a comparação com o pixel da direita que se segue.

Após a rotina referida ter sido corrida em todo o mapa, não devendo ser esquecida a necessidade de que os novos valores que são calculados para os pixels à sombra devem ser sempre utilizados nos cálculos da coluna seguinte, um novo mapa é produzido. Neste, os pixels ao sol são os que não sofreram modificações na sua altitude, enquanto os pixels à sombra apresentam novos valores. A comparação deste mapa com o DTM original permitirá verificar quais os pixels que sofreram alterações, e assim determinar as áreas de sombra (fig. 4).

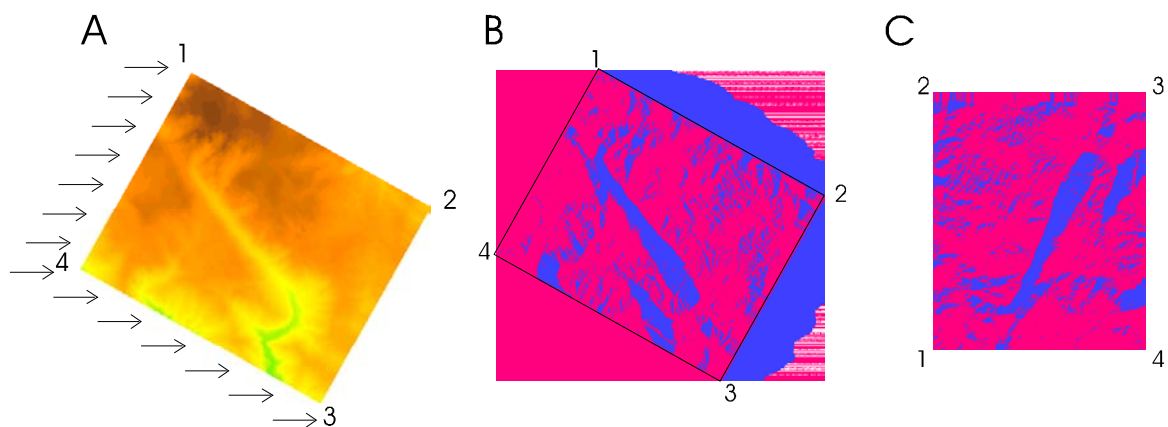


Figura 4 - Cálculo do efeito de sombra. A - DTM após rotação (ver fig. 2); B - Efeito de sombra; C - Rotação do mapa do efeito de sombra através de um *resampling* para a georeferenciação inicial.

O processo por nós adoptado consistiu na utilização da função *MapIterProp*, sendo suficiente uma iteração. Para o cálculo foi criado o *script sombra*:

```
rem ILWIS Script

// Calculo do efeito sombra
// %1 - novo mapa
// %2 - dtm já orientado
// %3 - tamanho do pixel (m)
// %4 - altura do sol (graus)
// %5 - sombra

tmp1=iff(isundef(%2),0,%2)
%1=MapIterProp(tmp1,iff(tmp1>tmp1#[4]-%3*tan(degrad(%4)),tmp1,tmp1#[4]-%3*tan(degrad(%4))),1)
sombra=iff(%1<>tmp1,0,1)
open sombra.mpr
```

Para correr este *script*, deverá ser introduzido o comando *run sombra novo DTM tp γ* , sendo que *sombra* é o nome do *script*, *novo* corresponde ao nome a dar ao novo mapa, *DTM* é o nome do ficheiro do DTM a usar (já sujeito à rotação necessária), *tp* é o tamanho do pixel (na mesma unidade do DTM) e γ é a altura do sol (em graus).

2.3 Rotação do mapa das áreas de sombra para a georeferenciação correcta

O último passo é a atribuição de uma nova *georeference tiepoints* (semelhante à inicial) ao mapa de sombra construído e fazer um *resample* para a georeferência do DTM inicial. Pode-se assim sobrepôr a informação calculada. As limitações do método prendem-se essencialmente com o erro resultante dos dois processos de *resample* efectuados.

2.4. Cálculo do mapa das áreas de sombra

A obtenção do mapa das áreas à sombra resulta da conjugação do mapa do auto-ocultamento e do mapa da sombra causada pelo relevo envolvente. Dever-se-á efectuar uma operação condicional para cada pixel, em que, se em pelo menos um dos mapas o pixel estiver à sombra, então o pixel está à sombra: *sombra:=iff(sombra1=1 or sombra2=1,1,0)* (fig. 5).

3. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A validação da metodologia apresentada fez-se através da construção automática de perfis topográficos com a direcção do azimute do Sol, nos quais se identificaram as áreas de sombra. O perfil foi então exportado para um *software* de desenho, onde se fez a projecção de sucessivas linhas inclinadas segundo a altura do Sol, identificando assim

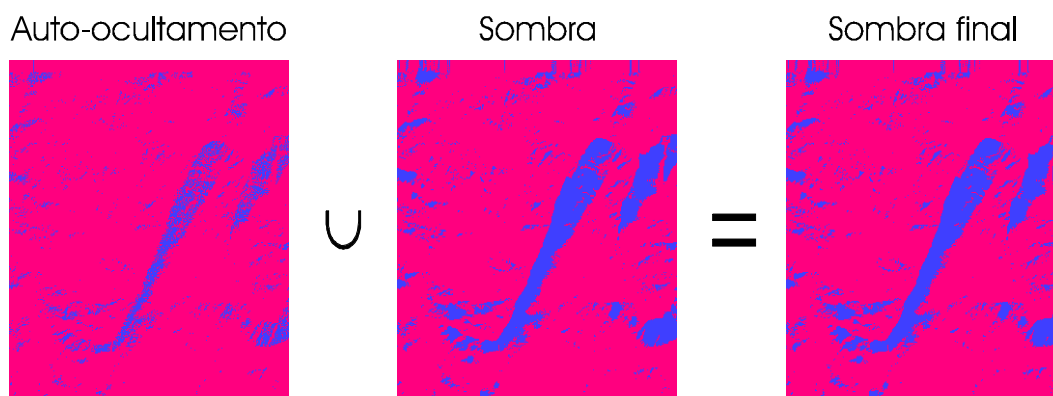


Figura 5 - Reunião dos mapas do auto-ocultamento (ver fig. 1) e sombra (ver fig. 4) para obtenção do modelo de sombra final.

graficamente as áreas de sombra (figura 6). A observação em pormenor de sectores do perfil com características topográficas distintas permitiu verificar que a modelização apresenta resultados muito satisfatórios nos sectores em que o declive da vertente é diferente do da altura do Sol (figura 6 - A e C), e que os erros surgem apenas nos sectores em que os raios solares atingem a vertente de uma forma quase tangencial (fig. 6 - B). Ainda assim, neste último caso, os erros são pouco significativos, pelo que se considera a metodologia apresentada como válida.

4. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Angel Felicísimo pela ajuda no esclarecimento de algumas questões relacionadas com o cálculo do efeito de sombra e aos Drs. Henrique Andrade e Carla Mora pelas discussões sobre o assunto, que contribuíram para o melhoramento do modelo.

Este trabalho enquadra-se no projecto *Processos geomorfológicos e biofísicos e unidades de paisagem em ambiente de montanha mediterrânea. Aplicação à serra da Estrela (ESTRELA)*, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (Praxis/C/CTE/11153 /1998).

5. BIBLIOGRAFIA

Budde, P.; Broekema, L.; Dost, R.; van Duren, I e Eelderink, L. (1997) - *ILWIS 2.1 for Windows, Reference Guide*, ILWIS Department, ITC, Enschede, 616 pp. + apêndices.

Felicísimo, A. M. (1994) - *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*, Pentalfa, Oviedo, 220 pp.

Meijerink, A. M. J.; de Brouwer, H. A. M.; Mannaerts, C. M. e Valenzuela, C. R. (1994) - *Introduction to the Use of Geographic Information Systems for Practical Hydrology*, ITC Publ. Nr. 23, Enschede, 243 pp.

Oke, T. R. (1995) - *Boundary Layer Climates*, Routledge, Londres e Nova Iorque, 435 pp.

Van Westen, C. e Farifteh, J. (1997) - *ILWIS 2.1 for Windows, Users Guide*, ILWIS Department, ITC, Enschede, 511 pp. + anexos

Van Westen, Saldaña López, A.; Uría Cornejo, P.; Chávez Ardanza, G. (1997) - *ILWIS 2.1 for Windows, Applications Guide*, ILWIS Department, ITC, Enschede, 352 pp.

Vieira, G. T. (1995) - *Processos morfogenéticos recentes e actuais na Serra do Gerês*,
Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ambiente apresentada à Faculdade de
Letras da Universidade de Lisboa, 139 pp. + anexos, não publicada.

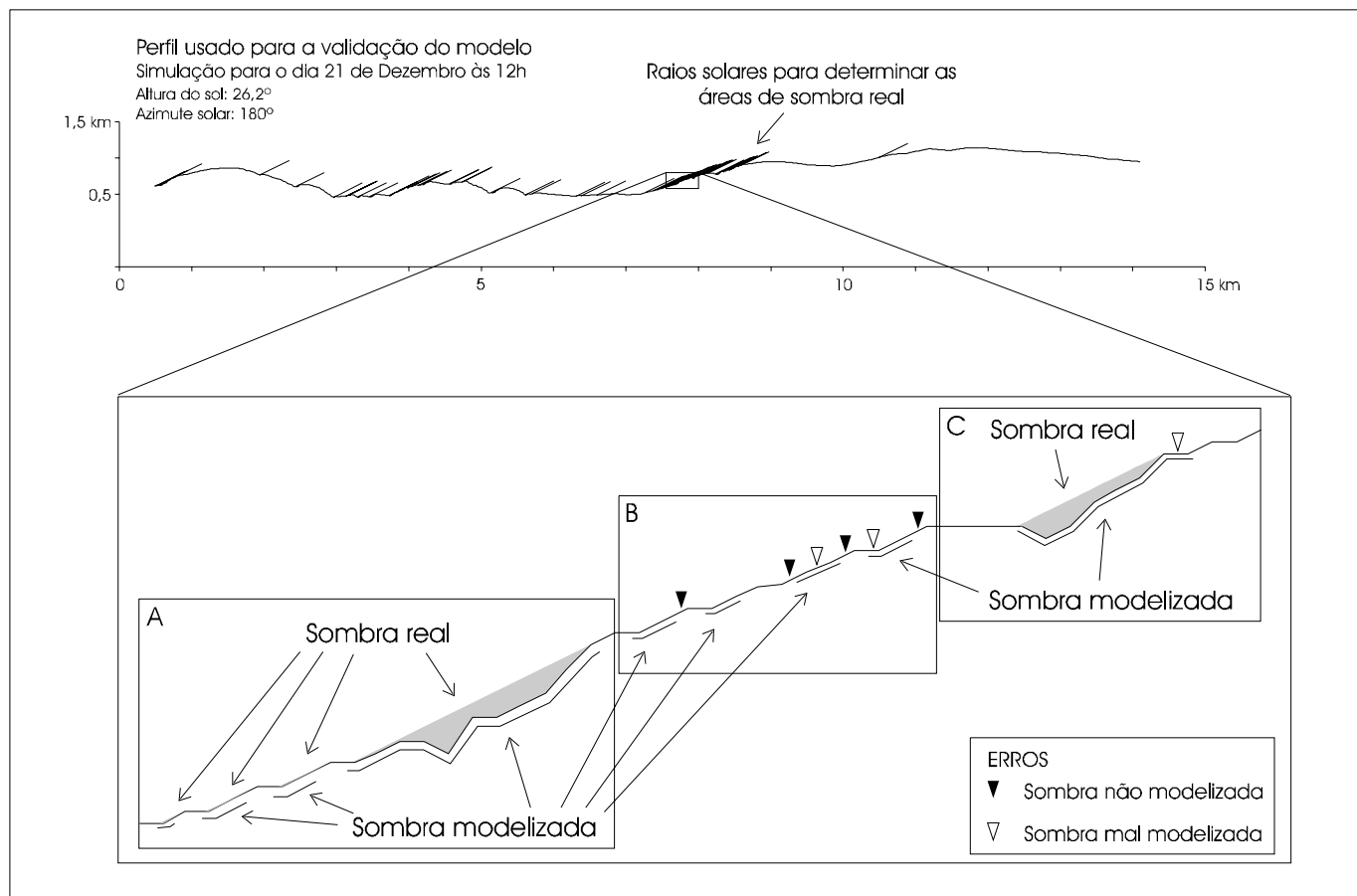


Figura 6 - Validação do modelo de cálculo do efeito de sombra utilizando um perfil topográfico paralelo aos raios solares onde são projectadas as geometricamente as áreas à sombra.