

## Tutorial do pacote Agriwater para modelagem espacial da evapotranspiração no software R



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Territorial  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

## **DOCUMENTOS 130**

# Tutorial do pacote Agriwater para modelagem espacial da evapotranspiração no software R

*Janice Freitas Leivas  
César de Oliveira Ferreira Silva  
Rodrigo Lilla Manzione  
Antônio Heriberto de Castro Teixeira*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Territorial**  
Av. Soldado Passarinho, nº 303  
Fazenda Chapadão  
13070-115, Campinas, SP  
Fone: (19) 3211.6200  
www.embrapa.br/territorial  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações  
da Embrapa Territorial

Presidente  
*Lúciola Alves Magalhães*

Secretário-Executivo  
*André Luiz dos Santos Furtado*

Membros  
*Bibiana Teixeira de Almeida, Carlos Alberto de Carvalho, Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues, José Dilcio Rocha, Suzi Carneiro, Vera Viana dos Santos Brandão, Ângelo Mansur Mendes, Carlos Fernando Quartaroli, Marcelo Fernando Fonseca e Paulo Augusto Vianna Barroso*

Supervisão editorial  
*Suzi Carneiro e Bibiana Teixeira de Almeida*

Revisão de texto  
*Bibiana Teixeira de Almeida*

Normalização bibliográfica  
*Vera Viana dos Santos Brandão*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica e tratamento das ilustrações  
*Suzi Carneiro*

Ilustração da capa  
*Suzi Carneiro (com imagem de Adobe Stock )*

**1ª edição**

1ª impressão (2019): versão on-line

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Territorial

---

Tutorial do pacote Agriwater para modelagem espacial da evapotranspiração no software R / Janice Freitas Leivas... [et al.]. – Campinas: Embrapa Territorial, 2019.  
49 p.: il. ; (Documentos / Embrapa Territorial, ISSN 0103-7811; 130).

1. Agrometeorologia. 2. Satélites. 3. Sensoriamento remoto. 4. Software livre. I. Leivas, Janice Freitas. II. Silva, César de Oliveira Ferreira. III. Manzione, Rodrigo Lilla. IV. Teixeira, Antônio Heriberto de Castro. V. Título. VI. Série.

---

CDD 621.3678

© Embrapa, 2019

## Autores

### **Janice Freitas Leivas**

Meteorologista, doutora em Agrometeorologia, pesquisadora da Embrapa Territorial, Campinas, SP

### **César de Oliveira Ferreira Silva**

Engenheiro-ambiental, mestre em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP

### **Rodrigo Lilla Manzione**

agrônomo, doutor em Sensoriamento Remoto, professor da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Tupã, SP

### **Antônio Heriberto de Castro Teixeira**

agrônomo, doutor em Ciências Ambientais, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE



## Sumário

1. Introdução.....	9
2. Pacote Agriwater do R.....	10
2.1 As funções do pacote .....	10
2.2 Os resultados do pacote .....	12
2.3 Instalação do pacote Agriwater .....	12
2.4 Pré-processamento das imagens no QGIS.....	13
2.5 Preparação dos dados agrometeorológicos.....	14
3. Aplicação usando imagens Sentinel-2 no Semiárido brasileiro.....	17
3.1 Interpolação dos dados agrometeorológicos .....	18
3.2 Executando o Agriwater .....	22
4. Aplicação usando imagens Modis no afloramento do Aquífero Guarani no estado de São Paulo .....	27
4.1. Interpolação dos dados agrometeorológicos .....	28
4.2. Executando o Agriwater .....	32
5. Aplicação usando imagens Landsat-8 em área paulista de Cerrado .....	36
5.1. Gerando reflectâncias do Landsat-8 usando o Agriwater .....	37
5.2. Executando o Agriwater .....	42
6. Aprimoramentos, acompanhamento de novas versões e estudos futuros.....	46
7. Considerações finais .....	48
8. Agradecimentos.....	48
9. Referências .....	48



## 1. Introdução

A utilização de geotecnologias no planejamento agrícola é necessária para a transição da abordagem tradicional, feita com base em medições pontuais e manejo por tabelamentos simplificados, para a irrigação de precisão, definida como um gerenciamento da irrigação que considera as condições edafoclimáticas e hídricas locais em tempo quase real, com subsídios remotos, para tornar a irrigação de culturas sustentável, com potencial para aumentar a produtividade e reduzir o impacto ambiental da agricultura irrigada. Para dar conta dessa complexidade, busca-se o conhecimento aprofundado e preciso dos requisitos de água da cultura e do ambiente cultivado. Estratégias inovadoras de manejo de irrigação encorajam o desenvolvimento de novos métodos para monitorar os componentes do balanço hídrico.

O sensoriamento remoto é reconhecido como o meio mais viável para obter informações regionais de evapotranspiração e uso da água na agricultura. Dados de sensoriamento remoto, especialmente os de satélites em órbita polar, fornecem informações sobre superfícies vegetadas, úteis para medidas regionais e monitoramento de variáveis biofísicas que afetam os fluxos de água e energia no solo, como albedo, tipo de biomassa e índice de área foliar (IAF), com resolução espacial e temporal adequadas. Em geral, modelos de evapotranspiração por meio de sensoriamento remoto envolvem equações empíricas, de balanço de energia e índices de vegetação. Equações empíricas são geradas do cruzamento de dados radiométricos com medições em campo da variável que se deseja modelar. São necessárias validações que comprovem a representatividade dessas equações, por exemplo, avaliando a sua precisão em diferentes microclimas e regiões, para restringir seu uso para ambientes em que sejam preditores suficientemente eficientes.

O Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (Safer), elaborado por Teixeira (2010), é um modelo que envolve o albedo da superfície ( $\alpha_0$ ), a temperatura da superfície (TS) e o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) como parâmetros obtidos por meio da associação de dados de sensoriamento remoto com dados climáticos provenientes de estações agrometeorológicas, e pode ser aplicado em áreas com variados usos da terra. Apesar de o algoritmo ter sido inicialmente aplicado e validado nas condições semiáridas do Nordeste brasileiro, o uso das equações originais foi aplicado e validado em outros agroecossistemas fortemente contrastantes e sob diferentes condições termo-hidrológicas ao longo de vários anos. A formulação matemática completa dos componentes desse algoritmo foi apresentada por Silva et al. (2019a), com uma apresentação detalhada da evolução desse algoritmo e de suas aplicações em diferentes agroecossistemas e biomas, como Pantanal (Teixeira et al., 2015), Rio Grande do Sul (Leivas et al., 2015), Semiárido nordestino (Teixeira, 2010, Teixeira et al., 2017) e outras localidades de São Paulo (Hernandez et al., 2014; Teixeira et al., 2014).

Nesse sentido, este trabalho apresenta: 1) o pacote Agriwater em ambiente R, implementado para automatizar a utilização de imagens Sentinel-2, Landsat-8 e sensor Modis com o algoritmo Safer, e 2) a primeira aplicação do Safer a imagens Sentinel-2, em uma área do Semiárido nordestino, a imagens Modis, na região do afloramento do Aquífero Guarani no estado de São Paulo, e a imagens Landsat-8 na região central do estado de São Paulo. Também é apresentado um procedimento de conversão de imagens do satélite Sentinel-2 no software QGIS, para adequar os arquivos ao formato pedido pelo pacote Agriwater, que pode ser aplicado aos outros sensores. O enfoque do presente trabalho é a apresentação de um passo a passo compreensível sobre o uso do pacote Agriwater. Uma discussão aprofundada dos resultados obtidos pela modelagem da primeira aplicação está disponível em Silva et al. (2019a), da segunda aplicação, em Silva et al. (2018) e da terceira aplicação, em Silva et al. (2019b).



## 2. Pacote Agriwater do R

O R ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)) é um ambiente de programação de código aberto que está ganhando uso rapidamente em muitas áreas de estudo. É uma linguagem interpretada que oferece excelentes recursos de análise interativa e é ideal para o rápido desenvolvimento de aplicativos estatísticos e de análise de dados. Sua linguagem nativa permite o desenvolvimento de novos algoritmos a partir de uma ampla variedade de funções matemáticas, estatísticas e gráficas, recursos de entrada e saída e operadores para vetores e matrizes. Além das operações básicas, o R pode ser estendido com a instalação de pacotes desenvolvidos por usuários do software. Uma das principais vantagens do R para o projeto Agriwater é que ele é gratuito e de código aberto. É muito robusto e funciona em uma ampla gama de plataformas, incluindo Microsoft Windows, Apple OS X e Linux.

O download do software é feito por meio do repositório CRAN (<https://cran.r-project.org/>), no qual está alocado o pacote Agriwater. A Figura 1 mostra a tela do repositório CRAN na qual se escolhe o instalador do R de acordo com o sistema operacional utilizado pelo usuário.

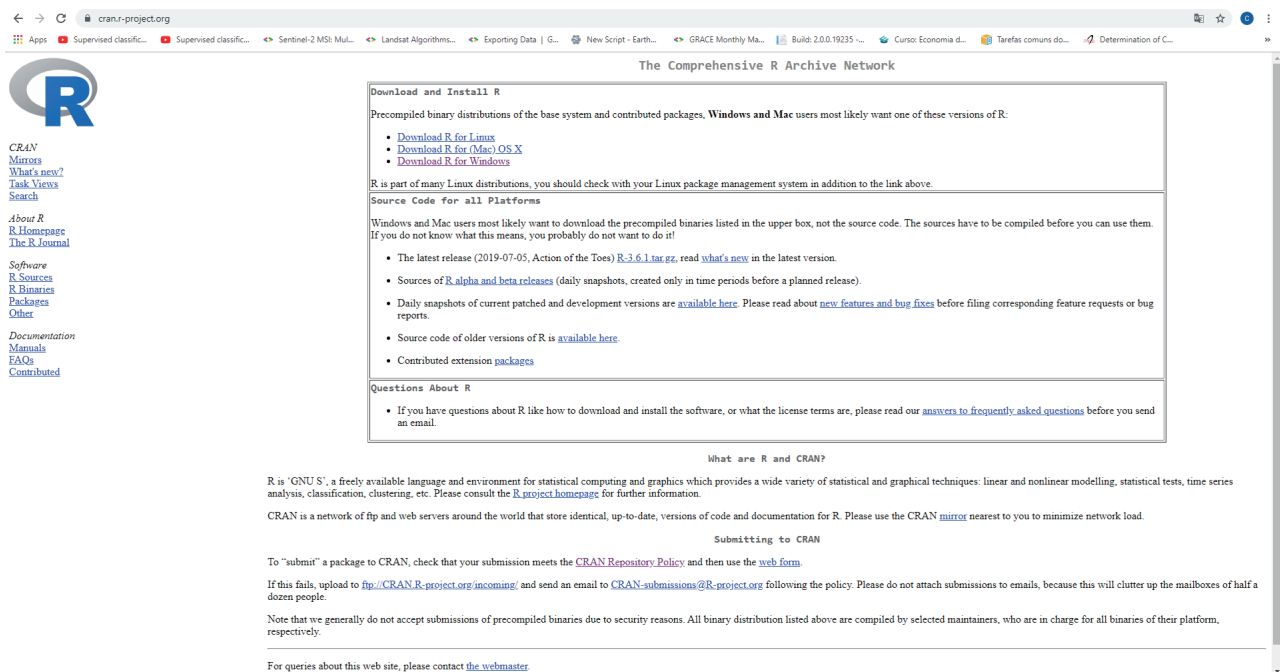
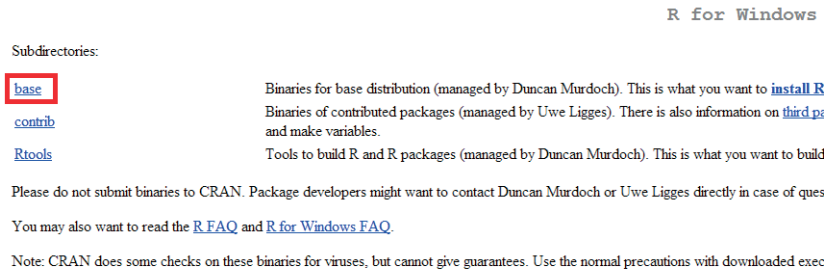


Figura 1. Tela do repositório CRAN.

Após escolher o sistema operacional, neste exemplo a plataforma Windows, o usuário é redirecionado para a tela mostrada na Figura 2 e deve escolher a opção base destacada (na Figura 2), para fazer o download da versão mais recente do programa.

### 2.1 As funções do pacote

O pacote Agriwater foi estruturado e planejado para agregar as melhores práticas descritas pelos pesquisadores que desenvolveram estudos usando o modelo Safer. Os dados de entrada são uma “máscara” (um arquivo *shapfile* da área de estudo), conjuntos de dados de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), radiação global ( $R_G$ ) e temperatura média do ar ( $T_A$ ) e refletâncias de satélites Sentinel-2 ou Modis ou números digitais do Landsat- 8.



**Figura 2.** Tela do repositório CRAN para download do instalador do R.

Para entender o funcionamento do pacote, é necessário fazer três perguntas iniciais:

- Qual satélite utilizarei?
- Se usar Landsat-8, utilizarei as bandas térmicas ou não?
- Utilizarei uma única estação ou mais de uma estação agrometeorológica?

Respondendo essas perguntas, o usuário encontra a função certa para a sua situação.

A Tabela 1 mostra todas as funções disponíveis no pacote. Se houver apenas uma estação agrometeorológica, deve-se escolher uma das funções da primeira coluna. Se houver uma rede de estações, as funções da segunda coluna serão usadas. Na terceira coluna estão as funções secundárias, que auxiliam os pesquisadores que desejam apenas o albedo da superfície ou as refletâncias do Landsat-8. Existem funções adaptadas para cada satélite.

**Tabela 1.** Funções disponíveis no pacote Agriwater para balanço de energia no solo e modelagem da evapotranspiração real<sup>(1)</sup>.

Funções para dados agrometeorológicos de valor único	Funções para <i>grids</i> interpolados de dados agrometeorológicos	Funções que utilizam apenas dados das imagens do satélite
evapo_s2(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	evapo_s2_grid(doy, e, f)	albedo_s2()
evapo_l8(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	evapo_l8_grid(doy, e, f)	albedo_l8()
evapo_l8t(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	evapo_l8t_grid(doy, e, f)	albedo_modis()
evapo_modis(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	evapo_modis_grid(doy, e, f)	reflectance_l8(doy)
kc_s2(doy, $R_G$ , $T_A$ , e, f)	kc_s2_grid(doy, e, f)	
kc_l8(doy, $R_G$ , $T_A$ , e, f)	kc_l8_grid(doy, e, f)	
kc_l8t(doy, $R_G$ , $T_A$ , e, f)	kc_l8t_grid(doy, e, f)	
kc_modis(doy, $R_G$ , $T_A$ , e, f)	kc_modis_grid(doy, e, f)	
radiation_s2(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	radiation_s2_grid(doy, e, f)	
radiation_l8(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	radiation_l8_grid(doy, e, f)	
radiation_l8t(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	radiation_l8t_grid(doy, e, f)	
radiation_modis(doy, $R_G$ , $T_A$ , $ET_{OT}$ , e, f)	radiation_modis_grid(doy, e, f)	

<sup>(1)</sup> "s2" no nome da função indica o uso imagens de satélites Sentinel-2; "l8" indica o uso de Landsat-8; "l8t", o uso de Landsat-8 incluindo bandas térmicas; e "modis", o uso de Modis.

Funções que têm "s2" no nome usam imagens do satélite Sentinel-2; "l8" indica o uso do Landsat-8; "l8t", o uso do Landsat-8 incluindo bandas térmicas; e "modis", o uso do Modis. Não foram criadas funções para o uso das faixas térmicas Modis e Sentinel-2, pois elas apresentam resolução espacial de 1 km, o que aumentaria excessivamente a incerteza da modelagem com 250 m e 10 m, respectivamente. Os

$$ET_r = \frac{ET_A}{ET_o} = \exp \left[ e + f \left( \frac{T_s}{\alpha_0 \cdot NDVI} \right) \right] \quad (1)$$

coeficientes  $e$  e  $f$  da Equação 1 estão no argumento da função para permitir a calibração da equação para novas áreas de estudo que não têm bons resultados com as calibrações existentes.

Quando há apenas uma estação meteorológica na área de estudo no dia da passagem do satélite, esse valor é colocado diretamente no argumento da função (o argumento são os valores que devem ser inseridos entre parênteses após o nome da função). Quando há uma rede de estações, a interpolação espacial desses valores deve ser executada dentro da área de estudo e devem ser gerados arquivos com nomes iguais aos do argumento de funções de valor único (RG.tif, Ta.tif, ET0.tif). Esses arquivos *raster* devem estar em coordenadas geográficas projetadas em grau decimal. O DOY (dia juliano ou dia do ano) é necessário para calcular a irradiação solar máxima no dia da passagem do satélite (que rege o cálculo da transmissividade da atmosfera de ondas curtas), por isso as imagens digitais devem estar projetadas em coordenadas em graus decimais. Esta verificação não foi incluída no pacote, pois as funções de conversão disponíveis ainda são pesadas para imagens de alta e média resolução e podem ser executadas em qualquer sistema de informações geográficas (SIG).

As funções iniciadas com "kc" caracterizam a modelagem da fração evapotranspirativa (equivalente ao  $K_c$ , coeficiente de cultivo, em áreas irrigadas) na área de estudo, de modo que não requerem  $ET_o$ . As funções iniciadas com "evapo" caracterizam a evapotranspiração real e, portanto, exigem  $ET_o$  como dado de entrada. As funções iniciadas com "radiation" realizam o estudo de todo o balanço energético. Cabe destacar que algumas funções incluem outras, mas elas são independentes; em outras palavras, o estudo do balanço de energia feito pelas funções de "radiation" não requer que o usuário execute uma função "evapo" antes. Assim, o usuário escolhe qual função usar de acordo com os dados disponíveis. Na Tabela 2 são descritas as funções disponíveis no pacote e informados quais serão os arquivos *raster* gerados.

## 2.2 Os resultados do pacote

Após executar uma função, arquivos raster serão gerados na pasta de trabalho. Esses arquivos são descritos na Tabela 3.

## 2.3 Instalação do pacote Agriwater

A instalação do pacote é feita uma única vez usando o código:

```
install.packages("agriwater")
```

O R pede para baixar ou atualizar outros pacotes necessários para executar o Agriwater. Deve-se aceitar todos. Para habilitar o pacote durante uma sessão do R, usa-se a função:

```
library(agriwater)
```

Porém, para que o pacote funcione, três outros pacotes precisam ser chamados.

```
library(sp)
```

**Tabela 2.** Breve descrição, dados de entrada e saída de cada função disponíveis no pacote Agriwater para balanço de energia no solo e modelagem da evapotranspiração real<sup>(1)</sup>.

Função	Breve descrição	Dados de entrada	Nome dos arquivos raster gerados
kc_s2 kc_l8 kc_l8t kc_modis	Modelagem da fração evapotranspirativa ( $ET_A$ , $ET_0^{-1}$ )	Temperatura média do ar, radiação solar de uma única estação agrometeorológica e imagens digitais	Alb_24.tif, NDVI.tif, LST.tif, Rn_MJ and kc.tif
evapo_s2 evapo_l8 evapo_l8t evapo_modis	Modelagem da evapotranspiração ( $ET_A$ )	Temperatura média do ar, radiação solar e evapotranspiração de referência de uma única estação agrometeorológica e imagens digitais	Alb_24.tif, NDVI.tif, LST.tif, Rn_MJ, kc.tif and evapo.tif
radiation_s2 radiation_l8 radiation_l8t radiation_modis	Modelagem dos componentes do balanço de energia no solo	Imagens digitais	Alb_24.tif, NDVI.tif, LST.tif, Rn_MJ, kc.tif, evapo.tif, LE_MJ.tif, H_MJ.tif and G_MJ.tif
albedo_s2 albedo_l8 albedo_modis	Modelagem do albedo superficial	Imagens digitais	Alb_24.tif
kc_s2_grid kc_l8_grid kc_l8t_grid kc_modis_grid	Modelagem da fração evapotranspirativa ( $ET_A$ , $ET_0^{-1}$ )	Temperatura média do ar e radiação solar de um <i>grid</i> interpolado de várias estações agrometeorológicas e imagens digitais	Alb_24.tif, NDVI.tif, LST.tif, Rn_MJ and kc.tif
evapo_s2_grid evapo_l8_grid evapo_l8t_grid evapo_modis_grid	Modelagem da evapotranspiração ( $ET_A$ )	Temperatura média do ar e radiação solar e evapotranspiração de referência de um <i>grid</i> interpolado de várias estações agrometeorológicas e imagens digitais	Alb_24.tif, NDVI.tif, LST.tif, Rn_MJ, kc.tif and evapo.tif
radiation_s2_grid radiation_l8_grid radiation_l8t_grid radiation_modis_grid	Modelagem dos componentes do balanço de energia no solo	Imagens digitais	Alb_24.tif, NDVI.tif, LST.tif, Rn_MJ, kc.tif, evapo.tif, LE_MJ.tif, H_MJ.tif and G_MJ.tif

<sup>(1)</sup> "s2" no nome da função indica o uso imagens de satélites Sentinel-2; "l8" indica o uso de Landsat-8; "l8t", o uso de Landsat-8 incluindo bandas térmicas; e "modis", o uso de Modis.

```
library(raster)
```

```
library(rgdal)
```

Na primeira vez que o Agriwater for executado, é necessário instalar esses pacotes auxiliares, porém essa instalação é feita uma única vez.

```
install.packages("sp")
```

```
install.packages("raster")
```

```
install.packages("rgdal")
```

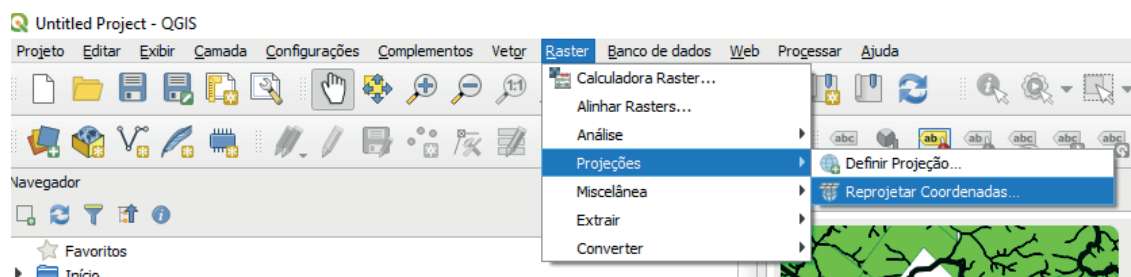
Essa etapa é comum às três aplicações que são feitas a seguir.

## 2.4 Pré-processamento das imagens no QGIS

Usualmente as bandas do Sentinel-2 são disponibilizadas em formato jp2 e em coordenadas UTM. Por isso, é necessário convertê-las previamente, em um software como o QGIS, utilizando a função "Reprojetar coordenadas..." do menu "Raster" (Figura 3).

**Tabela 3.** Descrição dos arquivos *raster* de saída do pacote Agriwater.

Nome dos arquivos <i>raster</i> gerados	Descrição
Alb_24.tif	Albedo superficial em escala diária
NDVI.tif	<i>Normalized difference vegetation index</i>
LST.tif	Temperatura da superfície na escala diária, em Kelvin
reflectance.tif	Reflectância de cada banda do Landsat-8
Rn_MJ	Saldo de radiação em escala diária, em MJ/m <sup>2</sup> /dia <sup>1</sup>
kc.tif	Modelagem da fração evapotranspirativa ( $ET_A ET_0^{-1}$ ) em escala diária
evapo.tif	Evapotranspiração real ( $ET_A$ ) na escala de 24h, em mm/dia <sup>1</sup>
LE_MJ.tif	Fluxo de calor latente na escala diária, em MJ/m <sup>2</sup> /dia <sup>1</sup>
H_MJ	Fluxo de calor sensível na escala diária, em MJ/m <sup>2</sup> /dia <sup>1</sup>
G_MJ.tif	Fluxo de calor no solo na escala diária, em MJ/m <sup>2</sup> /dia <sup>1</sup>

**Figura 3.** Função "Reprojetar coordenadas..." do menu "Raster".

Essa função é capaz de reprojetar a banda e convertê-la em outro formato, assim como gerar uma camada temporária que pode ser salva posteriormente. A Figura 4 exibe a tela da função e o menu para escolher o diretório no qual será salva a imagem reprojetada, que deve estar na extensão tif, de acordo com o estabelecido pela Tabela 4.

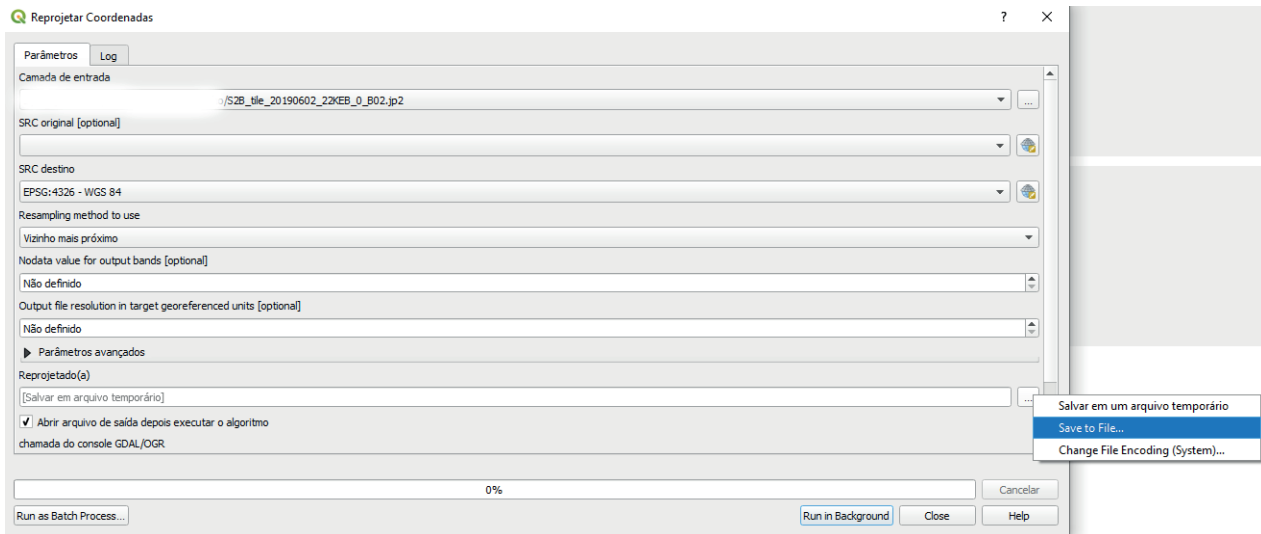
Por fim, clica-se em "Run in Background", para executar a função (Figura 5).

Esse procedimento, feito usando imagens Sentinel-2, pode ser reproduzido para conversão e pré-processamento de imagens de satélite como Landsat-8 e Modis.

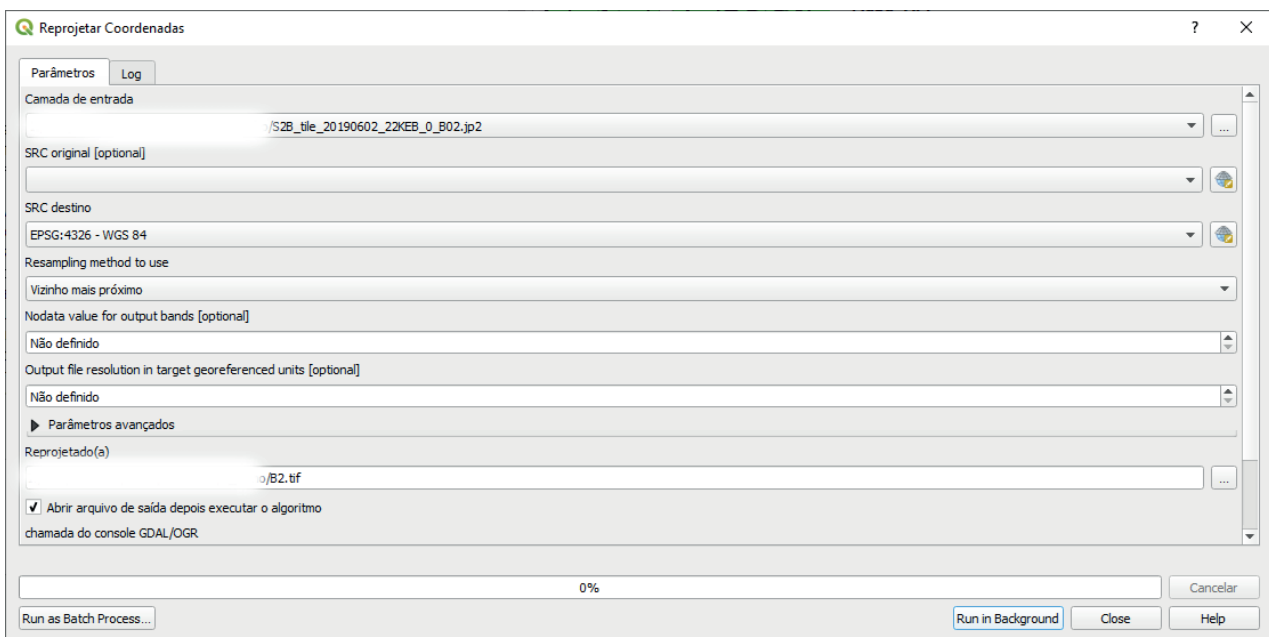
## 2.5 Preparação dos dados agrometeorológicos

Às imagens de satélite devem ser agregados dados medidos de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), radiação solar global ( $R_G$ ) e temperatura média do ar ( $T_A$ ).

A evapotranspiração é a água transferida do solo para a atmosfera pela transpiração da planta. A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) ocorre especificamente em uma extensa superfície vegetada com vegetação rasteira (normalmente gramado), em crescimento ativo, que cobre totalmente o solo, com altura entre 8 cm e 15 cm ( $IAF \approx 3$ ), sem restrição hídrica e com ampla área de bordadura, para evitar a advecção de calor sensível ( $H$ ) de áreas adjacentes (Allen et al., 1998). Nesse caso a evapotranspiração depende apenas das variáveis meteorológicas, portanto  $ET_0$  é uma variável



**Figura 4.** Um arquivo jp2 de uma banda do Sentinel-2 pode ser reprojetado e convertido em formato tif.



**Figura 5.** Após escolher um nome para o arquivo tif, clica-se em "Run in Background", para executar a reprojeção de coordenadas para WGS84 e a conversão simultânea em formato tif.

meteorológica que expressa o potencial de evapotranspiração para as condições atmosféricas vigentes. O modelo padrão recomendado pela FAO (Allen et al., 1998) é a equação de Penman-Monteith, e o ASCE (Allen et al., 2005) é uma simplificação de Penman-Monteith.

A radiação solar global é o total de energia radiante emitida pelo Sol que atinge a superfície terrestre. É a principal fonte de energia para o solo, e é particionado em calor sensível (H), no interior da superfície (G) e em calor latente ( $\lambda E$ ), que é o termo quantificado em energia (Joules) para a evapotranspiração (Allen et al., 1998).

Essas variáveis, mais a temperatura média do ar, devem ser informadas como dados de entrada na modelagem com o pacote Agriwater. Em áreas pequenas, elas podem ser oriundas de uma fonte única, mas para estudos regionais é necessária uma rede de estações com suas localizações espaciais, para que possam ser feitas interpolações espaciais, como será mostrado nas aplicações, a seguir.

A evapotranspiração de referência deve ser informada em milímetros de água (mm), a temperatura média do ar, em °C, e a radiação solar global, em MJ/m<sup>2</sup>, todos em escala diária. Não há especificações de nomes para as colunas da planilha utilizada na interpolação com redes de estações. É necessário apenas atentar ao código, para que as colunas utilizadas em cada interpolação estejam corretas. As aplicações apresentadas com redes de estações exemplificam a codificação para fazer essa interpolação e a planilha utilizada pode servir de modelo para aplicações futuras. A Figura 6 exibe a tela de uma planilha de exemplo, na qual: a coluna "Lat" indica a latitude, em graus decimais; a coluna "Long" indica a longitude, em graus decimais; a coluna ET0 indica a evapotranspiração de referência, em mm/dia; a coluna RG indica a radiação solar global, em MJ/m<sup>2</sup>/dia; e a coluna Ta indica a temperatura média do ar, em °C/dia.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Lat	Long	Ta	RG	ET0		
2	-21.13	-48.84	26.61	26.42	5.84		
3	-23.1	-48.95	25.09	23.17	5.33		
4	-22.47	-48.56	26.91	27.36	6.17		
5	-24.96	-48.42	23.34	18.92	3.83		
6	-20.56	-48.55	26.88	27.64	5.84		
7	-22.36	-49.03	26.32	23.21	5.11		
8	-21.78	-47.08	26.28	18.87	4.65		
9	-20.58	-47.38	24.98	29.22	5.1		
10	-21.86	-48.8	26.88	29.39	6.33		
11	-23.98	-48.89	24.49	25.12	5.21		
12	-22.42	-46.81	26.8	25.77	5.53		
13	-20.36	-47.78	25.91	25.93	5.6		
14	-20.17	-50.6	27.14	26.61	6.11		
15	-21.1	-49.92	27.16	26.79	6.45		
16	-21.67	-49.73	27.3	25.55	5.65		
17	-22.95	-49.89	26.07	26.44	5.42		

Figura 6. Tela de planilha com dados de rede de estações agrometeorológicas.

### 3. Aplicação usando imagens Sentinel-2 no Semiárido brasileiro

Para esse primeiro exemplo são utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 do dia 13 de maio de 2016, o 134º dia daquele ano. Essas imagens estão disponibilizadas no Google Drive (pasta com imagens, dados meteorológicos e arquivos *shapefile* editados de acordo com a Tabela 4, disponível no endereço [https://drive.google.com/open?id=14E1wHNLxG7\\_Dh4I-GqNYakj8YJDgKLzk](https://drive.google.com/open?id=14E1wHNLxG7_Dh4I-GqNYakj8YJDgKLzk)), para que as funções exemplificadas a seguir sejam reproduzidas localmente pelos usuários do pacote Agriwater.

A Tabela 4 mostra como devem estar os arquivos para funções com imagens Sentinel-2.

**Tabela 4.** Especificações dos arquivos para uso de imagens Sentinel-2 no pacote Agriwater do R.

Nome dos arquivos raster gerados	Descrição	Aplicação
B2.tif	Banda do azul	
B3.tif	<i>Banda do verde</i>	
B4.tif	Banda do vermelho	Funções para estação meteorológica única ou <i>grid</i>
B8.tif	Banda do infravermelho próximo	
Ta.tif	Interpolação da temperatura média do ar (°C/dia)	
ET0.tif	Interpolação da evapotranspiração de referência (mm/dia)	Funções para um <i>grid</i> de estações meteorológicas
RG.tif	Interpolação da radiação solar global (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	
mask.shp	Limites da área de estudo em coordenadas, em grau decimal	Ambas as anteriores

Os arquivos devem ser descompactados em uma pasta, e seu caminho completo deve ser adicionado na função abaixo, a ser executada no R:

```
setwd('D:/pasta')
```

Essa função informa o R que essa é a pasta de trabalho atual. Assim, cada vez que o usuário pedir para importar um arquivo, se ele estiver nessa pasta, basta informar o nome do arquivo, sem precisar escrever o endereço inteiro. Caso ocorra erro, deve-se experimentar mudar o “sentido” da barra, e colocar / ou \ (a barra / utiliza a orientação Unix, e as barras \ utilizam a orientação Windows para a especificação de “paths”).

De acordo com Paim (2017), é recomendada como boa prática, ao se iniciar uma sessão de trabalho no R, liberar a memória de possíveis objetos que ainda estejam alocados e que não serão utilizados. Essa liberação de memória é feita usando os códigos abaixo:

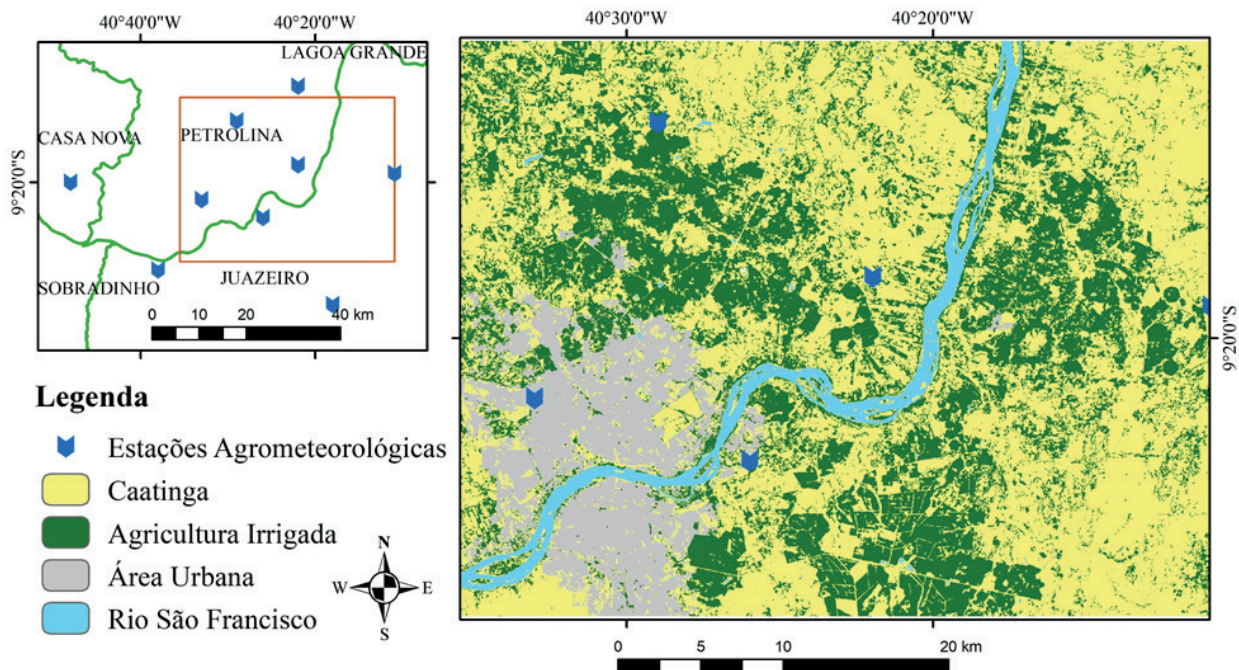
```
rm(list=ls())
ls()
character(0)
```

A função `ls()` lista todos os objetos que estão atualmente armazenados na memória de trabalho do R. A função `rm()` faz a remoção desses objetos da memória. A chamada `rm(list=ls())`, portanto, remove todos os objetos da memória.



### 3.1 Interpolação dos dados agrometeorológicos

A pasta de trabalho deve conter arquivos *raster* com o *grid* de dados agrometeorológicos, como mostra o exemplo das estações meteorológicas na Figura 7.



**Figura 7.** Localização da área de estudo e estações agrometeorológicas com uso da terra base de 2016.  
Fonte: Adaptado de MapBiomias (2019).

Os municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) pertencem ao polo de irrigação do Vale do Rio São Francisco, e têm como principais produtos agrícolas culturas permanentes (uva, goiaba, coco, mamão e pinha) e temporárias (melancia, milho e feijão) (Leivas et al., 2015). Nessa área, a vegetação predominante, assim como em toda a região semiárida da bacia do Submédio do Rio São Francisco, é a caatinga, a qual está sendo rapidamente substituída por fruteiras irrigadas. A produção de videiras e mangueiras sob irrigação altera os balanços de energia e de água se comparada às condições naturais, com tendência de aumento do consumo hídrico dessas culturas, provocando redução do fluxo do rio a jusante.

A “máscara” (arquivo *shapefile* com os limites da área de estudo) deve ser importada para o R usando a função `readOGR` (do pacote “*rgdal*”).

```
mask <- readOGR("mask.shp")
```

As imagens Sentinel-2 do dia juliano 134 de 2016 já estão em coordenadas geográficas (projeção WGS84).

A seguir, é importada a planilha com dados das estações agrometeorológicas:

```
data = read.table(file="data.csv", header=TRUE, sep=";")
data <- as.data.frame(data)
```

Foi criado um vetor com a função `c()` dentro de uma matriz com 14 linhas (pois são 14 estações) e 5 colunas nomeadas como Lat, Long, Ta, RG e ET0, respectivamente, informando a latitude,

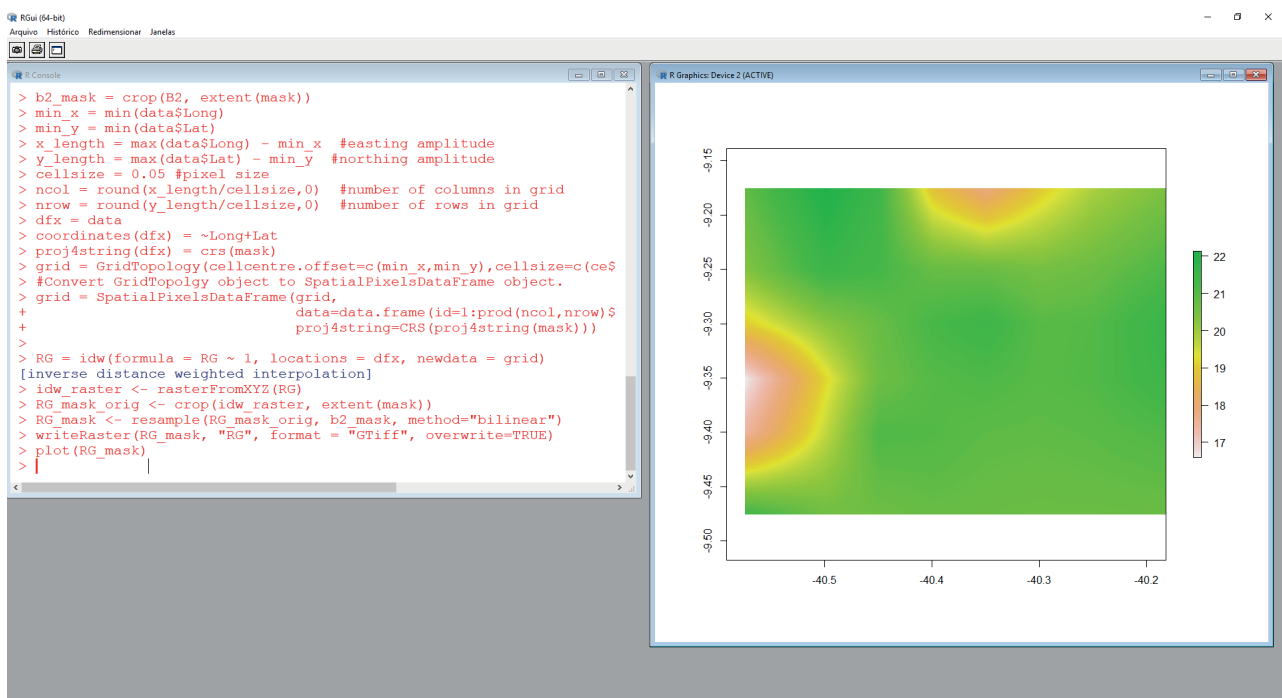


Aqui interpola-se a radiação solar global com IDW e gera-se o *raster* RG.tif:

```
RG = idw(formula = RG ~ 1, locations = dfx, newdata = grid)
idw_raster <- rasterFromXYZ(RG)
RG_mask_orig <- crop(idw_raster, extent(mask))
RG_mask <- resample(RG_mask_orig, b2_mask, method="bilinear")
writeRaster(RG_mask, "RG", format = "GTiff", overwrite=TRUE)
```

Para visualizar o resultado, executa-se a função `plot()` que resulta na tela da Figura 8.

```
plot(RG_mask)
```



**Figura 8.** Visualização da interpolação da radiação global (RG) feita usando a função `idw()` no R.

Aqui interpola-se a temperatura média do ar com IDW e gera-se o *raster* Ta.tif.

```
Ta = idw(formula = Ta ~ 1, locations = dfx, newdata = grid)
idw_raster <- rasterFromXYZ(Ta)
Ta_mask_orig <- crop(idw_raster, extent(mask))
Ta_mask <- resample(Ta_mask_orig, b2_mask, method="bilinear")
writeRaster(Ta_mask, "Ta", format = "GTiff", overwrite=TRUE)
```

Para visualizar o resultado, executa-se a função `plot()` que resulta na tela da Figura 9.

```
plot(Ta_mask)
```

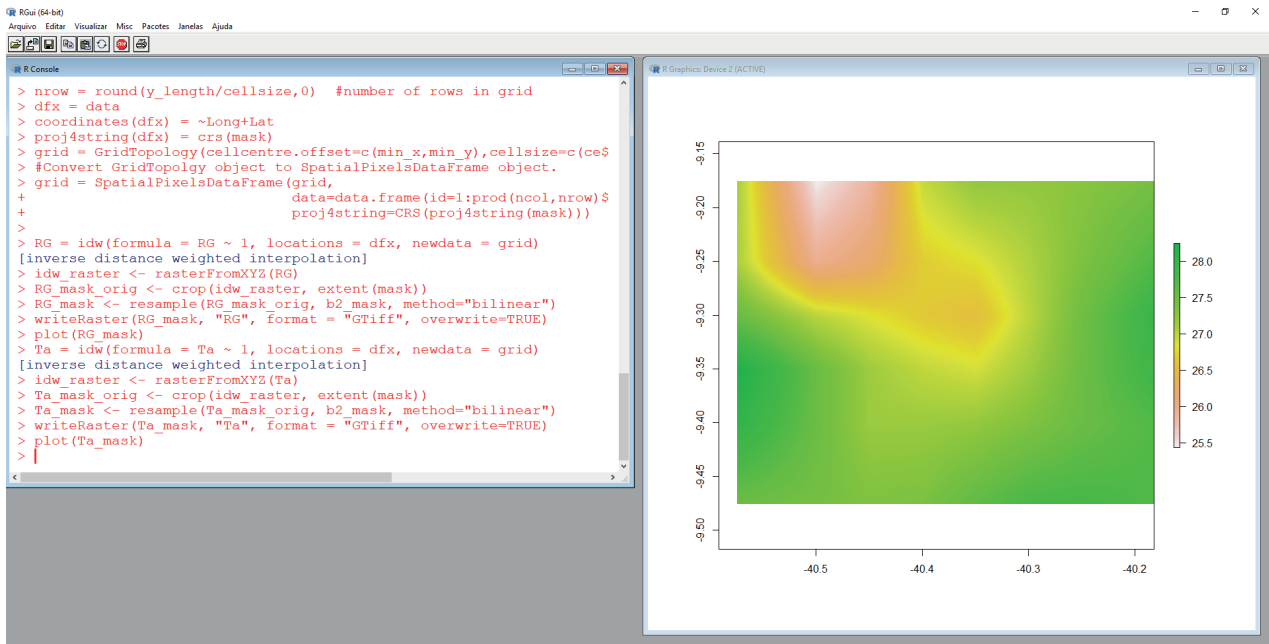


Figura 9. Visualização da interpolação da temperatura média do ar (Ta) feita com a função `idw()` no R.

Aqui interpola-se a evapotranspiração de referência com IDW e gera-se o raster `ET0.tif`.

```
ET0 = idw(formula = ET0 ~ 1, locations = dfx, newdata = grid)
```

```
idw_raster <- rasterFromXYZ(ET0)
```

```
ET0_mask_orig <- crop(idw_raster, extent(mask))
```

```
ET0_mask <- resample(ET0_mask_orig, b2_mask, method="bilinear")
```

```
writeRaster(ET0_mask, "ET0", format = "GTiff", overwrite=TRUE)
```

Para visualizar o resultado, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 10.

```
plot(ET0_mask)
```

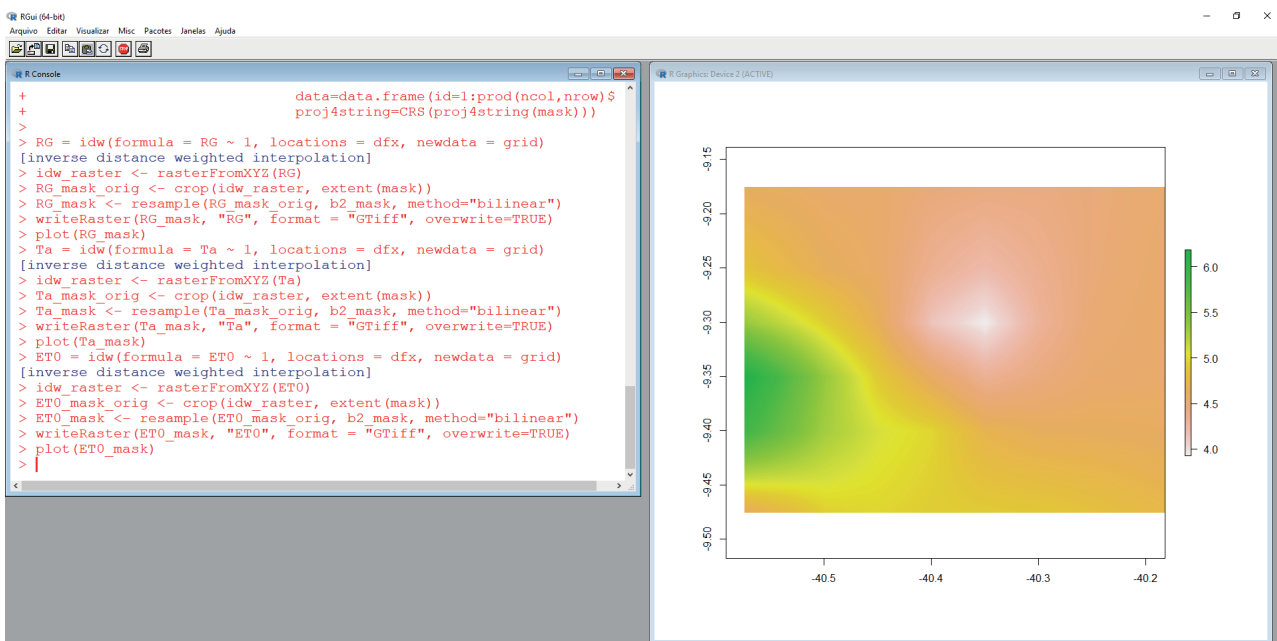


Figura 10. Visualização da interpolação da evapotranspiração de referência (ET0) feita com a função `idw()` no R.

### 3.2 Executando o Agriwater

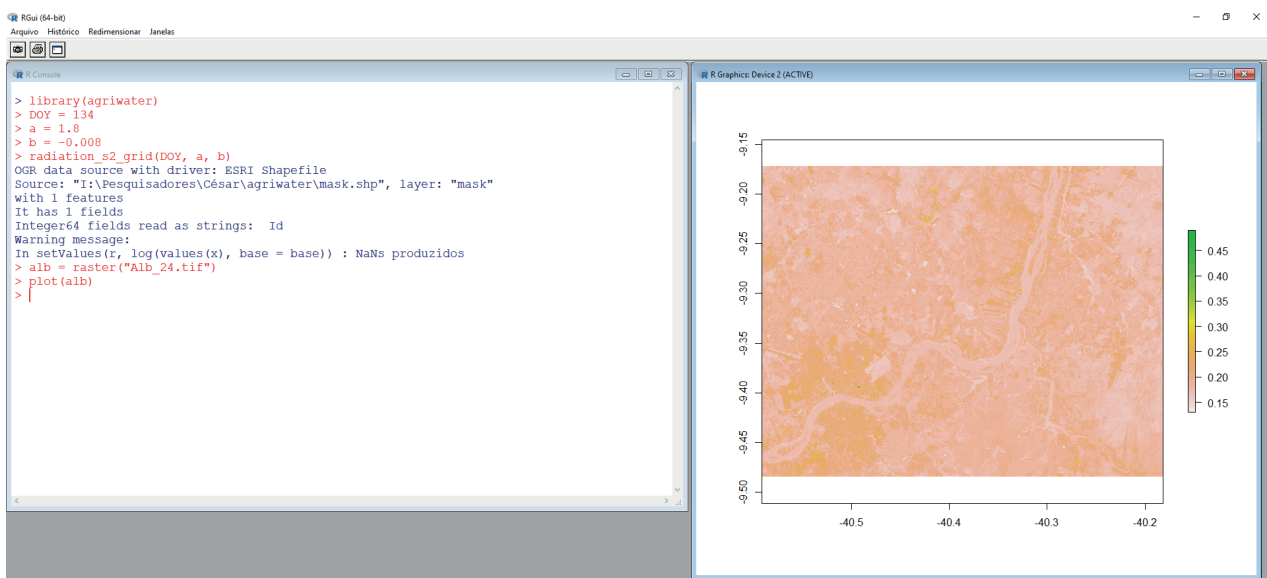
Com os dados agrometeorológicos interpolados, a função `radiation_s2_grid()` do pacote Agriwater pode ser utilizada para modelar o balanço de energia no solo.

```
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(agriwater)
DOY = 134
a = 1.8
b = -0.008
radiation_s2_grid(DOY, a, b)
```

Pode ocorrer uma “demora” enquanto se executa a função, que pode ser “medida” pelo sinal de `>` que aparece após pressionar Enter, comando que ativa uma função. Enquanto não aparecer o sinal de `>`, a função ainda estará sendo executada.

Para visualizar o albedo superficial, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 11.

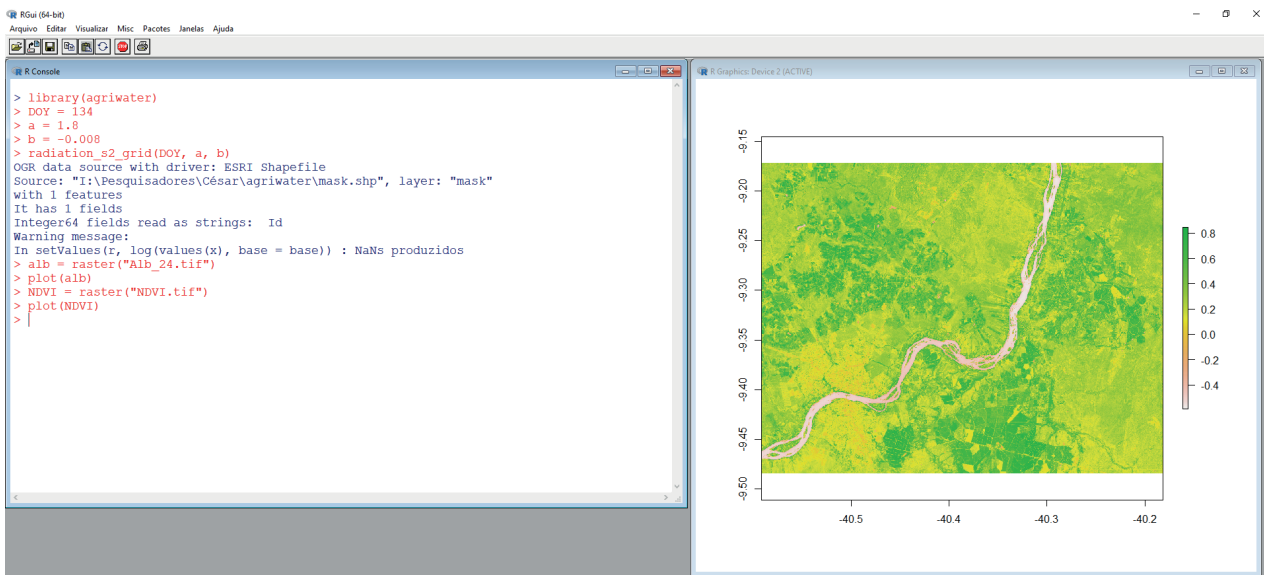
```
alb = raster("Alb_24.tif")
plot(alb)
```



**Figura 11.** Visualização do albedo superficial gerada pela função `radiation_s2_grid()` do pacote Agriwater no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar o NDVI, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 12.

```
NDVI = raster("NDVI.tif")
plot(NDVI)
```

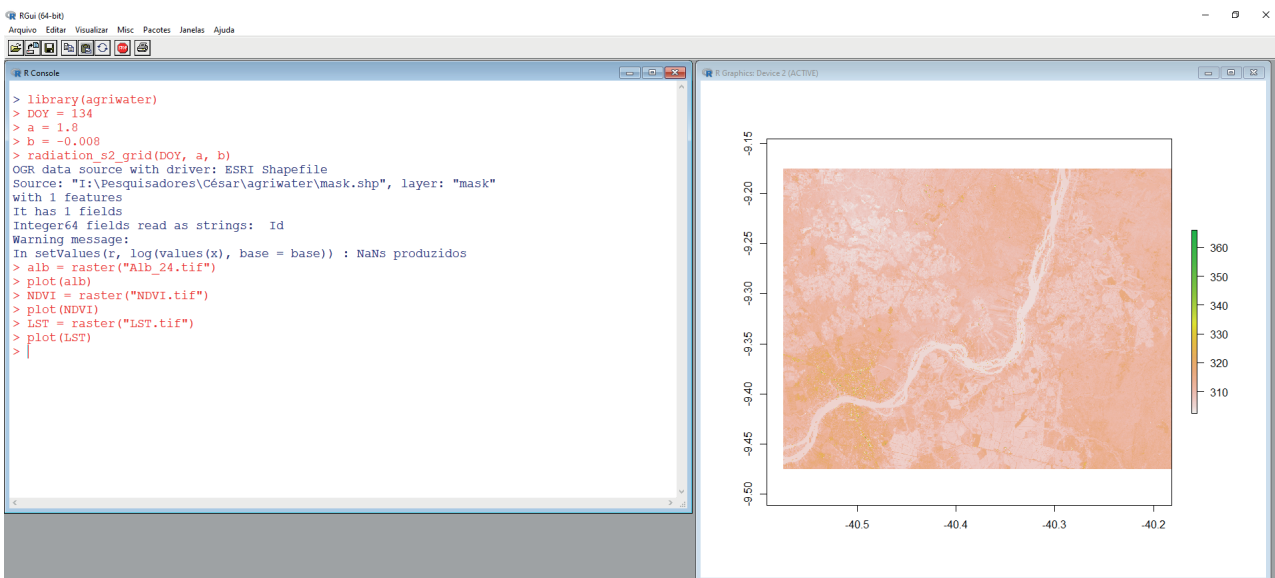


**Figura 12.** Visualização do NDVI gerada pela função `radiation_s2_grid()` do pacote Agriwater no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar a temperatura de superfície, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 13.

```
LST = raster("LST.tif")
```

```
plot(LST)
```

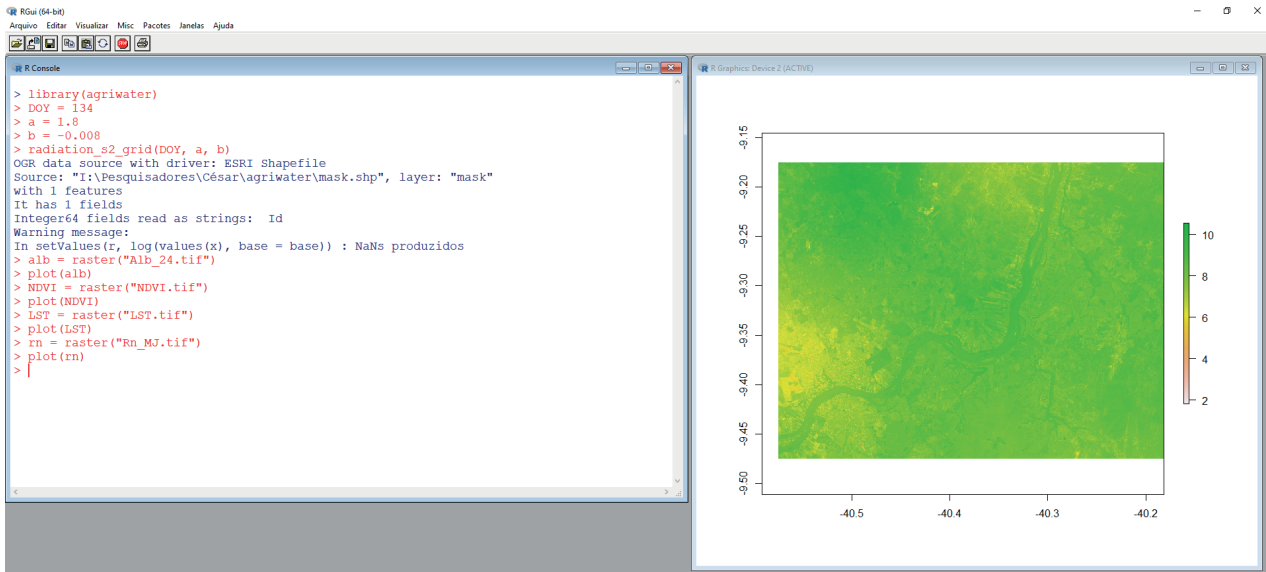


**Figura 13.** Visualização da temperatura superficial gerada pela função `radiation_s2_grid()` do pacote Agriwater no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar o saldo de radiação, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 14.

```
rn = raster("Rn_MJ.tif")
```

```
plot(rn)
```

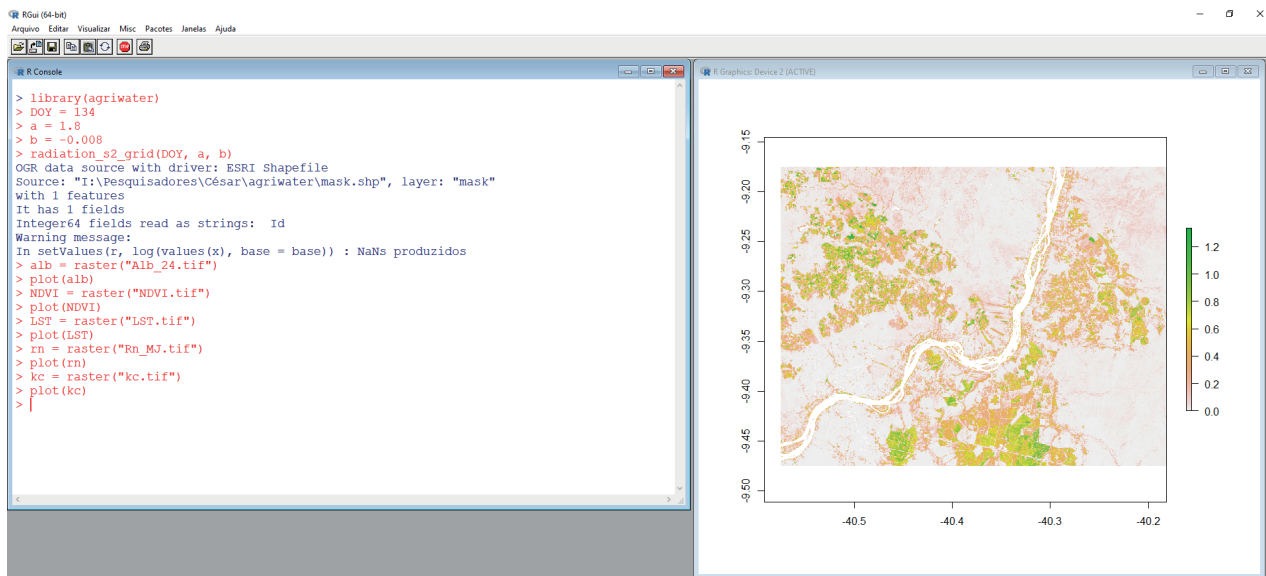


**Figura 14.** Visualização do saldo de radiação gerada pela função `radiation_s2_grid()` do pacote `Agriwater` no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar a fração evapotranspirativa, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 15.

```
kc = raster("kc.tif")
```

```
plot(kc)
```



**Figura 15.** Visualização da fração evapotranspirativa gerada pela função `radiation_s2_grid()` do pacote `Agriwater` no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar a evapotranspiração real, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 16.

```
evapo = raster("evapo.tif")
```

```
plot(evapo)
```

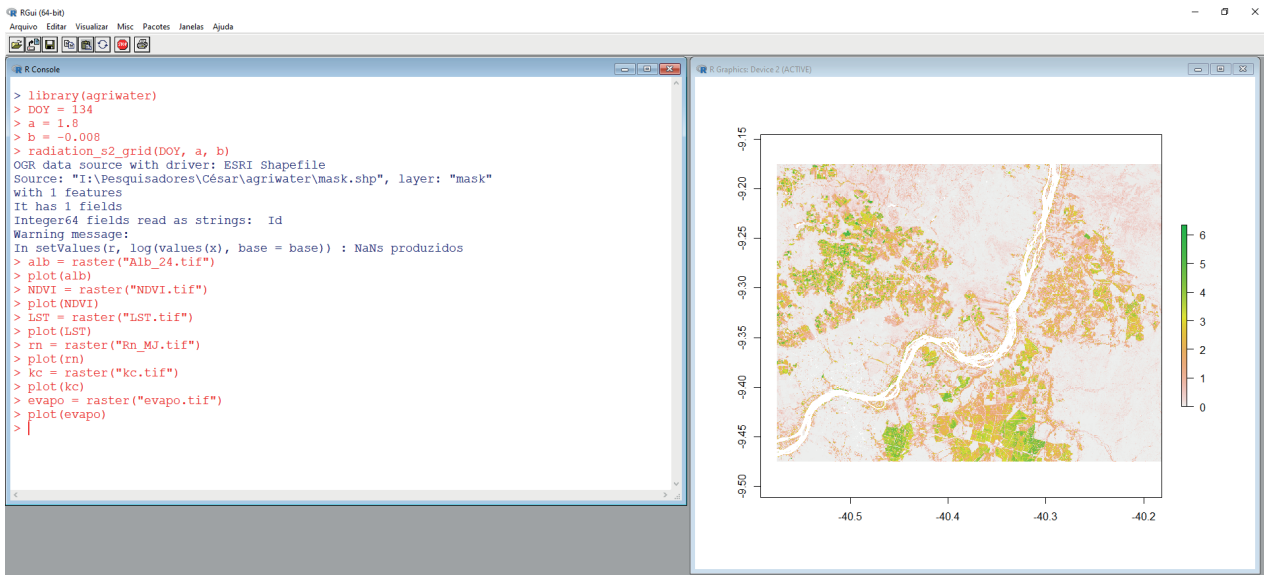


Figura 16. Visualização da evapotranspiração real gerada pela função radiation\_s2\_grid() do pacote Agriwater no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar o fluxo de calor latente, executa-se a função plot(), que resulta na tela da Figura 17.

```

LE = raster("LE_MJ.tif")
plot(LE)
    
```

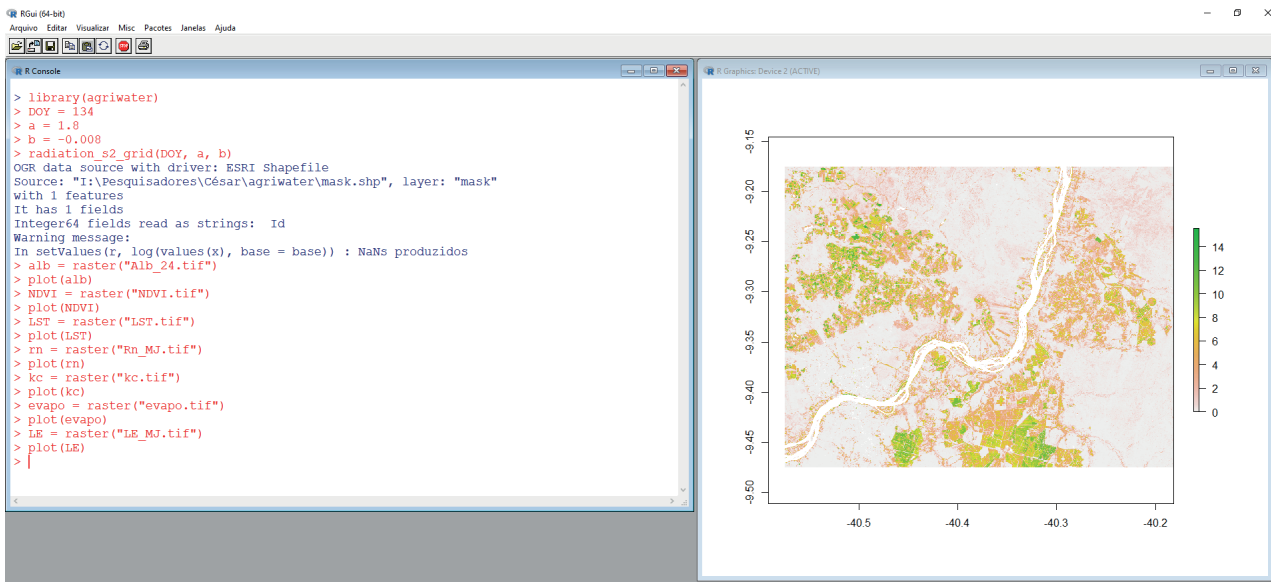


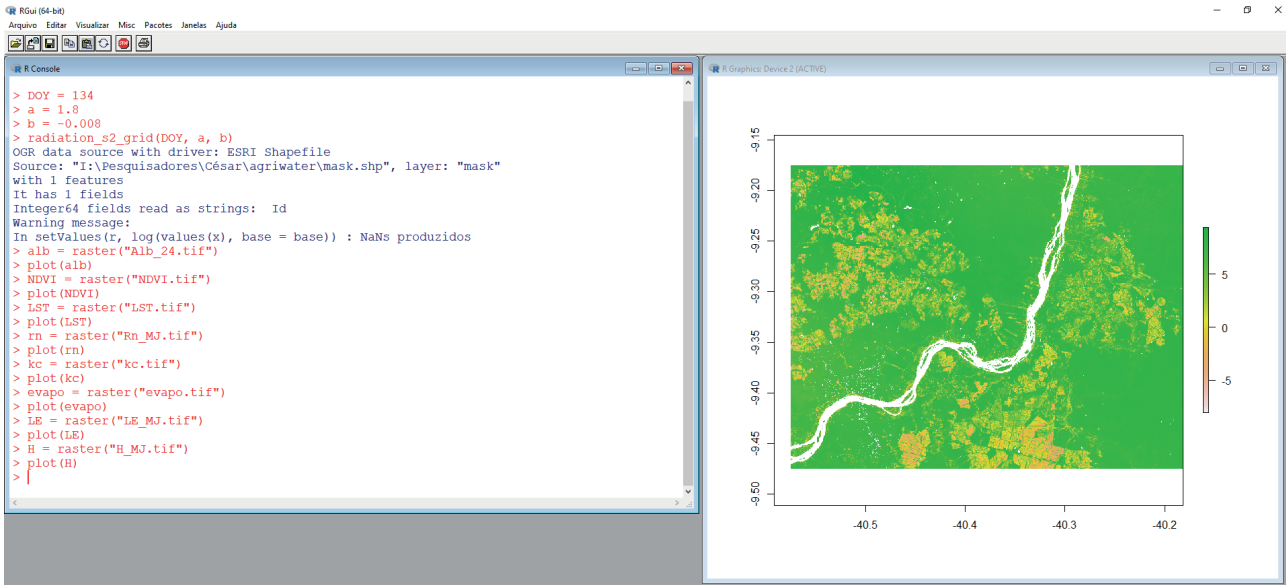
Figura 17. Visualização do fluxo de calor latente gerada pela função radiation\_s2\_grid() do pacote Agriwater no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar o fluxo de calor sensível, executa-se a função plot(), que resulta na tela da Figura 18.

```

H = raster("H_MJ.tif")
plot(H)
    
```



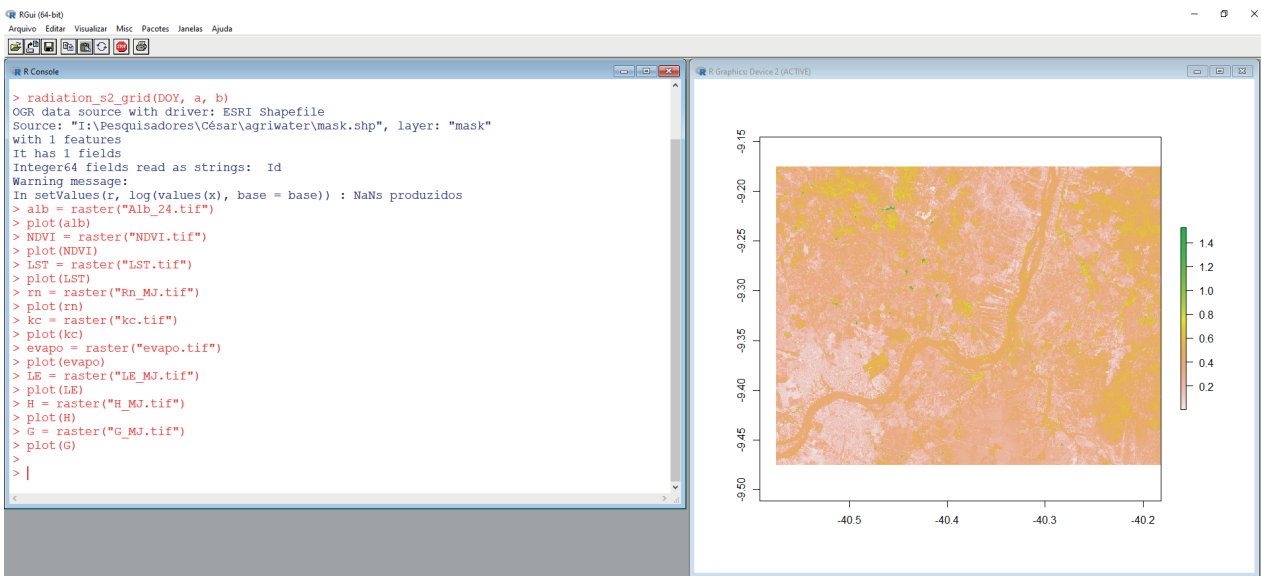


**Figura 18.** Visualização do fluxo de calor sensível gerada pela função `radiation_s2_grid()` do pacote `Agriwater` no R usando imagens Sentinel-2.

Para visualizar o fluxo de calor no solo, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 19.

```
G = raster("G_MJ.tif")
```

```
plot(G)
```



**Figura 19.** Visualização do fluxo de calor no solo gerada pela função `radiation_s2_grid()` do pacote `Agriwater` no R usando imagens Sentinel-2.

## 4. Aplicação usando imagens Modis no afloramento do Aquífero Guarani no estado de São Paulo

Para esse primeiro exemplo, são utilizadas imagens do sensor Modis do dia 1 de janeiro de 2014. Essas imagens estão disponibilizadas no Google Drive (pasta com imagens, dados meteorológicos e arquivos shapefile editados de acordo com a Tabela 5 está disponível em <https://drive.google.com/open?id=1ypHjKxM6LyEgszHu81XtmgmWRG2kBT15>), para que as funções exemplificadas a seguir sejam reproduzidas localmente pelos usuários do pacote Agriwater. A Tabela 5 mostra como devem estar os arquivos para o uso de funções com imagens Modis.

**Tabela 5.** Especificações dos arquivos para uso de imagens Modis no pacote Agriwater do R.

Nome dos arquivos raster gerados	Descrição	Aplicação
B1.tif	Banda do vermelho	Funções para estação meteorológica única ou grid
B2.tif	Banda do infravermelho próximo	
Ta.tif	Interpolação da temperatura média do ar (°C/dia)	
ET0.tif	Interpolação da evapotranspiração de referência (mm/dia)	
RG.tif	Interpolação da radiação solar global (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	
mask.shp	Limites da área de estudo, em coordenadas em grau decimal	Ambas as anteriores

Os arquivos devem ser descompactados em uma pasta, e seu caminho completo deve ser adicionado na função do R abaixo:

```
setwd('D:/pasta')
```

Essa função informa o R que essa é a pasta de trabalho atual. Assim, cada vez que o usuário pedir para importar um arquivo, se ele estiver nessa pasta, basta informar o nome do arquivo, sem precisar escrever o endereço inteiro. Caso ocorra um erro, deve-se experimentar mudar o “sentido” da barra, colocar / ou \ (a barra / utiliza a orientação Unix e as barras \ utilizam a orientação Windows para a especificação de "paths").

De acordo com Paim (2017), é recomendada como boa prática, ao se iniciar uma sessão de trabalho no R, liberar a memória de possíveis objetos que ainda estejam alocados e que não serão utilizados. Essa liberação de memória é feita usando os códigos abaixo:

```
rm(list=ls())
```

```
ls()
```

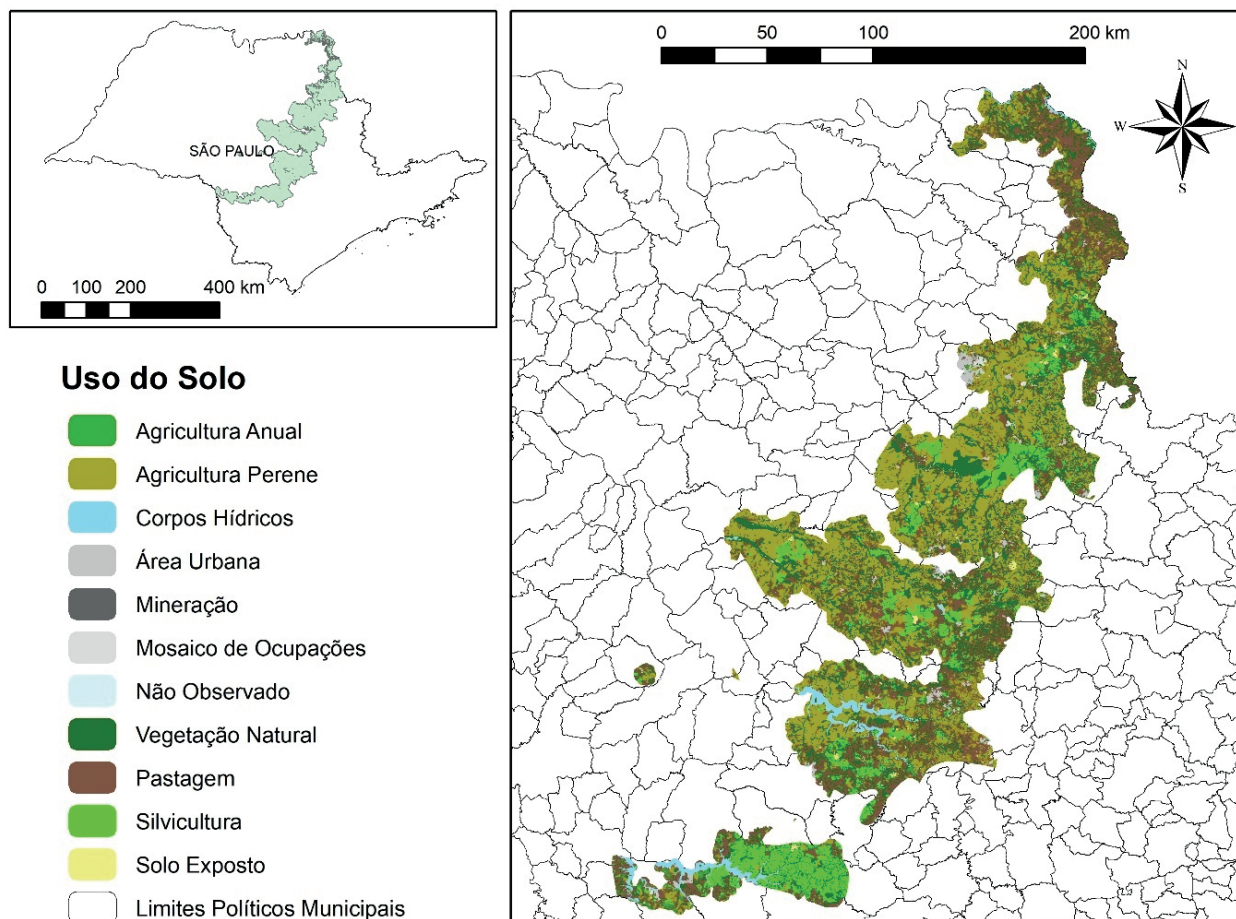
```
character(0)
```

A função `ls()` lista todos os objetos que estão atualmente armazenados na memória de trabalho do R. A função `rm()` faz a remoção desses objetos da memória. A chamada `rm(list=ls())`, portanto, remove todos os objetos da memória.

Usualmente as bandas do Modis são disponibilizadas em formato tif, mas em coordenadas UTM. Por isso, é necessário convertê-las previamente usando um software como o QGIS. É possível aplicar a metodologia apresentada na seção 4.1.

#### 4.1. Interpolação dos dados agrometeorológicos

Na pasta de trabalho, deverão estar arquivos raster com o grid de dados agrometeorológicos que estão na planilha. A Figura 20 exibe a região do afloramento do Aquífero Guarani no estado de São Paulo, que é a área que servirá como “máscara” para a modelagem. As estações estão distribuídas em todo o estado. Assim, inicialmente todas são interpoladas; porém, para a modelagem com o pacote Agriwater, serão considerados apenas os dados interpolados dentro da “máscara”.



**Figura 20.** Uso do solo na região do afloramento do Aquífero Guarani, no estado de São Paulo.

A área de estudo é composta por 106 municípios do estado de São Paulo situados sobre o afloramento do Aquífero Guarani. A Figura 20 expõe a distribuição espacial do uso do solo no afloramento do Aquífero Guarani em 2016, segundo Mapbiomas (2019), e sua localização no estado de São Paulo. O município de Ribeirão Preto (547.417 habitantes) é o único com mais de 500 mil habitantes. Os municípios de Piracicaba (358.108 habitantes), Franca (332.109 habitantes), São Carlos (220.425 habitantes), Araraquara (198.079 habitantes), Rio Claro (191.135 habitantes), Jaú (125.469 habitantes), Botucatu (120.800 habitantes) e Araras (108.689 habitantes) representam importantes municípios da região (IBGE, 2018). Existe crescente utilização das águas subterrâneas para abastecimento público nessa área, e aproximadamente 57% dos municípios da região do afloramento do Aquífero Guarani utilizam o manancial subterrâneo como fonte de abastecimento (Albuquerque Filho, 2011).

A “máscara” (arquivo *shapefile* com os limites da área de estudo) deve ser importada para o R usando a função `readOGR` (do pacote “*rgdal*”):

```
mask <- readOGR("mask.shp")
```

As imagens Sentinel-2 do dia juliano 134 de 2016 já estão em coordenadas geográficas (projeção WGS84).

Em seguida, é importada a planilha com dados das estações agrometeorológicas:

```
data = read.table(file="data.csv", header=TRUE, sep=";")
```

```
data <- as.data.frame(data)
```

```
data <- na.omit(data)
```

Criou-se um vetor com a função `c()` dentro de uma matriz com 27 linhas (pois são 27 estações ao longo de São Paulo) e 5 colunas nomeadas como Lat, Long, Ta, RG e ET0, respectivamente, informando a latitude, longitude, temperatura média do ar diária, radiação solar global diária e evapotranspiração de referência diária. A função `na.omit()` foi usada para que colunas com dados faltantes fossem omitidas das linhas nas quais faltam dados. Foi criada uma variável de nome “cana” do tipo “dataframe”. *Dataframe* é o tipo gerado pelo R toda vez que é usada a função `read.table()`. O comando especifica o arquivo com os dados a ser lido, nomeado como `data.csv`. A primeira linha do arquivo contém os nomes das colunas, sendo que esse formato é informado ao R por meio do parâmetro “`header=TRUE`”. O caractere separador de colunas no arquivo é o ponto e vírgula, e essa informação é passada no parâmetro `sep=";"`.

A planilha de dados agrometeorológicos está em formato Comma-Separated Values (CSV, valores separados por vírgulas) e é um arquivo American Standard Code for Information Interchange (ASCII, código padrão americano para o intercâmbio de informação) puro. O caractere separador pode ser vírgula, ponto e vírgula, tabulação, etc. A primeira linha do arquivo pode conter ou não os nomes das colunas dos dados. Um arquivo CSV pode ser gerado diretamente em um editor de texto ASCII – por exemplo, o Bloco de Notas do Windows. Geralmente os dados são apresentados em uma planilha do Libre Office Calc ou Microsoft Excel, e essas ferramentas dispõem da funcionalidade para exportar ou salvar os dados em formato CSV.

Para fazer a interpolação, é utilizado o pacote “*gstat*”. Na primeira vez que é feita essa aplicação, é instalado o pacote:

```
install.packages("gstat")
```

Em seguida, é chamado esse pacote.

```
library(gstat)
```

Aqui prepara-se o grid a partir do *shapefile* `mask.shp`, porém o tamanho de pixel da interpolação respeitará o *grid* da imagem do Modis, 250 m.

```
B2 = raster("B2.tif")
```

```
b2_mask = crop(B2, extent(mask))
```

```
min_x = min(data$Long)
```

```
min_y = min(data$Lat)
```

```
x_length = max(data$Long) - min_x #easting amplitude
```

```

y_length = max(data$Lat) - min_y #northing amplitude
cellsize = 0.05 #pixel size
ncol = round(x_length/cellsize,0) #number of columns in grid
nrow = round(y_length/cellsize,0) #number of rows in grid
dfx = data
coordinates(dfx) = ~Long+Lat
proj4string(dfx) = crs(mask)

grid = GridTopology(cellcentre.offset=c(min_x,min_y),cellsize=c(cellsize,cellsize),cells.dim=c(ncol,nrow))

#Convert GridTopology object to SpatialPixelsDataFrame object.
grid = SpatialPixelsDataFrame(grid,
                              data=data.frame(id=1:prod(ncol,nrow)),
                              proj4string=CRS(proj4string(mask)))

```

Aqui é interpolada a radiação solar global com IDW e gerado o *raster* RG.tif.

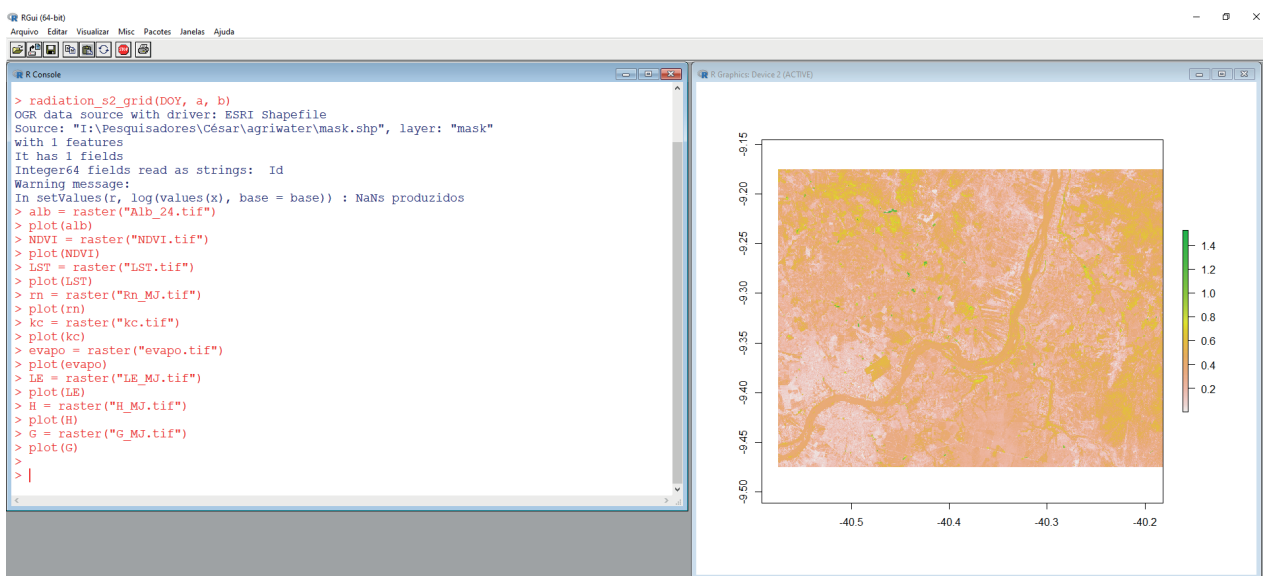
```

RG = idw(formula = RG ~ 1, locations = dfx, newdata = grid)
idw_raster <- rasterFromXYZ(RG)
RG_mask_orig <- crop(idw_raster, extent(mask))
RG_mask <- resample(RG_mask_orig, b2_mask, method="bilinear")
writeRaster(RG_mask, "RG", format = "GTiff", overwrite=TRUE)

```

Para visualizar o resultado, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 21:

```
plot(RG_mask)
```



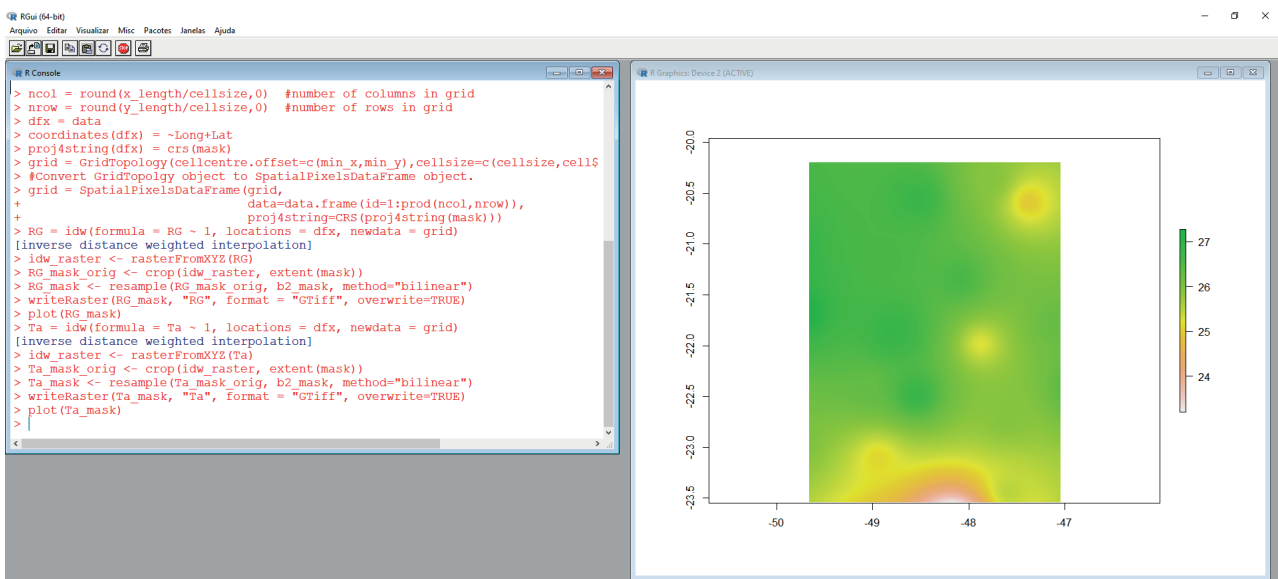
**Figura 21.** Visualização da interpolação da radiação global (RG) feita usando a função `idw()` no R.

Aqui interpola-se a temperatura média do ar com IDW e gera-se o *raster* `Ta.tif`.

```
Ta = idw(formula = Ta ~ 1, locations = dfx, newdata = grid)
idw_raster <- rasterFromXYZ(Ta)
Ta_mask_orig <- crop(idw_raster, extent(mask))
Ta_mask <- resample(Ta_mask_orig, b2_mask, method="bilinear")
writeRaster(Ta_mask, "Ta", format = "GTiff", overwrite=TRUE)
```

Para visualizar o resultado, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 22:

```
plot(Ta_mask)
```



**Figura 22.** Visualização da interpolação da temperatura média do ar ( $T_a$ ) feita com a função `idw()` no R.

Aqui interpola-se a evapotranspiração de referência com IDW e gera-se o *raster* `ET0.tif`.

```
ET0 = idw(formula = ET0 ~ 1, locations = dfx, newdata = grid)
idw_raster <- rasterFromXYZ(ET0)
ET0_mask_orig <- crop(idw_raster, extent(mask))
ET0_mask <- resample(ET0_mask_orig, b2_mask, method="bilinear")
writeRaster(ET0_mask, "ET0", format = "GTiff", overwrite=TRUE)
```

Para visualizar o resultado, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 23:

```
plot(ET0_mask)
```

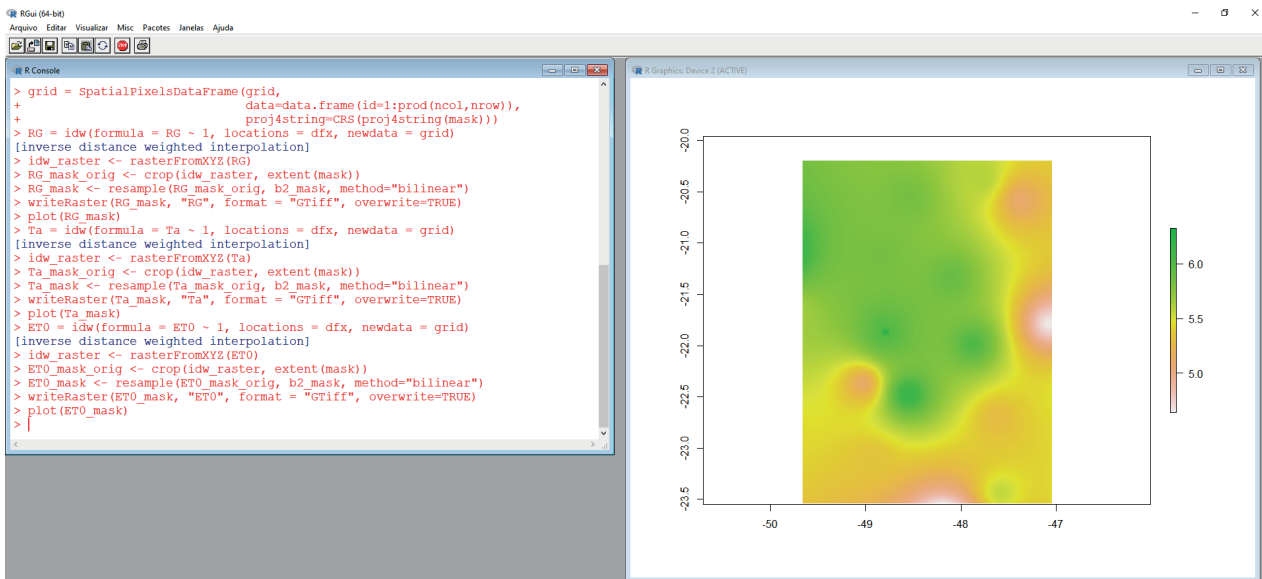


Figura 23. Visualização da interpolação da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) feita com a função `idw()` no R.

## 4.2. Executando o Agriwater

Com os dados agrometeorológicos interpolados, pode-se executar a função `evapo_modis_grid()` para modelar a evapotranspiração real.

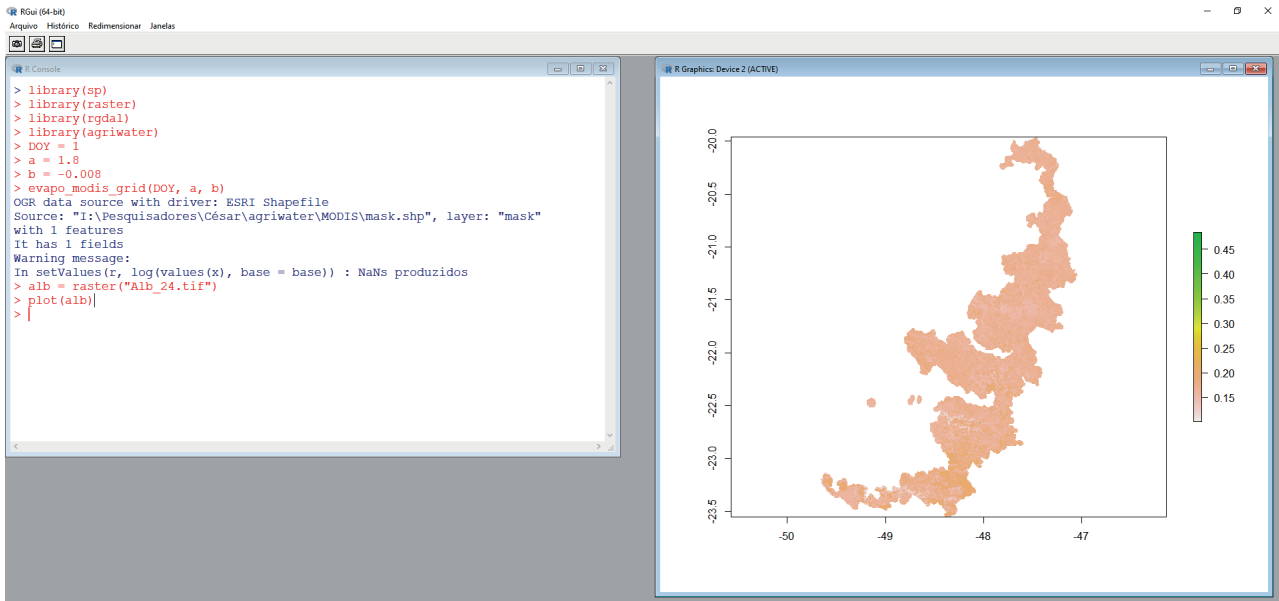
```
library(raster)
library(sp)
library(rgdal)
library(agriwater)

DOY = 1
a = 1.8
b = -0.008
evapo_modis_grid(DOY, a, b)
```

Pode ocorrer uma “demora” enquanto a função é executada, e que pode ser “medida” pelo sinal de `>` que aparece após pressionar Enter, que ativa uma função. Enquanto não aparecer esse sinal de `>`, a função ainda está sendo executada.

Para visualizar o albedo superficial, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 24:

```
alb = raster("Alb_24.tif")
plot(alb)
```

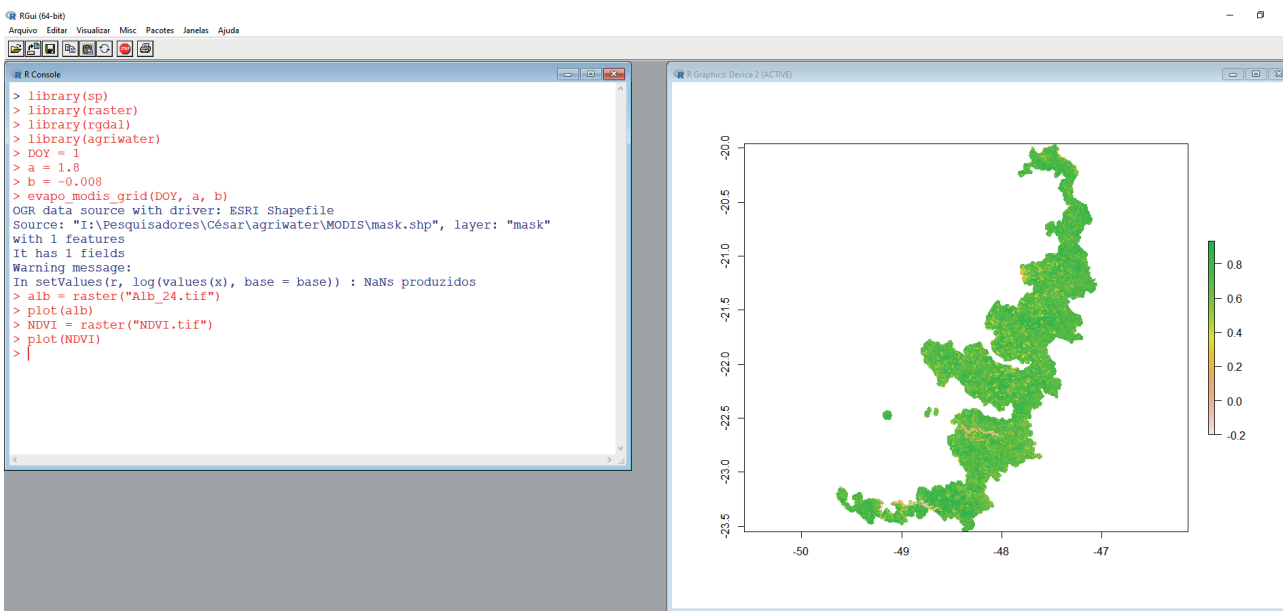


**Figura 24.** Visualização do albedo superficial gerada pela função `evapo_modis_grid()` do pacote Agriwater no R usando imagens Modis.

Para visualizar o NDVI, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 25:

```
NDVI = raster("NDVI.tif")
```

```
plot(NDVI)
```



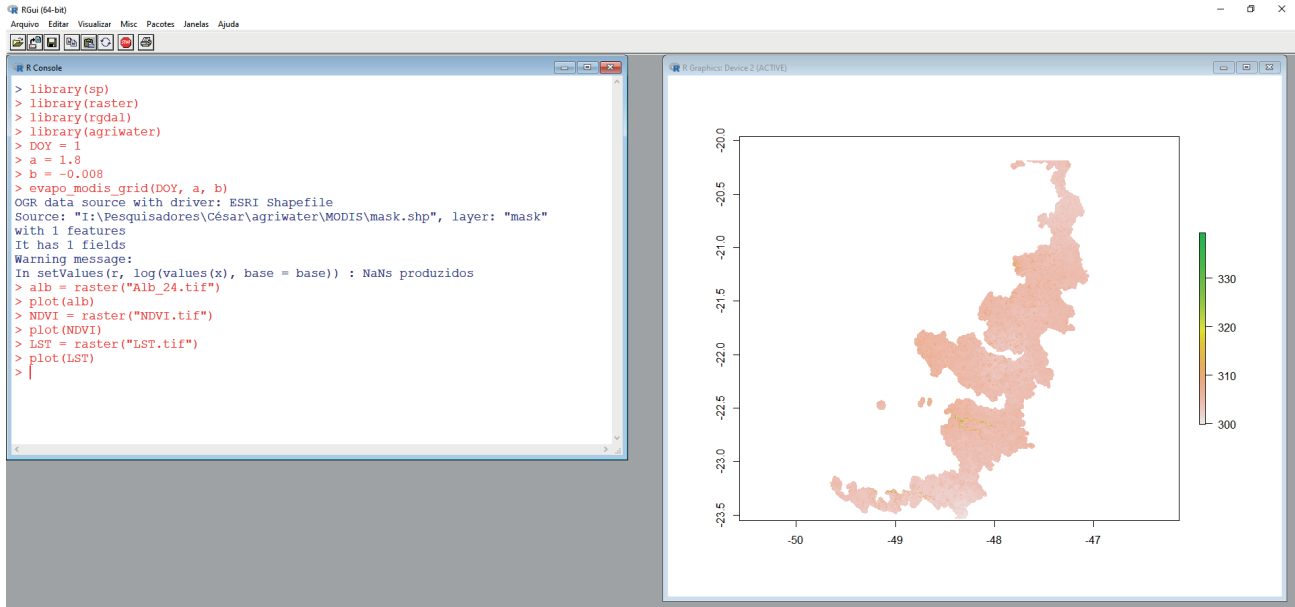
**Figura 25.** Visualização do NDVI gerada pela função `evapo_modis_grid()` do pacote Agriwater no R usando imagens Modis.

Para visualizar a temperatura de superfície, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 26:

```
LST = raster("LST.tif")
```

```
plot(LST)
```





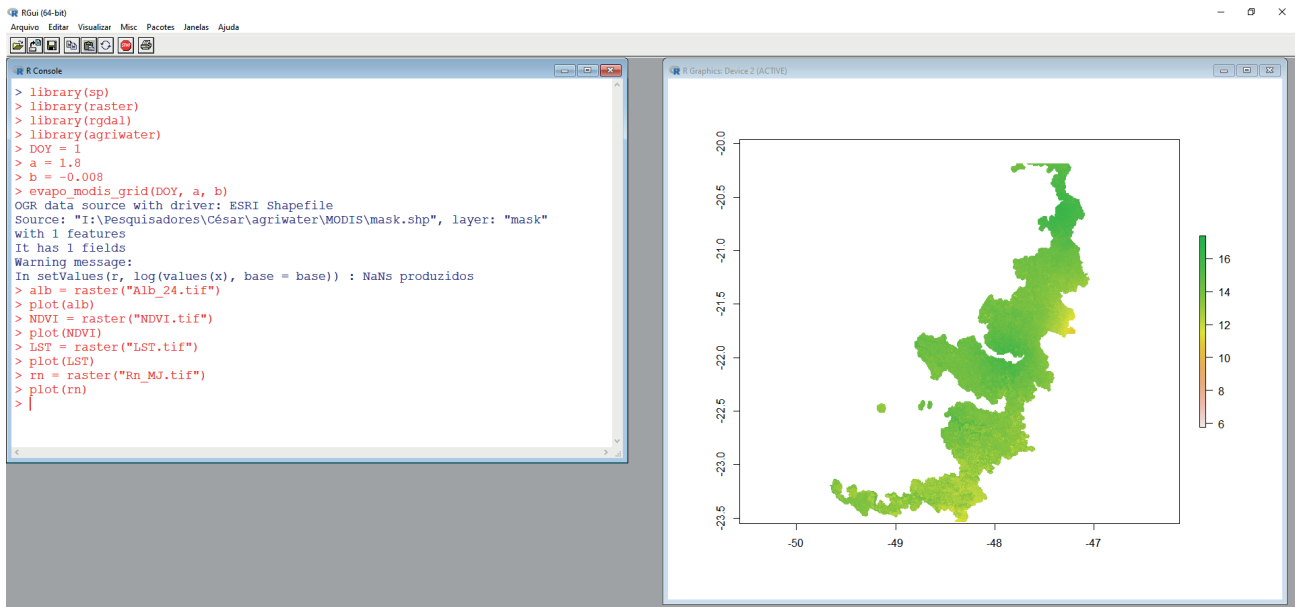
**Figura 26.** Visualização da temperatura superficial gerada pela função `evapo_modis_grid()` do pacote `Agriwater` no R usando imagens Modis.

Para visualizar o saldo de radiação, executa-se a função `plot()` que resulta na tela da Figura 27:

```

rn = raster("Rn_MJ.tif")
plot(rn)

```

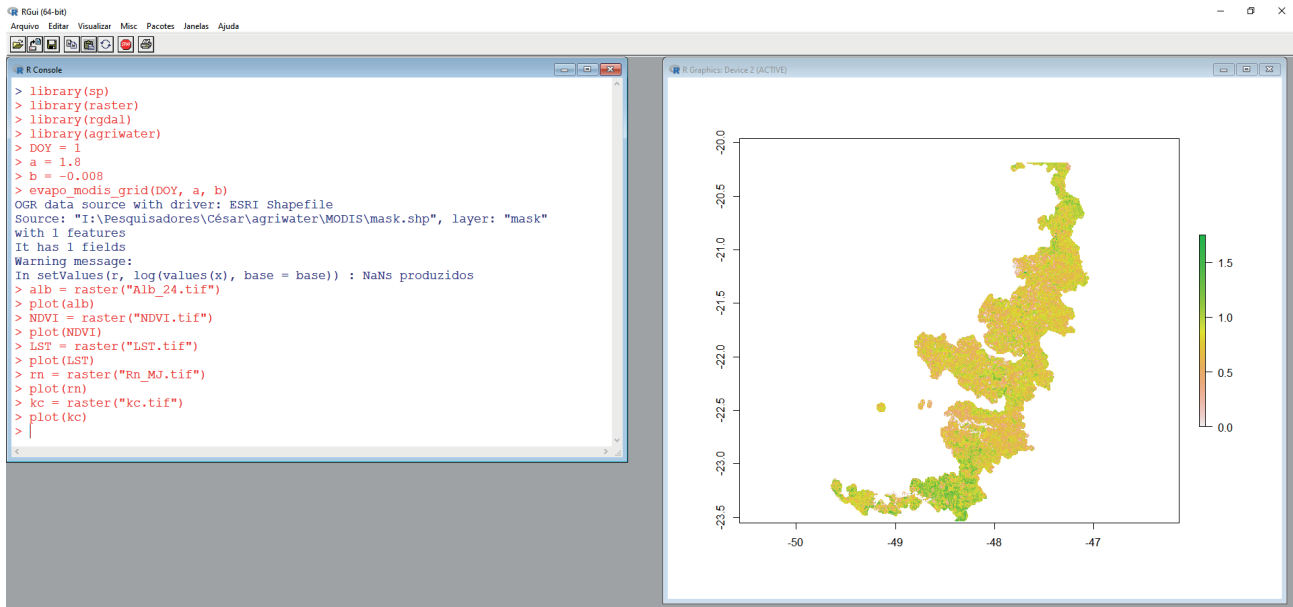


**Figura 27.** Visualização do saldo de radiação gerada pela função `evapo_modis_grid()` do pacote `Agriwater` no R usando imagens Modis.

Para visualizar a fração evapotranspirativa, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 28:

```
kc = raster("kc.tif")

plot(kc)
```

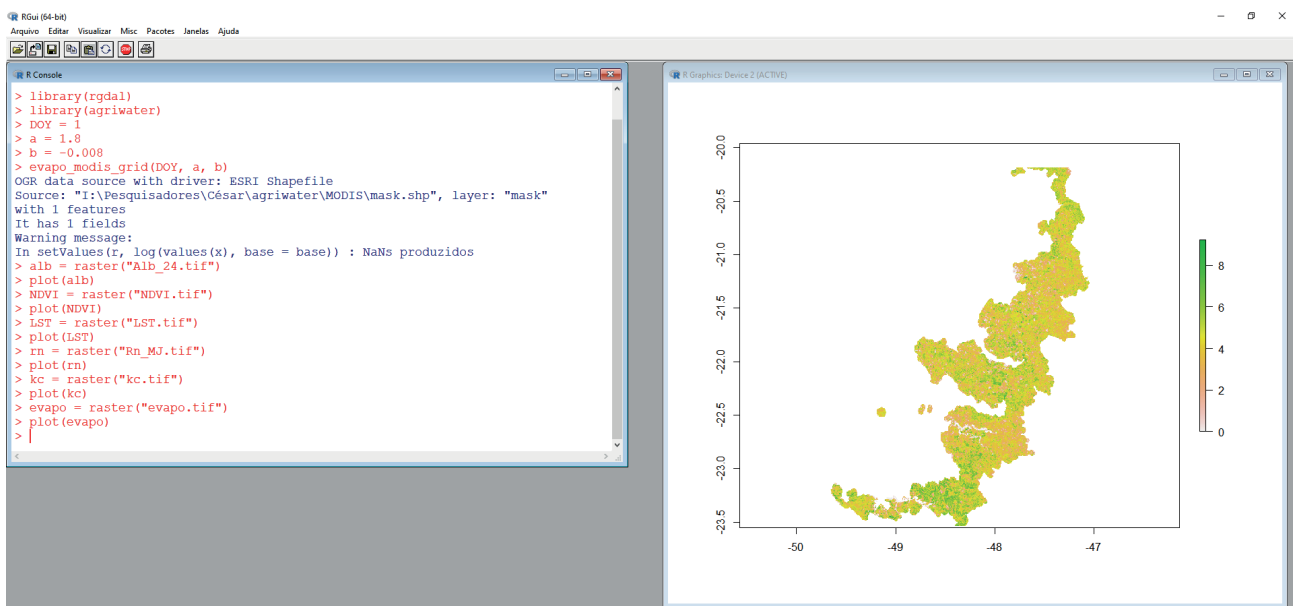


**Figura 28.** Visualização da fração evapotranspirativa gerada pela função `evapo_modis_grid()` do pacote Agriwater no R usando imagens Modis.

Para visualizar a evapotranspiração real, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 29:

```
evapo = raster("evapo.tif")

plot(evapo)
```



**Figura 29.** Visualização da evapotranspiração real gerada pela função `evapo_modis_grid()` do pacote Agriwater no R usando imagens Modis.

## 5. Aplicação usando imagens Landsat-8 em área paulista de Cerrado

Para esse primeiro exemplo são utilizadas imagens do sensor Landsat-8 do dia 26 de novembro de 2016. Essas imagens estão disponibilizadas no Google Drive (pasta com imagens e *shapefiles* devidamente editados de acordo com a Tabela 6, disponível no endereço [https://drive.google.com/open?id=1X3lKvm6qNum2vnQgd-z\\_JmMJYV1GlgVJ](https://drive.google.com/open?id=1X3lKvm6qNum2vnQgd-z_JmMJYV1GlgVJ)), para que as funções exemplificadas a seguir sejam reproduzidas localmente pelos usuários do pacote Agriwater. A Tabela 6 mostra como devem estar os arquivos para as funções usando imagens Landsat-8.

**Tabela 6.** Especificações dos arquivos para uso de imagens Landsat-8 no pacote Agriwater do R.

Nome do raster de entrada	Descrição	Aplicação
B1.tif	Banda do aerossol	
B2.tif	Banda do azul	
B3.tif	Banda do verde	
B4.tif	Banda do vermelho	Funções para estação meteorológica única ou <i>grid</i>
B5.tif	Banda do infravermelho próximo	
B6.tif	Banda do infravermelho de ondas curtas 1	
B7.tif	Banda do infravermelho de ondas curtas 2	
B10.tif	Banda termal 1	Funções utilizando bandas termais com estação meteorológica única ou <i>grid</i>
B11.tif	Banda termal 2	
Ta.tif	Interpolação da temperatura média do ar (°C/dia)	
ET0.tif	Interpolação da evapotranspiração de referência (mm/dia)	Funções para um <i>grid</i> de estações meteorológicas
RG.tif	Interpolação da radiação solar global (MJ/m <sup>2</sup> /dia)	
mask.shp	Limites da área de estudo, em coordenadas em grau decimal	Todas as anteriores

Os arquivos devem ser descompactados em uma pasta e seu caminho completo deve ser adicionado na função do R:

```
setwd('D:/pasta')
```

Essa função informa o R que essa é a pasta de trabalho atual. Assim, cada vez que o usuário pedir para importar um arquivo, se ele estiver nessa pasta, basta informar o nome do arquivo, sem precisar escrever o endereço inteiro. Caso ocorra erro, deve-se experimentar mudar o “sentido” da barra, e colocar / ou \ (a barra / utiliza a orientação Unix e as barras \ utilizam a orientação Windows para a especificação de “paths”).

De acordo com Paim (2017), é recomendada como boa prática, ao se iniciar uma sessão de trabalho no R, liberar a memória de possíveis objetos que ainda estejam alocados e que não serão utilizados. Essa liberação de memória é feita usando os códigos abaixo:

```
rm(list=ls())
```

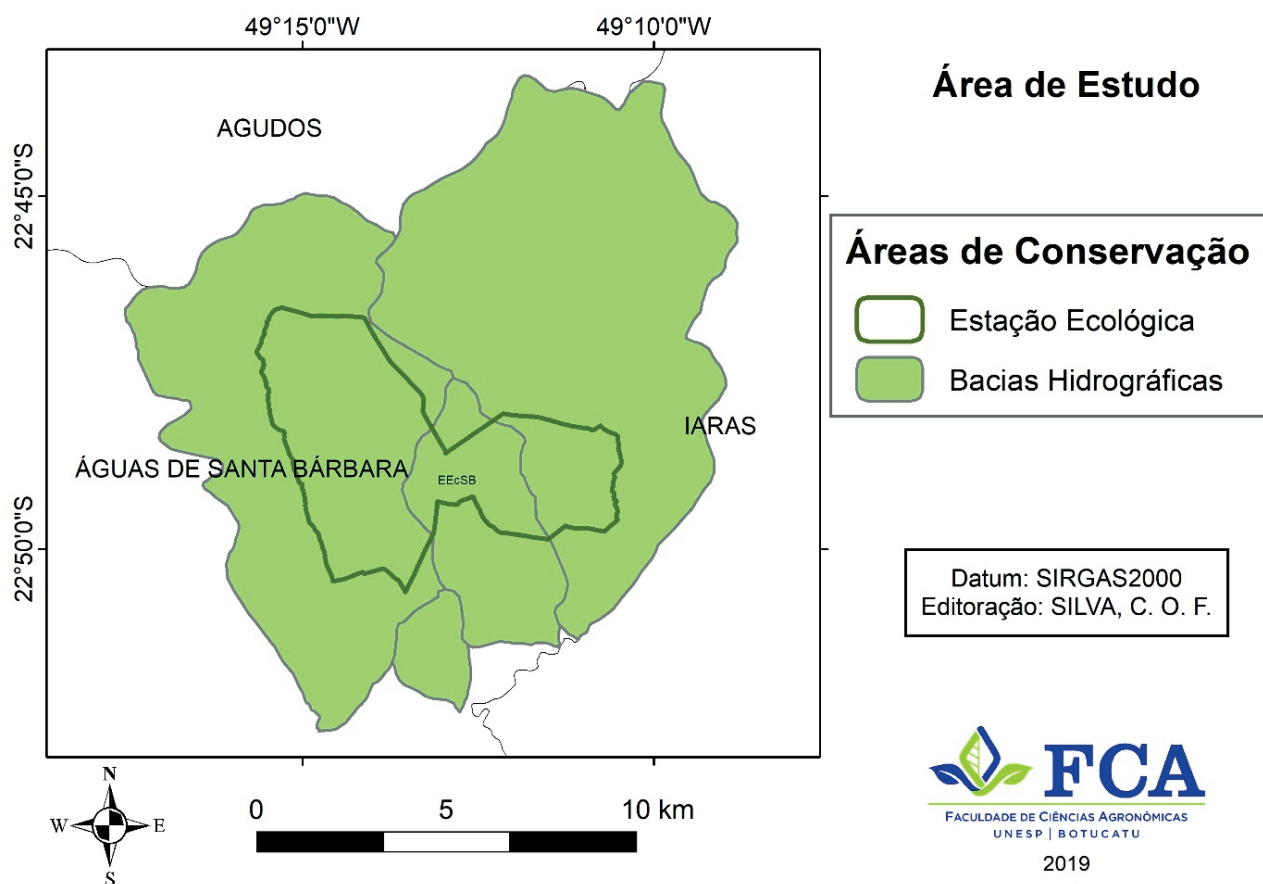
```
ls()
```

```
character(0)
```

A função `ls()` lista todos os objetos que estão atualmente armazenados na memória de trabalho do R. A função `rm()` faz a remoção desses objetos da memória. A chamada `rm(list=ls())`, portanto, remove todos os objetos da memória.

Usualmente as bandas do Landsat-8 são disponibilizadas em formato tif, mas em coordenadas UTM. Por isso, é necessário convertê-las previamente usando um software como o QGIS, e é possível aplicar a metodologia apresentada na seção 4.1.

A Estação Ecológica de Santa Bárbara fica localizada próxima a Rodovia SP-280 (Castelo Branco), nas coordenadas  $24^{\circ}48'$  de latitude e  $49^{\circ}13'$  de longitude. Tem área de 2.712 hectares, no município de Águas de Santa Bárbara, SP (Figura 30). O uso da terra é composto por áreas de Cerrado com fragmentos da Floresta Estacional Semidecidual em conjunto com talhões de pinus e eucalipto.



**Figura 30.** Localização da Estação Ecológica de Águas de Santa Bárbara (EEcoSB) e as bacias hidrográficas nas quais está alocada.

### 5.1. Gerando reflectâncias do Landsat-8 usando o Agriwater

Este passo não é necessário para calcular o balanço de energia no solo ou a evapotranspiração real, porém é uma ferramenta adicional de potencial interesse para usuários de geoprocessamento que necessitam de imagens de satélite em valores de reflectância do Landsat-8, normalmente disponibilizadas em número digital.

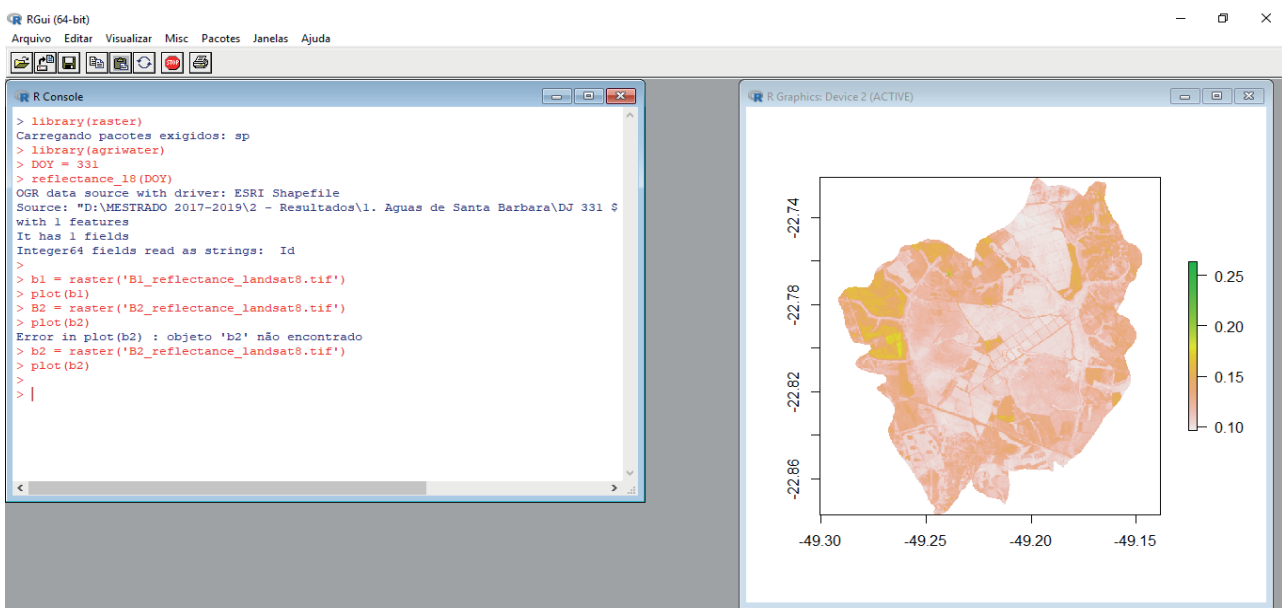
O primeiro passo é declarar o DOY correspondente e utilizar a função `reflectance_18()`:

```
library(raster)
```

```
library(sp)
library(rgdal)
library(agriwater)
DOY = 331
reflectance_18(DOY)
```

Para visualizar a reflectância gerada para a banda do “ultra azul”, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 31:

```
b1 = raster('B1_reflectance_landsat8.tif')
plot(b1)
```



**Figura 31.** Reflectância da banda 1 (aerossol) do Landsat-8 gerada pela função `reflectance_18()` do pacote `Agriwater`.

A banda 2, que corresponde à faixa do azul no visível, apresenta grande penetração em corpos d'água e elevada transparência, portanto viabiliza estudos batimétricos. De acordo com INPE (2019), essa banda sofre absorção pela clorofila e por pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenoides) e apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou de atividade industrial. Para visualizar a reflectância gerada para a banda do “azul”, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 32:

```
b2 = raster('B2_reflectance_landsat8.tif')
plot(b2)
```

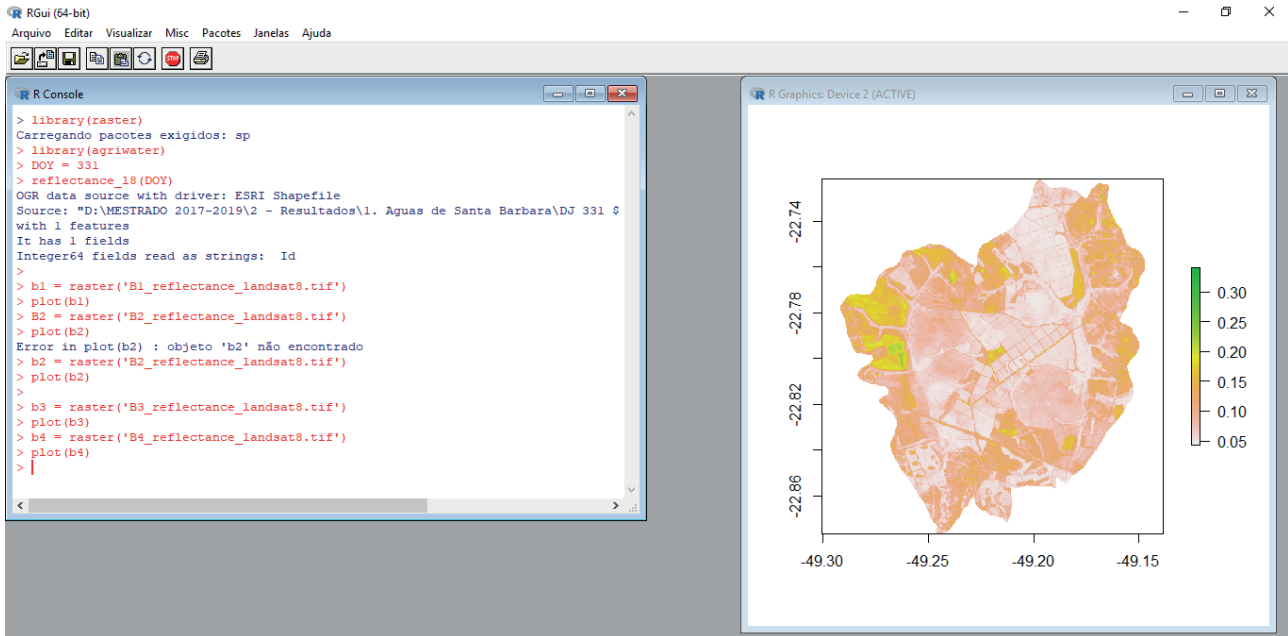


Figura 32. Reflectância da banda 2 (azul) do Landsat-8 gerada pela função `reflectance_18()` do pacote Agriwater.

A banda 3, que corresponde à faixa do verde no visível, de acordo com Inpe (2019), apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, o que possibilita seu uso em análises de quantidade e qualidade. Também apresenta boa penetração em corpos d'água. Para visualizar a reflectância gerada para a banda do "verde", executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 33:

```
b3 = raster('B3_reflectance_landsat8.tif')
```

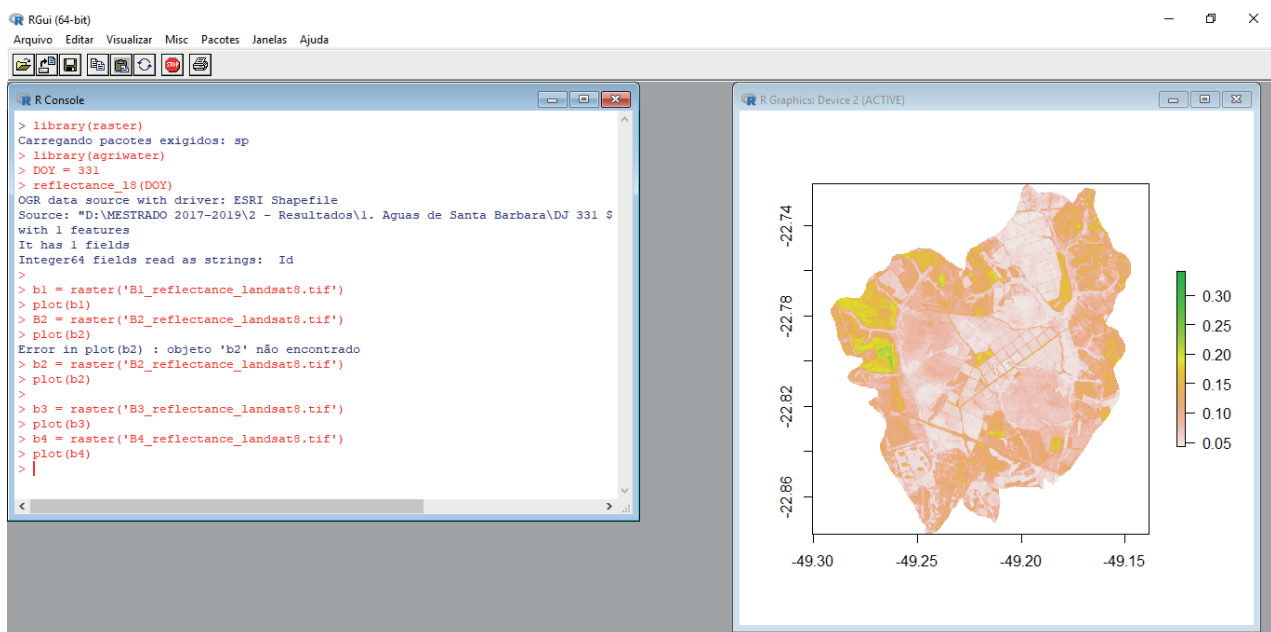
```
plot(b3)
```



Figura 33. Reflectância da banda 3 (verde) do Landsat-8 gerada pela função `reflectance_18()` do pacote Agriwater.

A banda 4, que corresponde à faixa do vermelho no visível, de acordo com INPE (2019), apresenta grande absorção em vegetação verde, densa e uniforme, ficando escura e permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (por exemplo, solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (por exemplo, campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem por meio da visualização da mata de galeria e do entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, inclusive para a identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas. Para visualizar a reflectância gerada para a banda do “vermelho”, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 34:

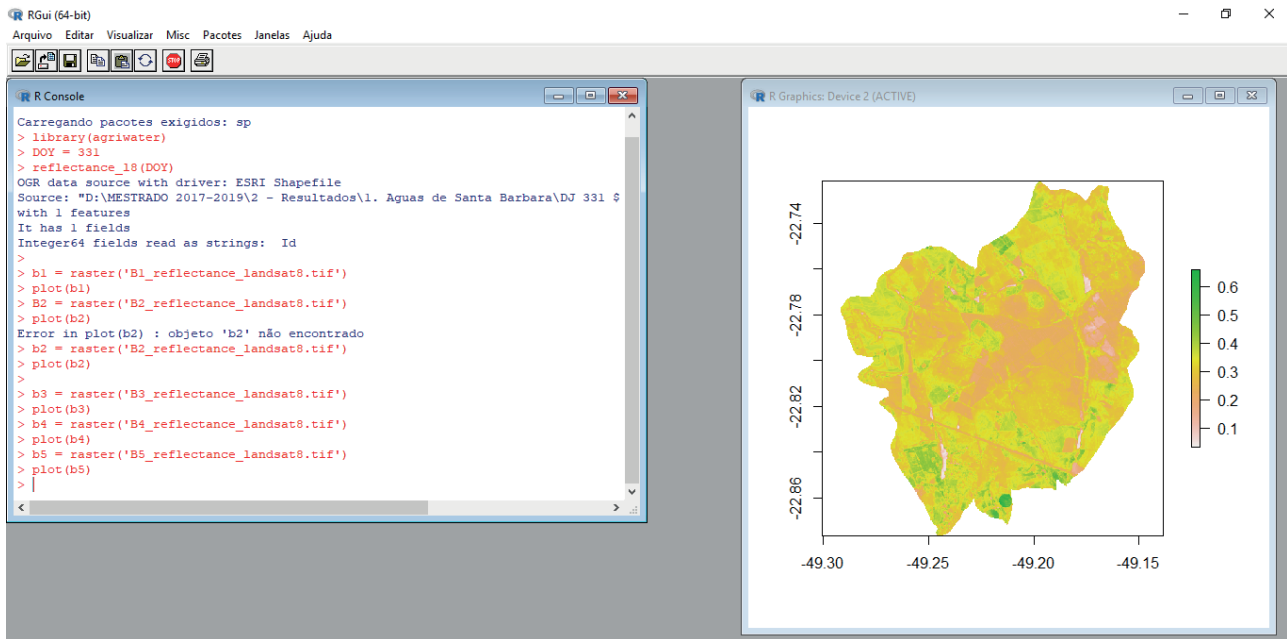
```
b4 = raster('B4_reflectance Landsat8.tif')
plot(b4)
```



**Figura 34.** Reflectância da banda 4 (vermelho) do Landsat-8 gerada pela função `reflectance_18()` do pacote `Agrivater`.

A banda 5, que corresponde à faixa do infravermelho próximo, de acordo com Inpe (2019), apresenta alta absorção em corpos d'água, que ficam escuros, o que permite mapear a rede de drenagem e delinear corpos d'água. A vegetação verde, densa e uniforme reflete muita energia nesta banda, e aparece bem clara nas imagens. A banda 5 também apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, e portanto permite a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais, para separar e mapear áreas ocupadas com pinus e eucalipto, para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite visualizar áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (por exemplo, aguapé) e identificar áreas agrícolas. Para visualizar a reflectância gerada para a banda do infravermelho próximo, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 35.

```
b5 = raster('B5_reflectance Landsat8.tif')
plot(b5)
```



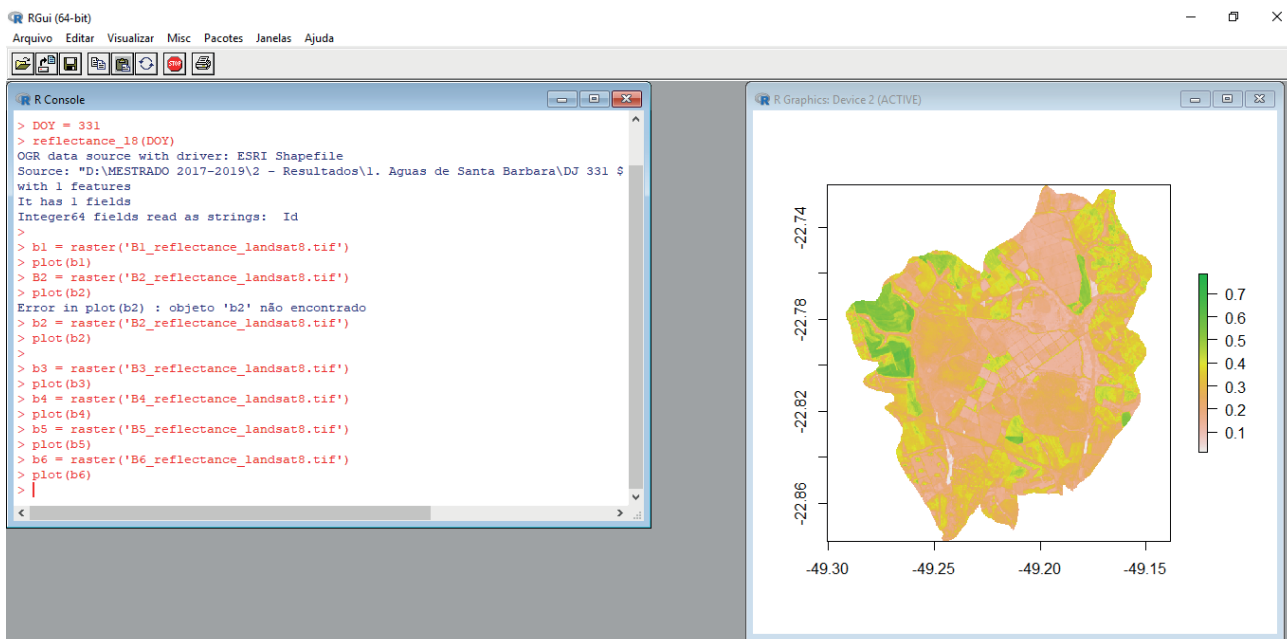
**Figura 35.** Reflectância da banda 5 (infravermelho próximo) do Landsat-8 gerada pela função `reflectance_18()` do pacote Agriwater.

A banda 6, que corresponde a uma das faixas do infravermelho de ondas curtas, de acordo com Inpe (2019), apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas e serve para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite. Para visualizar a reflectância gerada para a banda do infravermelho de ondas curtas 1, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 36:

```

b6 = raster('B6_reflectance_landsat8.tif')
plot(b6)

```

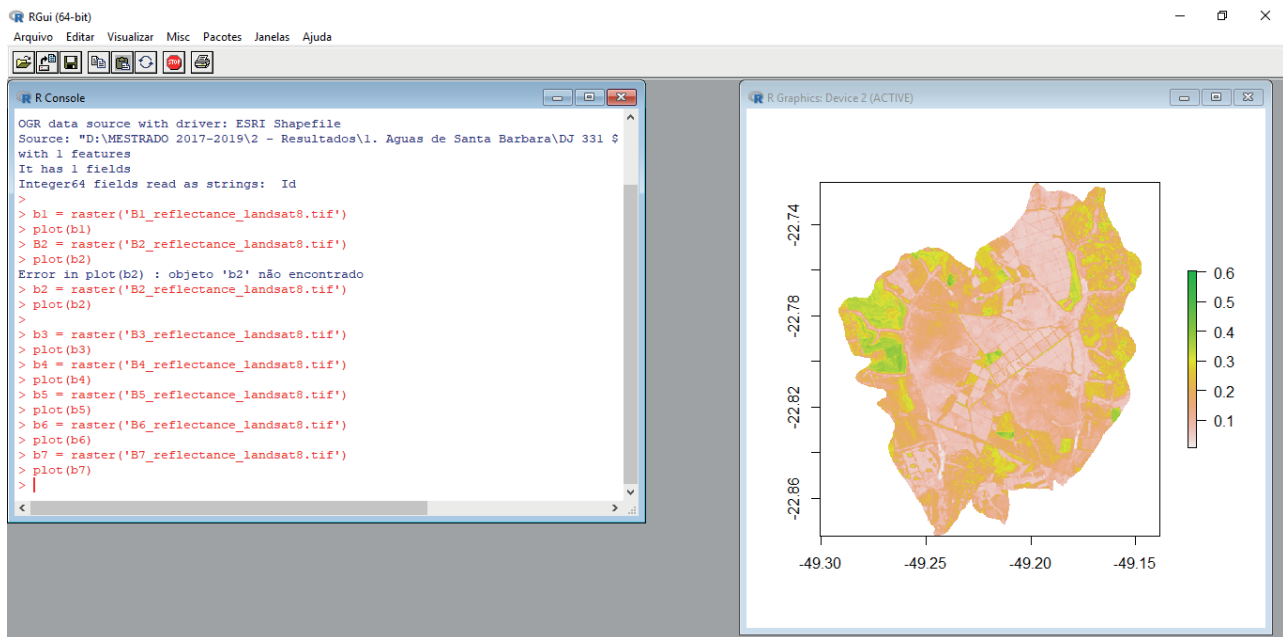


**Figura 36.** Reflectância da banda 6 (infravermelho de ondas curtas 1) do Landsat-8 gerada pela função `reflectance_18()` do pacote Agriwater.



A banda 7, que corresponde a outra faixa do infravermelho de ondas curtas, de acordo com Inpe (2019), apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxila, e é potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal. Para visualizar a reflectância gerada para a banda do infravermelho de ondas curtas 2, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 37:

```
b7 = raster('B7_reflectance_landsat8.tif')
plot(b7)
```



**Figura 37.** Reflectância da banda 7 (infravermelho de ondas curtas 2) do Landsat-8 gerada pela função `reflectance_18()` do pacote `Agrewater`.

## 5.2. Executando o `Agrewater`

Com os dados agrometeorológicos interpolados, é possível executar a função `evapo_18()` para modelar a evapotranspiração real. Vale ressaltar que não é necessário ter executado as funções apresentadas no item 5.1, pois a função `evapo_18()` trabalha diretamente com as imagens em formato de número digital, não sendo necessária a execução da função `reflectance_18()`.

```
library(sp)
library(raster)
library(rgdal)
library(agriwater)
DOY = 331
a = 1.8
b = -0.008
Ta=24.5225
RG=25.8088
ET0=3.597693
```

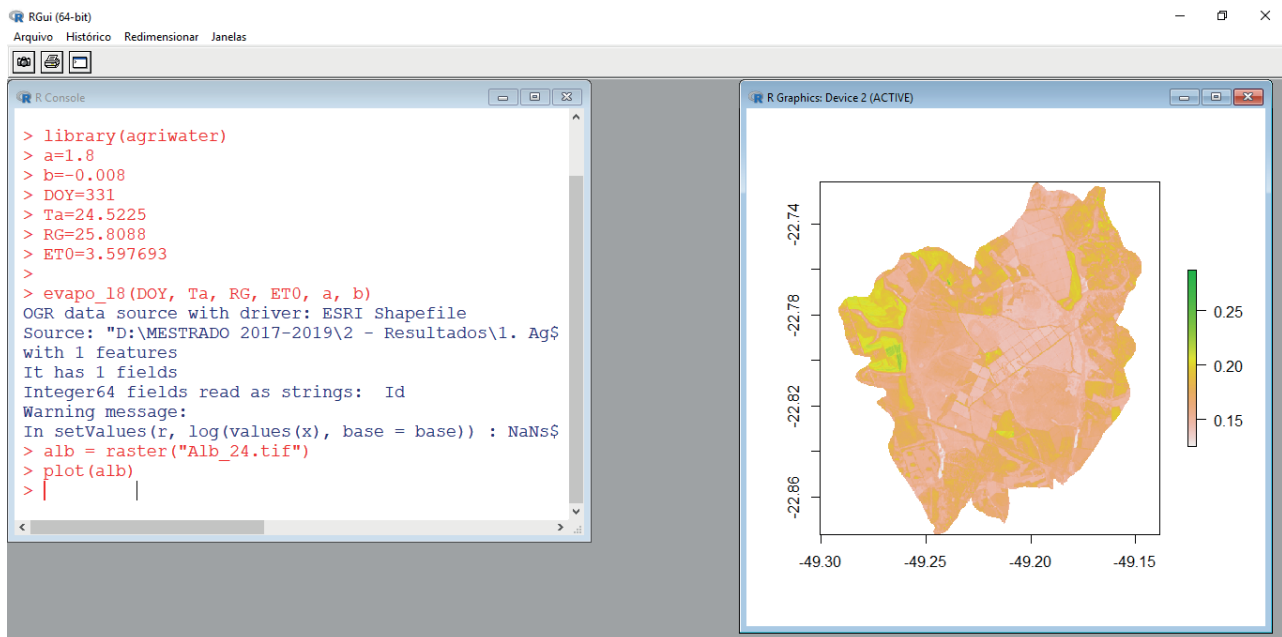
```
evapo_l8(DOY, Ta, RG, ET0, a, b)
```

Pode ocorrer demora enquanto se executa a função, a qual pode ser “medida” pelo sinal de > que aparece após pressionar Enter, que ativa uma função. Enquanto não aparecer esse sinal de >, a função ainda estará sendo executada.

Para visualizar o albedo superficial, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 38:

```
alb = raster("Alb_24.tif")
```

```
plot(alb)
```

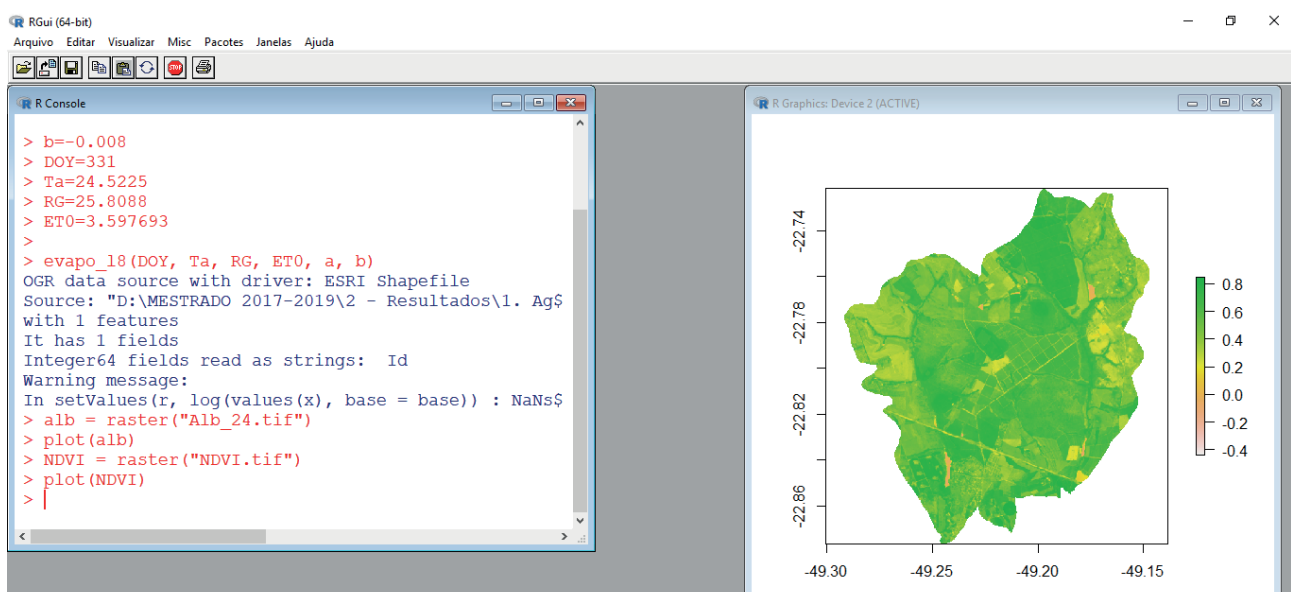


**Figura 38.** Visualização do albedo superficial gerada pela função `evapo_l8()` do pacote Agriwater no R usando imagens Landsat-8.

Para visualizar o NDVI, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 39:

```
NDVI = raster("NDVI.tif")
```

```
plot(NDVI)
```

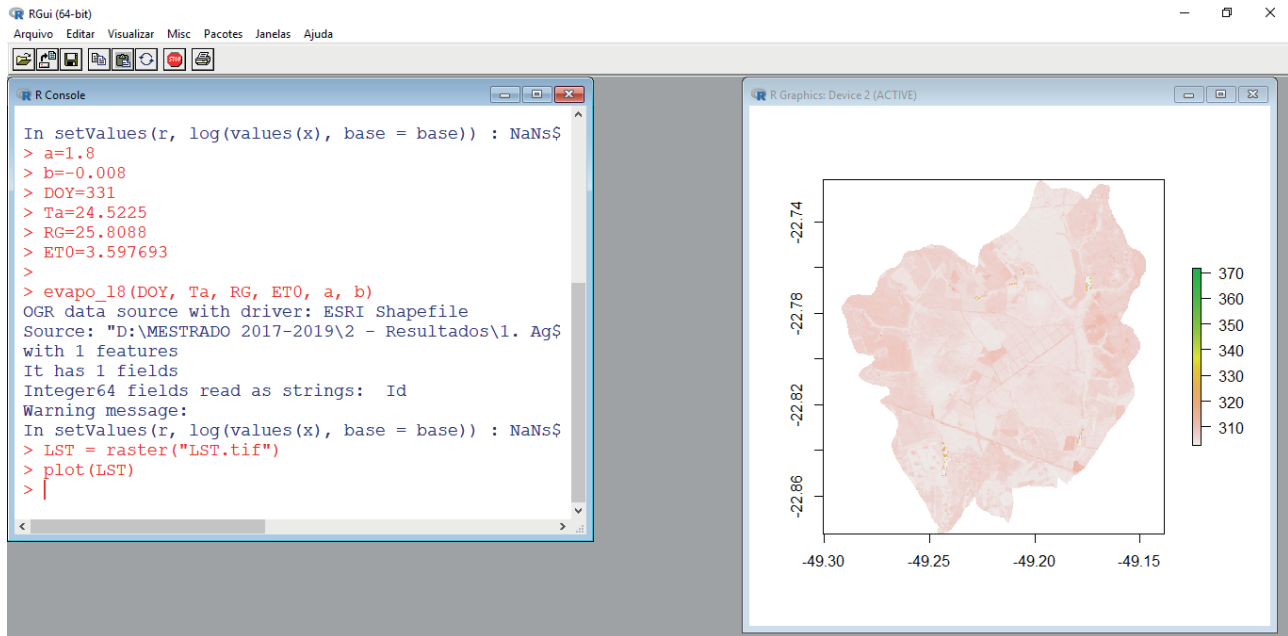


**Figura 39.** Visualização do NDVI gerada pela função `evapo_l8()` do pacote Agriwater no R usando imagens Landsat-8.

Para visualizar a temperatura de superfície, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 40:

```
LST = raster("LST.tif")

plot(LST)
```

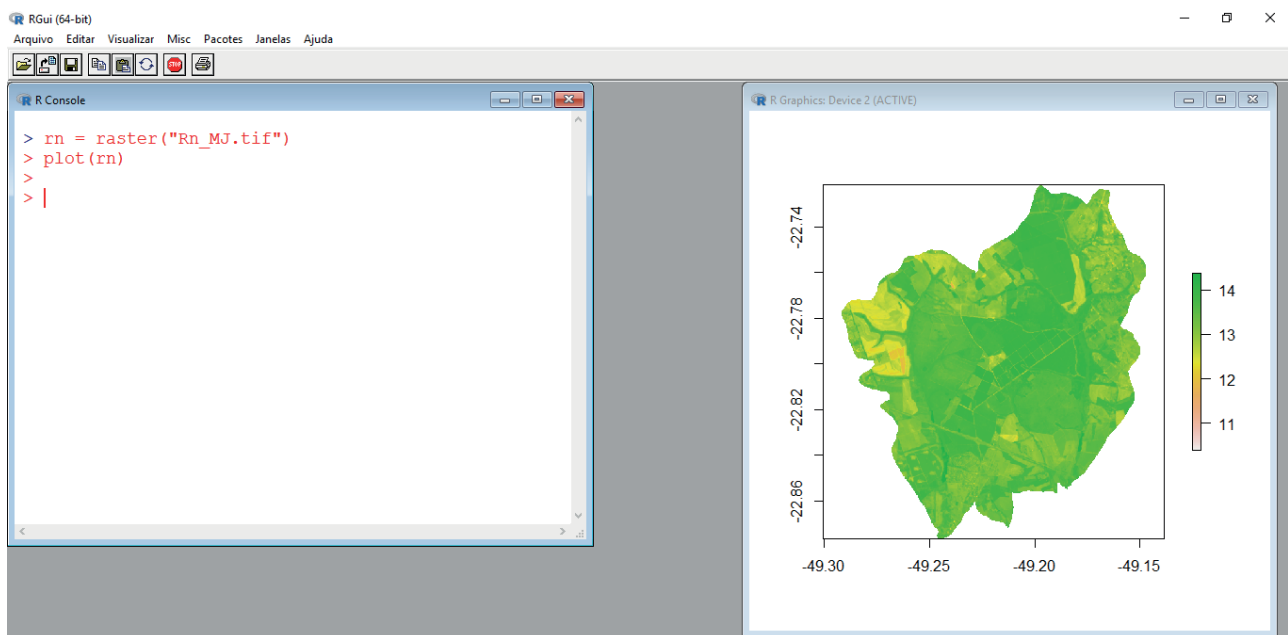


**Figura 40.** Visualização da temperatura superficial gerada pela função `evapo_18()` do pacote `Agrewater` no R usando imagens Landsat-8.

Para visualizar o saldo de radiação, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 41:

```
rn = raster("Rn_MJ.tif")

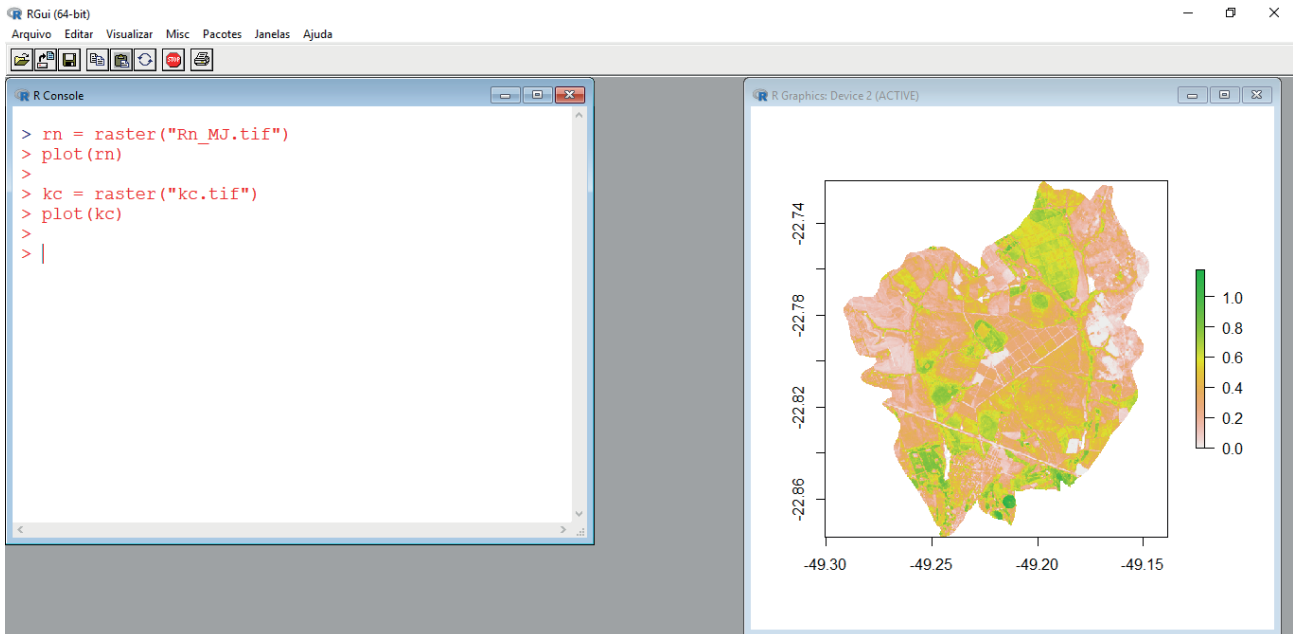
plot(rn)
```



**Figura 41.** Visualização do saldo de radiação gerada pela função `evapo_18()` do pacote `Agrewater` no R usando imagens Landsat-8.

Para visualizar a fração evapotranspirativa, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 42:

```
kc = raster("kc.tif")  
  
plot(kc)
```



**Figura 42.** Visualização da fração evapotranspirativa gerada pela função `evapo_18()` do pacote Agriwater no R usando imagens Landsat-8.

Para visualizar a evapotranspiração real, executa-se a função `plot()`, que resulta na tela da Figura 43:

```
evapo = raster("evapo.tif")  
  
plot(evapo)
```



**Figura 43.** Visualização da evapotranspiração real gerada pela função `evapo_18()` do pacote Agriwater no R usando imagens Landsat-8.

## 6. Aprimoramentos, acompanhamento de novas versões e estudos futuros

Foram promovidos workshops e aulas universitárias utilizando o pacote Agriwater entre agosto e outubro. Nessas ocasiões, foram colhidas dúvidas e problemas que são “antecipados” por este tutorial. O pacote em si foi criado para atender as demandas dos diversos pesquisadores que utilizaram o Safer, e foi construído a partir do feedback dado por eles e da busca por uma ferramenta comum que atendesse a necessidade de usuários com diversos níveis de conhecimento. É possível ter acesso facilitado ao código-fonte desse pacote por meio do repositório GitHub ([github.com/cesarofs/agriwater](https://github.com/cesarofs/agriwater)), no qual há uma seção específica para informar o programador a respeito de problemas encontrados durante o uso do pacote Agriwater ([github.com/cesarofs/agriwater/issues](https://github.com/cesarofs/agriwater/issues)).

Novas versões de teste são armazenadas no GitHub no formato de pacotes do R e podem ser instaladas como atualizações dos pacotes disponíveis no CRAN e utilizadas normalmente. Dessa forma, é possível testar, na prática, os pacotes com diversos usuários de forma a fazer novos ajustes antes de submeter ao CRAN a versão final da atualização já testada pela comunidade científica. Para isso, é necessário instalar o pacote “devtools”:

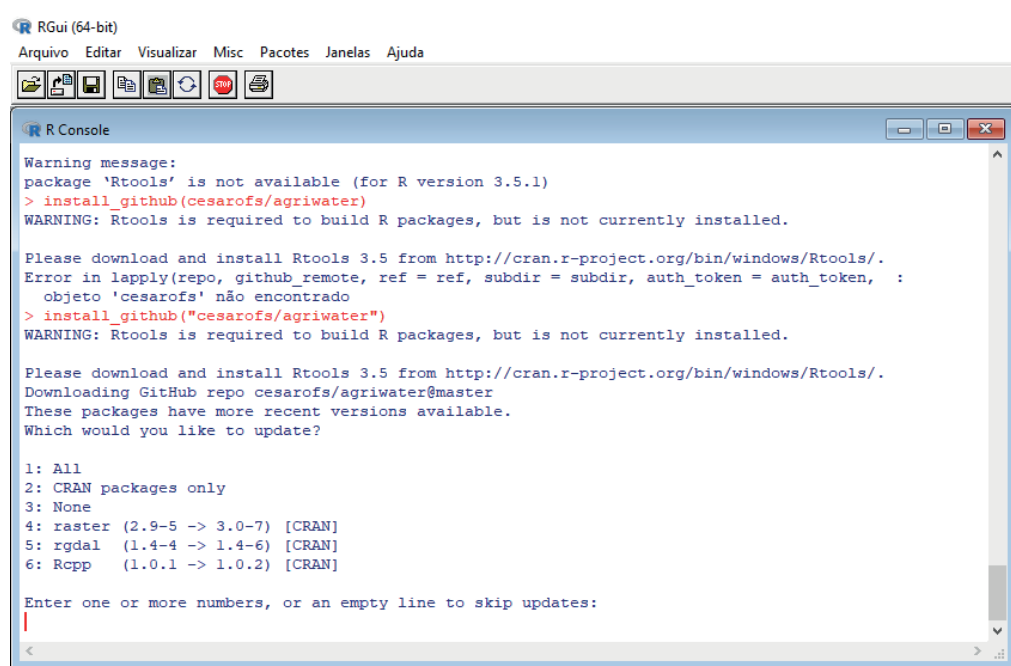
```
install.packages("devtools")
```

E usar a função `install_github()`. O argumento dessa função é o endereço do repositório do GitHub no qual está o pacote que se deseja instalar (a partir do usuário):

```
library(devtools)
```

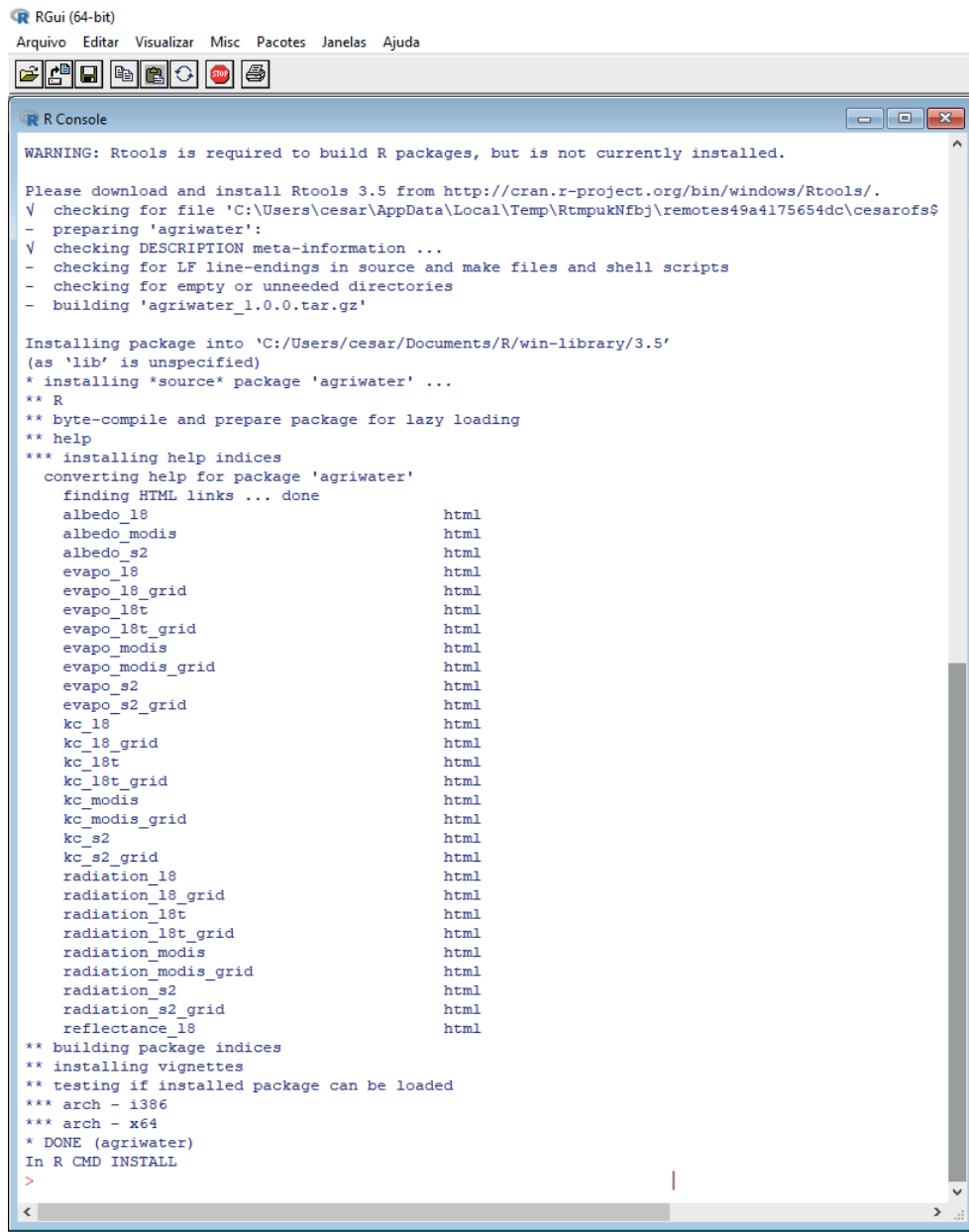
```
install_github("cesarofs/agriwater")
```

A tela apresentada na Figura 44, pedindo que se escolha quais dependências (pacotes exigidos para que o pacote Agriwater funcione) serão instalados, é exibida. Em princípio, se o Agriwater funcionou até agora, não é necessário instalar nenhum pacote novo (opção 3); mas se for a primeira vez, os pacotes devem ser instalados (opção 1).



**Figura 44.** Visualização da tela de instalação do pacote Agriwater no R utilizando a versão disponível no repositório GitHub.

Se a instalação tiver dado certo, será exibida a tela mostrada na Figura 45:



```
RGui (64-bit)
Arquivo Editar Visualizar Misc Pacotes Janelas Ajuda

R Console
WARNING: Rtools is required to build R packages, but is not currently installed.

Please download and install Rtools 3.5 from http://cran.r-project.org/bin/windows/Rtools/.
√ checking for file 'C:\Users\cesar\AppData\Local\Temp\RtmpukNfbj\remotes49a4175654dc\cesarofs$
- preparing 'agriwater':
√ checking DESCRIPTION meta-information ...
- checking for LF line-endings in source and make files and shell scripts
- checking for empty or unneeded directories
- building 'agriwater_1.0.0.tar.gz'

Installing package into 'C:/Users/cesar/Documents/R/win-library/3.5'
(as 'lib' is unspecified)
* installing *source* package 'agriwater' ...
** R
** byte-compile and prepare package for lazy loading
** help
*** installing help indices
converting help for package 'agriwater'
  finding HTML links ... done
  albedo_l8                               html
  albedo_modis                             html
  albedo_s2                                html
  evapo_l8                                  html
  evapo_l8_grid                             html
  evapo_l8t                                 html
  evapo_l8t_grid                             html
  evapo_modis                               html
  evapo_modis_grid                           html
  evapo_s2                                  html
  evapo_s2_grid                             html
  kc_l8                                     html
  kc_l8_grid                                html
  kc_l8t                                    html
  kc_l8t_grid                               html
  kc_modis                                  html
  kc_modis_grid                             html
  kc_s2                                     html
  kc_s2_grid                                html
  radiation_l8                              html
  radiation_l8_grid                         html
  radiation_l8t                             html
  radiation_l8t_grid                       html
  radiation_modis                           html
  radiation_modis_grid                     html
  radiation_s2                              html
  radiation_s2_grid                        html
  reflectance_l8                            html
** building package indices
** installing vignettes
** testing if installed package can be loaded
*** arch - i386
*** arch - x64
* DONE (agriwater)
In R CMD INSTALL
>
```

**Figura 45.** Visualização da tela de conclusão da instalação do pacote Agriwater no R utilizando a versão disponível no repositório GitHub.

Agora, ao se chamar o Agriwater, será utilizada a versão atualizada, instalada diretamente do GitHub.

Os autores construíram esse tutorial para encorajar o uso do pacote Agriwater, assim como o uso do software R, e disponibilizar o código-fonte aberto para que usuários intermediários e avançados do R possam aprimorar a implementação de acordo com suas necessidades de pesquisa, e constituir, assim, uma rica fonte de troca de experiências e aplicações.

A implementação do modelo Safer no pacote Agriwater permite que a modelagem seja feita em poucas linhas de código para cada conjunto de imagens de satélite e dados agrometeorológicos. Um próximo passo é trabalhar com o conceito de “data cubes”, segundo o qual se implementa uma sequência de comandos do pacote Agriwater em um “cubo de dados” formado pelos arquivos matriciais (raster) de imagens de satélite e dados agrometeorológicos. O conceito de “data cubes” é

uma tecnologia emergente que já foi aplicada na Embrapa em projetos como o Satveg ([www.satveg.cnptia.embrapa.br/](http://www.satveg.cnptia.embrapa.br/)).

## 7. Considerações finais

Este trabalho apresenta um pacote do software R chamado Agriwater, que faz a modelagem espacial da evapotranspiração real e do balanço de radiação no solo usando o algoritmo Safer. As modelagens são exportadas na extensão tif com a mesma resolução das imagens digitais usadas como dados de entrada. As imagens digitais e o arquivo shapefile com a área de estudo devem estar projetados em coordenadas em graus decimais. Espera-se que este pacote ofereça uma nova ferramenta para pesquisadores que buscam o estudo espacial de variáveis primordiais para gerenciar recursos hídricos e produtividade agrícola a partir de simples dados meteorológicos e de sensoriamento remoto. A utilização do satélite Sentinel-2 foi eficiente e produziu um resultado de alta resolução espacial (10 m) em escala de propriedade rural e de perímetros irrigados, assim como a utilização do Modis (250 m), que permite análises em escala regional. Programadores e usuários do R podem acessar o código-fonte do pacote Agriwater pelo repositório do GitHub e fazer seus próprios ajustes, para adequar a ferramenta às suas necessidades de pesquisa, o que torna esse pacote um projeto de contínuo aprimoramento e entrada no universo do software livre e colaborativo para pesquisa e desenvolvimento.

## 8. Agradecimentos

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq) pela bolsa de estudos para o autor César de Oliveira Ferreira Silva (Processos 143127/2017-9 e 133715/2019-1) e pelo fomento à instrumentação das redes de estações agrometeorológicas em Petrolina/PE e Juazeiro/BA (Processo 404229/2013-1). Também agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp, Processos 2014/04524-7 e 2016/09737-4), que foi fundamental para a instrumentação da área de estudo em Águas de Santa Bárbara, e o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), pelos dados agrometeorológicos na região do afloramento do Aquífero Guarani em São Paulo.

## 9. Referências

- ALBUQUERQUE FILHO, J. L. (Coord.). **Subsídios ao plano de desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo**. São Paulo, SP: CPLA; IPT, 2011. 102 p. (Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos, 5).
- ALLEN, R. G.; WALTER, I. A.; ELLIOTT, R. L.; HOWELL, T. A.; ITENFISU, D.; JENSEN, M. E.; SNYDER, R. L. (Ed.). **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration – Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, 2005. (Final report). Disponível em: <<https://epic.awi.de/id/eprint/42362/1/ascestzdetmain2005.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2019.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. de C.; NEALE, C. M. U.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the northwest of Sao Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, v. 1038, p. 263-270, 2014.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>>. Acesso em: 15 out. 2019.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Divisão de Geração de Imagens (DGI). **Os satélites LANDSAT 5, 7 e 8**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/landsat>>. Acesso em: 12 set. 2019.

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. de C.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. de C.; SILVA, G. B.; BOLFE, E. L. Application of agrometeorological spectral model in rice area in southern Brazil. **Proceedings of SPIE**, v. 9637, p. 96372B-1-96372B-8, 2015.

MAPBIOMAS. **Coleções MapBiomias**. Disponível em <[http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas\\_collection](http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas_collection)>. Acesso em: 8 ago. 2019.

PAIM, F. A. P. **Visualização de dados espacializados usando o R**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2017. 20 p. (Documentos, 15).

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; TEIXEIRA, A. H. C. Modelagem espacial da evapotranspiração e produtividade hídrica na porção paulista do afloramento do Aquífero Guarani entre 2013 e 2015. **Holos Environment**, v. 18, n. 2, p. 126-140, 2018.

SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MANZIONE, R. L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling & Software**, v. 120, p. 104497, 2019a.

SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Combining remotely sensed actual evapotranspiration and GIS analysis for groundwater level modeling. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, p. 462-478, 2019b.

TEIXEIRA, A. H. de C.; PADOVANI, C. R.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. de C.; GALDINO, S. Use of MODIS images to quantify the radiation and energy balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing**, v. 7, p. 14597-14619, 2015.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proceedings of SPIE**, v. 9239, p. 923900-1-923900-10, 2014.

TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.11, p.016030-11- 016030 -15, 2017.



