

9. ESTIMACIÓN DE ET A PARTIR DEL USO DE SENSORES REMOTOS E INFORMACIÓN METEOROLÓGICA USANDO EL MÉTODO PROPUESTO POR JACKSON

García A.G.^{a,b}, Campos A.N.^{a,c} and Di Bella C.M.^{a,b}

^a Instituto de Clima y Agua, CIRN. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

^b Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

^c Departamento de Electrónica, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRBA).

e-mail: aggarcia@cnia.inta.gov.ar

9.1. Relevancia de la aplicación

La evapotranspiración (ET) es el término usado para describir la cantidad de agua, expresada en mm/d, efectivamente perdida desde la superficie terrestre por evaporación y transpirada por las plantas. Luego de la precipitación, la ET es el mayor componente del ciclo del agua terrestre, devolviendo a la atmósfera más del 60% del agua recibida por precipitación (Mu et al. 2011). Debido a su importancia en el ciclo hidrológico se hace necesaria su precisa cuantificación para su uso tanto en la planificación y manejo de los recursos hídricos como en la producción agrícola. Técnicas convencionales tales como Bowen ratio, eddy covariance o lisímetros, han sido ampliamente usadas para estimar la ET sobre áreas homogéneas a escala de campo (e.g. Gowda et al. 2007). A pesar de su precisión, estos sistemas solo proveen información a escala local y son difíciles de extrapolar sobre áreas heterogéneas. A escalas regional y aún nacional, muchos países han adoptado el método propuesto por la FAO (Allen et al. 1998), basado en la ecuación de Penman-Monteith. Sin embargo esta metodología requiere la recopilación de una gran cantidad de información meteorológica y parámetros del tipo de la vegetación, muchas veces difíciles de obtener en forma representativa. En este sentido, actualmente los sensores remotos son reconocidos como una herramienta valiosa capaz de proveer estimaciones espacialmente explícitas de ET, tanto a escala local como regional (e.g. Di Bella et al. 2000, Coureault et al. 2003, Gowda et al. 2007, Mu et al. 2011).

9.2. Objective of the application

El objetivo de este trabajo fue desarrollar rutina automática para la generación de un producto de ET utilizando información espectral derivada de los sensores MODIS e información meteorológica. Aplicando el método simplificado (Carlson et al. 1995, Jackson et al. 1997), se estimó la ET para la región central de la Argentina con una resolución espacial de 1km² y temporal de 8 días.

9.3. Información utilizada

9.3.1. Datos locales - Regionales (in-situ)

Los datos iniciales usados para derivar la evapotranspiración (ET) son (Tabla 9.1):

- Temperatura de superficie (LST) derivado del producto MODIS Land Surface Temperature and Emissivity (MOD11A2): mod11a2.2009145.LST_Day_1km.tif;
- Reflectancia espectral de superficie derivado del producto MODIS Surface Reflectances (Bandas 1 y 2 MOD09A1): mod09a1.2009145.sur_refl_b01.tif (b01: banda 1 - rojo y b02: banda 2 - infrarrojo cercano);
- Temperatura del aire derivado de estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) e INTA: airtemp.2009145.tif;
- Modelo digital de elevaciones derivado de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM);
- Radiación neta: netrad.2009145.tif (producido por INTA siguiendo la aproximación propuesta por Kumar et al. (1997)).

Tabla 9.1. Características de las bases de datos

Producto	Resolución temporal	Resolución espacial	Unidades	Factor de escala	Fuente
Temperatura de superficie	8 días	1 km	Kelvin	0.02	MODIS ¹
Reflectancia de superficie (bandas 1 y 2)	8 días	500 m	Reflectancia	0.0001	MODIS ¹
Temperatura del aire	8 días	500 m	Celsius	-	INTA
Radiación neta	8 días	500 m	MJ m-2 d-1	-	INTA

(¹ Warehouse Inventory Search Tool available at <https://wist.echo.nasa.gov/api/> and 2 produced at INTA)

9.3.2. Información derivada de GEONETCast – DevCoCast

Aunque la metodología propuesta no utiliza información diseminada por GENETCast, INTA planea usar algunos de sus productos en futuras versiones del producto. Cabe destacar que una limitante al uso de los productos diseminados por GENETCast, es la cobertura parcial de área de interés.

9.4. Metodología y descripción del área de estudio

9.4.1. Methodology

Para estimar la ET a escala regional se utilizará el método original propuesto por Jackson et al. (1977), conocido como "Método Simplificado", el cual calcula la ET diaria (ETd en mmd-1) relacionando la radiación neta recibida por la superficie y su diferencia de temperatura con el aire subyacente según:

$$ETd = NRd - B(Ts - Ta)^n \quad (\text{Eq. 2})$$

donde NRd (mmd-1) es la radiación neta diaria, Ts (K) es la temperatura de superficie, Ta (K) es la temperatura del aire (cerca de la superficie), B (mmd-1K-1) y n son parámetros que dependen del tipo y el estado de la vegetación. Aunque es un método relativamente simple, ha sido usado en la estimación de la ET de cultivos agrícolas, forestaciones bosques nativos y pastizales, con muy buenos resultados (Seguin y Itier 1983, Lagouarde y Brunet 1991, Courault et al., 1994, Caselles et al., 1998, Nosetto et al., 2005). El producto de ET sera generado con una resolución especial de 1km y temporal de 8 días. La metodología completa es presentada en la Figura 9.1. La radiación neta, la cual puede ser separada en radiación neta de onda corta (Sn) y radiación neta de onda larga (Ln), es calculada usando la estimaciones de la radiación solar teórica recibida (St) y el albedo de superficie (α). La radiación neta de onda corta (Sn) es obtenida en forma semi-empírica como:

$$S_n = S_t (1 - \alpha) \quad (\text{Eq. 3})$$

donde St es la radiación teórica incidente de onda corta y α es el albedo de superficie.

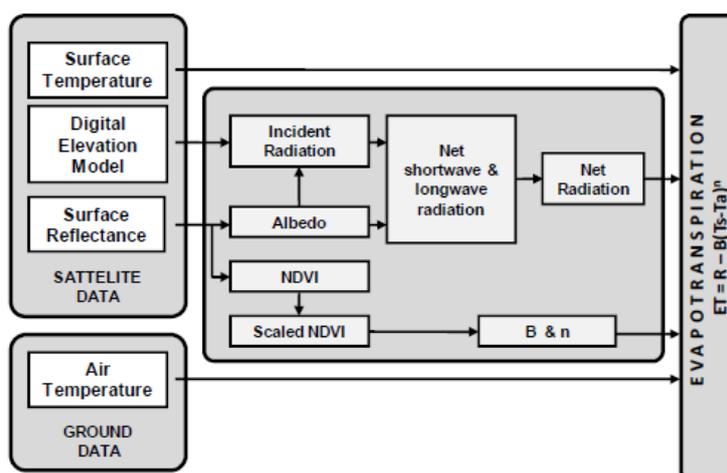


Figura 9.1. Diagrama de flujos de la cadena de procesamiento del producto propuesto.

Siguiendo a Kumar et al. (1997), St es calculada como la radiación solar potencial recibida bajo condiciones de cielo despejado en respuesta a la latitud y la elevación, usando un modelo digital de elevaciones e información de a latitud, para estudiar la variación en la radiación para diferentes orientaciones y pendientes del terreno. El albedo de superficie (α) es estimado usando los valores de reflectancia a partir de las bandas 1 (620-670 nm), 2 (841-876 nm), 3 (459-479 nm), 4 (545-565 nm), 5 (1230-1250 nm) and 7 (2105-2155 nm) del instrument MODIS-TERRA, basado en la aproximación propuesta por Liang (2000):

$$\alpha = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015 \quad (\text{Eq. 4})$$

donde α (1 to 7) son los valores de reflectancia a partir de las respectivas bandas de MODIS-TERRA. La radiación neta de onda larga (Ln) es estimada empíricamente de acuerdo a Granger y Gray (1990). Asumiendo que las variaciones en la humedad atmosférica son controladas por la energía disponible en la superficie terrestre (NR), para condiciones de cielo despejado y a escala diaria, Ln puede ser estimado a partir de la radiación de onda corta incidente (St) como:

$$Ln = -4.25 - 0.24St \quad (\text{Eq. 5})$$

Debido a la falta de validación de esta estimación se planea usar en futuras versiones del producto, información diseminada vía GEONETCast, tal como Downward Surface Short-wave Flux and Downward Surface Long-wave Flux, para estimar la radiación neta siguiendo la metodología propuesta por LSA-SAF en su producto de ET (<http://landsaf.meteo.pt>). Entonces, ambas aproximaciones serán comparados y se decidirá utilizar el método que mejor se ajuste a datos de radiación neta tomados a campo.

La temperatura de superficie (T_s) es obtenida de del producto de MODIS Land Surface Temperature and Emissivity, mientras que la temperatura del aire cerca de la superficie (T_a) es derivada de las estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio.

El parámetro B representa la conductancia promedio diaria del flujo de calor sensible y n es un factor de corrección para condiciones no neutrales de estabilidad atmosférica (Kalma et al., 2008). Mientras B depende de la rugosidad de la superficie, n depende de la estabilidad de la atmósfera y ambos coeficientes están estrechamente relacionados con la cantidad de vegetación o la fracción de suelo cubierto por la vegetación, la cual puede ser estimada a partir del índice de vegetación escalado, conocido como Scaled Normalized Vegetation Index or NDVI* (Carlson et al., 1995), donde:

$$NDVI^* = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (\text{Eq. 6})$$

El Índice de Vegración de diferencia Normalizada (NDVI) también puede ser obtenido del producto NDVI de MODIS. Finalmente, B y n serán calculados siguiendo las ecuaciones propuestas por Carlson et al. (1995), donde:

$$B = 0.0109 + 0.051(NDVI^*) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$n = 1.067 - 0.372(NDVI^*) \quad (\text{Eq. 8})$$

9.4.2. Study Area

El área de interés (Figura 9.2) incluye la porción central del territorio argentino. Esta área abarca los territorio de 9 provincias, incluyebdo: Buenos Aires, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba, La Pampa, San Luis, San Juan, La Rioja, Rio Negro and Neuquén. De este a oeste, esta región presenta amplios gradientes climáticos, de tipos de suelo y usos de la tierra.

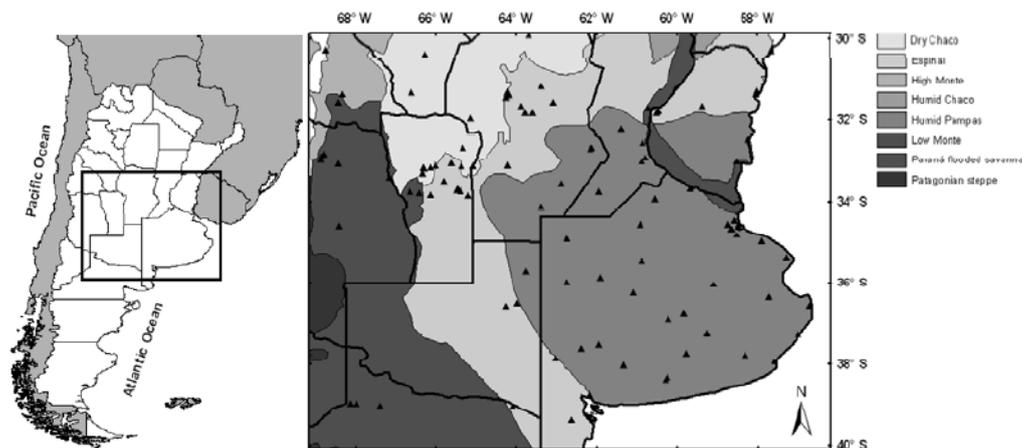


Figura 9.2. Área de estudio. Los triángulos muestran la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para estimar la ET.

9.5. Pre-procesamiento de la información

9.5.1. Información derivada de sensors remotos

Como se mencionó más arriba, en la ecuación 2 la temperatura de superficie (T_s), el NDVI (necesario para calcular los coeficientes B y n) y los valores de reflectancia espectral de superficie (necesario para calcular el albedo en la estimación de la radiación neta) son obtenidos de los productos MODIS-TERRA. Específicamente, se hace uso de los productos Surface Spectral Reflectance 8-day L3 Global 500m (MOD9A1) y Land Surface Temperature/Emissivity 8-day L3 Global 1km (MOD11A2). Para cubrir el área de interés en su totalidad fueron utilizados dos escenas MODIS: h12v12 y h12v13.

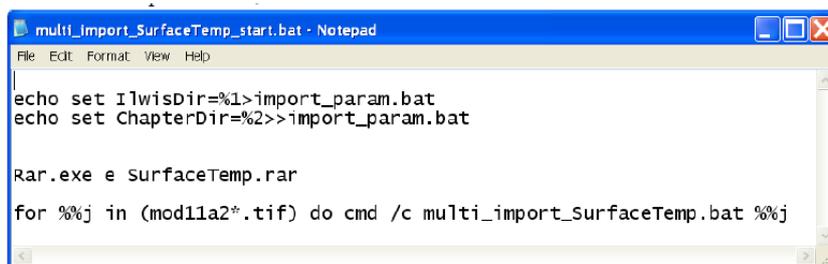
La temperatura de superficie necesita ser remuestreada para obtener un tamaño de píxel de 500m, en coincidencia con la resolución espacial del producto MOD09A1.

Antes de arribar al cálculo de ET es necesario importar y pre-procesar las imágenes utilizadas.

Copie y descomprima en su disco local $c:\backslash$ el ejercicio (chapter9.zip). En su disco local $c:\backslash$ usted ahora debe tener una carpeta llamada "chapter9" conteniendo los siguientes subdirectorios: 'DataInput' y 'Working_Dir'. La carpeta DataInput contiene los siguientes sub-directorios: '1_SurfaceTemp', '2_SurfaceReflect', '3_AirTemp' and '4_NetRad'. Abra el ILWIS y use el navegador para dirigirse al directorio "C:\Chapter9\Working_Dir".

9.5.1.1. Importar y re-escalar el producto LST de MODIS

Para importar todas las imágenes necesarias de LST MODIS (mod11a2*.tif) con el propósito de estimar ET para un período de tiempo usando el menú contextual de ILWIS puede ser algo incómodo. Use el explorador de Windows para conocer el contenido del subdirectorio: "C:\chapter9\DataInput\1_SurfaceTemp". Allí se encuentran 4 archivos. El archivo "SurfaceTemp.rar" contiene las imágenes originales de temperatura de superficie (LST) en formato TIFF para 4 fechas consecutivas. Con el propósito de importar esas imágenes en forma automática, en el mismo directorio se encuentran dos archivos *.bat "multi_import_SurfaceTemp_start.bat" and "multi_import_SurfaceTemp.bat". El contenido de esos archivos puede verse en las figuras 9.3 y 9.4. Haga click derecho en el archivo "multi_import_SurfaceTemp_start.bat" y seleccione editar para visualizar el contenido del archivo.



```

multi_import_SurfaceTemp_start.bat - Notepad
File Edit Format View Help
echo set IlwisDir=%1>import_param.bat
echo set ChapterDir=%2>>import_param.bat

Rar.exe e SurfaceTemp.rar

for %%j in (mod11a2*.tif) do cmd /c multi_import_SurfaceTemp.bat %%j

```

Figura 9.3. Archivo "batch" para iniciar la importación de múltiples imágenes en forma automática.

Este archivo establece en su primera línea se creará un nuevo archivo *.bat, llamado "import_param.bat" especificando la ubicación de su directorio ILWIS. La segunda línea agrega otro archivo *.bat, "import_param.bat", especificando la ubicación del directorio donde usted ha descomprimido el ejercicio. La línea 3 especifica que el contenido del archivo "SurfaceTemp.rar" debe ser extraído y escrito en el mismo directorio. La última línea establece que para todas las imágenes (ahora descomprimidas) llamadas "mod11a2*.tif", otra rutina de procesamiento (archivo "multi_import_SurfaceTemp.bat") será ejecutada.

```

multi_import_SurfaceTemp.bat - Notepad
File Edit Format View Help
@echo off
echo rem: Import Land Surface Temperature (°C) from MOD11A2 MODIS
product
echo rem: sample file name = mod11a2.2009145.LST_Day_1km.tif

echo on

set originalfilename=%1
set shortfilename1=%originalfilename:~0,15%
set shortfilename2=%originalfilename:~8,7%

call import_param.bat

"%ILwisDir%\Extensions\Geonetcast-Toolbox\GDAL\bin\gdal_translate.exe"
-of ILWIS "%ChapterDir%\DataInput\1_SurfaceTemp\%originalfilename%"
"%ChapterDir%\DataInput\1_SurfaceTemp\%shortfilename1%.imported.mpr"

"%ILwisDir%\ilwis.exe" -c "%ChapterDir%\Working_Dir\SurfaceTemp_%
shortfilename2%.mpr{dom=VALUE.dom;vr=-10.0:100.0:0.01}":( "%
ChapterDir%\DataInput\1_SurfaceTemp\%shortfilename1%.imported" *0.02)-
273.15

del %originalfilename%
del *imported.mpr.aux.xml
del mod11a2*.mp#
del mod11a2*.mpr

```

Figura 9.4. Archivo "batch" para importar las imágenes de temperatura de superficie.

Esta rutina de procesamiento, la cual es ejecutada luego de que todas las imágenes son descomprimidas, comienza con un comando 'set'. Las imágenes son procesadas siguiendo esta rutina de a una por vez en función de su nombre de archivo (%1). Dos porciones del nombre del archivo es usado para el procesamiento. EL nombre sin extensión ('shortfilename1') y la fecha de generación del producto ('shortfilename2'). El próximo comando llama el archivo "import_param.bat" que ha sido creado en el paso anterior, definiendo la ubicación de "ILwisDir" y "ChapterDir". La próxima línea ejecuta el programa 'gdal_translate.exe' para importar a formato ILWIS la imagen *.tif que está siendo procesada, y la guarda en el mismo directorio. La próxima línea escala la imagen importada alpicando un factor de escala de 0.02 y una ordenada al origen de 273.15, convirtiendo las unidades de temperatura de Kelvin a Celsius. Note que la imagen final convertida, también es guardada en el directorio "Working_Dir" (en este caso C:\Chapter9\Working_Dir).

Ahora dirijase al menú Inicio de Windows, selecciones Ejecutar y escriba 'command.exe' para correr los archivos *.bat. En la nueva ventana de comandos abierta, navege hasta su directorio de trabajo (en este caso 'C:\chapter9\DataInput\1_SurfaceTemp') y ejecute el archivo *.bat de importación de las imágenes de temperatura de superficie. Para conocer los comandos necesarios para navegar hasta la ruta de su directorio de trabajo, y otros comandos DOS vea la Figura 9.5.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows XP [Version 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

M:\>c:

C:\>cd C:\chapter9\DataInput\1_SurfaceTemp

C:\chapter9\DataInput\1_SurfaceTemp>multi_import_SurfaceTemp_start.bat c:\ilwis c:\chapter9

```

Figura 9.5. Iniciando la importación desde una ventana de comandos DOS.

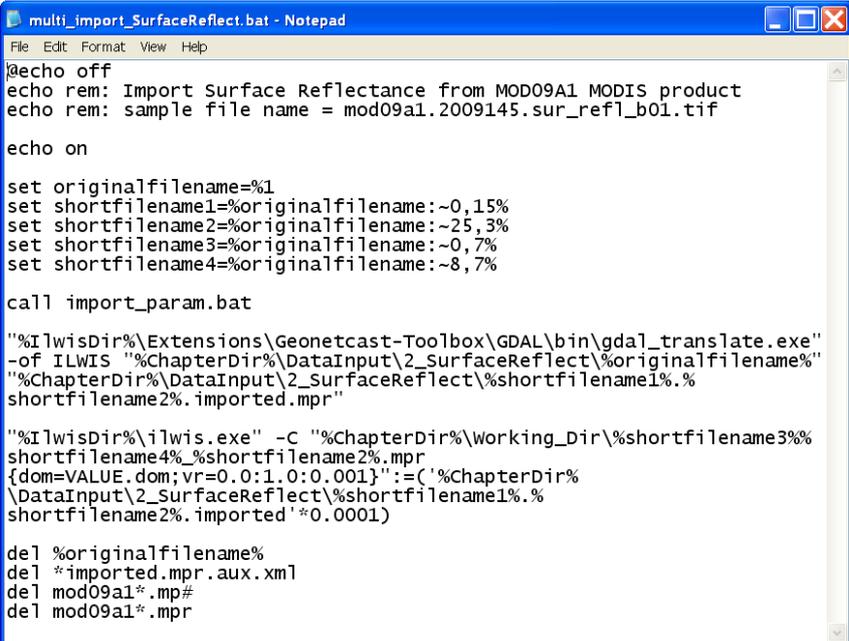
Note que en la línea de comandos, el archivo "multi_import_SurfaceTemp_start.bat" será ejecutado usando dos parámetros. El primer parámetro especificado es "C:\ilwis". Este parámetro indica la ubicación del directorio ILWIS en el sistema; en su caso este directorio puede ser diferente. En ese caso, usted debe especificar el directorio correcto. El segundo parámetro es "c:\chapter9"; éste indica la ubicación del directorio donde se encuentra el ejercicio. Si ha instalado el ejercicio en otro directorio, usted necesita corregir este parámetro. Una vez verificado que los parámetros son correctos, presionar "enter" para ejecutar la rutina de procesamiento.

Una vez que la importación haya finalizado, seleccionar desde la ventana principal de ILWIS la opción "Window => Refresh", entonces podrá notar que han sido creados cuatro mapas de temperatura. Luego haga doble click en uno de los mapas, por ejemplo "SurfaceTemp_2009145", use "Pseudo" como representación y presione OK para visualizar el mapa. Muévase sobre el mapa con el mouse, manteniendo presionado el botón izquierdo, para ver los valores de temperatura.

9.5.1.2. Importar y escalar el producto Reflectancia de Superficie de MODIS

Para importar todas las imágenes necesarias de Reflectancia de Superficie de MODIS (mod09a1*.tif), repita el procedimiento descrito arriba y ahora use los datos del sub-directorio 'C:\chapter9\DataInput\2_SurfaceReflect'. Tenga en cuenta que ahora en la línea de comandos debe escribir "multi_import_SurfaceReflect_start.bat c:\ilwis c:\chapter9". El archivo "multi_import_SurfaceReflect.bat" permite importar las imágenes *.tif a formato ILWIS y escalar los valores de reflectancia (ver también Tabla 9.1 y Figura 9.6).

Una vez que la importación haya finalizado, seleccionar desde la ventana principal de ILWIS la opción "Window => Refresh", entonces podrá notar que han sido creados cuatro mapas de reflectancia mod09a12009***_b01 y mod09a12009***_b02 maps (***) = día juliano). Luego haga doble click en uno de los mapas, por ejemplo "mod09a12009145_b01", use "Pseudo" como representación y presione OK para visualizar el mapa. Muévase sobre el mapa con el mouse, manteniendo presionado el botón izquierdo, para ver los valores de reflectancia.



```
multi_import_SurfaceReflect.bat - Notepad
File Edit Format View Help
@echo off
echo rem: Import Surface Reflectance from MOD09A1 MODIS product
echo rem: sample file name = mod09a1.2009145.sur_refl_b01.tif

echo on

set originalfilename=%1
set shortfilename1=%originalfilename:~0,15%
set shortfilename2=%originalfilename:~25,3%
set shortfilename3=%originalfilename:~0,7%
set shortfilename4=%originalfilename:~8,7%

call import_param.bat

"%IlwisDir%\Extensions\Geonetcast-Toolbox\GDAL\bin\gdal_translate.exe"
-of ILWIS "%ChapterDir%\DataInput\2_SurfaceReflect\%originalfilename%"
"%ChapterDir%\DataInput\2_SurfaceReflect\%shortfilename1%.%
shortfilename2%. imported.mpr"

"%IlwisDir%\ilwis.exe" -c "%ChapterDir%\Working_Dir\%shortfilename3%
shortfilename4%.%shortfilename2%.mpr
{dom=VALUE.dom;vr=0.0:1.0:0.001}"=( '%ChapterDir%
\DataInput\2_SurfaceReflect\%shortfilename1%.%
shortfilename2%. imported '*0.0001)

del %originalfilename%
del *imported.mpr.aux.xml
del mod09a1*.mp#
del mod09a1*.mpr
```

Figura 9.6. Archivo "batch" para importar las imágenes de Reflectancia de Superficie

9.5.2. Información Meteorológica

9.5.2.1. Importación del producto de temperatura del aire

Se hace uso de registros de temperatura del aire a 1,5 m, provenientes de estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio. La temperatura del aire de cada estación, con una resolución temporal diaria, fue promediada cada 8 días. Esta información puntual así resumida fue interpolada para cubrir la totalidad del área de estudio, con el objetivo de obtener información de temperatura del aire con la misma resolución espacial que el resto de las variables derivadas de sensores remotos (500 m).

Para importar todas las imágenes de Temperatura de Aire necesarias (airtemp*.tif), repita el procedimiento descrito arriba para importar los productos MODIS y ahora use los datos del sub-directorio 'C:\chapter9\DataInput\3_AirTemp'. Tenga en cuenta que ahora en la línea de comandos debe escribir "multi_import_AirTemp_start.bat c:\ilwis c:\chapter9". En este caso, la rutina "multi_import_AirTemp.bat" solo convierte a formato ILWIS las imágenes tif (ver Figura 9.7).

Una vez que la importación haya finalizado, seleccionar desde la ventana principal de ILWIS la opción "Window => Refresh", entonces podrá notar que han sido creados cuatro mapas de temperatura del aire. Luego haga doble click en uno de los mapas, por ejemplo "airtemp_2009145", use "Pseudo" como representación y presione OK para visualizar el mapa. Muévase sobre el mapa con el mouse, manteniendo presionado el botón izquierdo, para ver los valores de temperatura del aire.

```

multi_import_AirTemp.bat - Notepad
File Edit Format View Help
@echo off
echo rem: Air Temperature (°C) product from ground meteorological
stations
echo rem: sample file name = airtemp.2009169.tif

echo on

set originalfilename=%1
set shortfilename=%originalfilename:~0,15%
set shortfilename1=%originalfilename:~0,7%
set shortfilename2=%originalfilename:~8,7%

call import_param.bat

"%IlwisDir%\Extensions\Geonetcast-Toolbox\GDAL\bin\gdal_translate.exe"
-of ILWIS "%ChapterDir\DataInput\3_AirTemp\%originalfilename%" "%
ChapterDir\Working_Dir\%shortfilename1%\%shortfilename2%.mpr"

del %originalfilename%
del "%ChapterDir\Working_Dir\*.mpr.aux.xml"

```

Figura 9.7. Archivo “batch” para importar las imágenes de Temperatura del Aire

9.5.2.2. Importación del producto de Radiación Neta

Para importar todas las imágenes necesarias de Radiación Neta (netrad*.tif), repita el procedimiento descrito arriba para importar los productos MODIS y ahora use los datos del sub-directorio 'C:\chapter9\DataInput\4_NetRad'. El último comando en el archivo 'multi_import_NetRad.bat' reemplaza los valores -999.9 por un dígito que representa la ausencia de datos, en el caso de ILWIS ese dígito es "?". El reemplazo es hecho utilizando una función IFF (ver Figura 9.8).

```

multi_import_NetRad.bat - Notepad
File Edit Format View Help
@echo off
echo rem: Import Net Radiation (MJ/m2.d) product
echo rem: sample file name = netrad.2009145.tif

echo on

set originalfilename=%1
set shortfilename=%originalfilename:~0,14%
set shortfilename1=%originalfilename:~0,6%
set shortfilename2=%originalfilename:~7,7%

call import_param.bat

"%IlwisDir%\Extensions\Geonetcast-Toolbox\GDAL\bin\gdal_translate.exe"
-of ILWIS "%ChapterDir\DataInput\4_NetRad\%originalfilename%" "%
ChapterDir\DataInput\4_NetRad\%shortfilename%.imported.mpr"

"%IlwisDir%\ilwis.exe" -C "%ChapterDir\Working_Dir\%shortfilename1%
\%shortfilename2%.mpr{dom=VALUE.dom;vr=0.0:100.0:0.001}":=IFF('%
ChapterDir\DataInput\4_NetRad\%shortfilename%.imported'=-999.9,0,'%
ChapterDir\DataInput\4_NetRad\%shortfilename%.imported')

del %originalfilename%
del *.imported.mpr.aux.xml
del netrad.*.mpr
del netrad.*.mp#

```

Figura 9.8. Archivo “batch” para importar las imágenes de Radiación Neta

Una vez que la importación haya finalizado, seleccionar desde la ventana principal de ILWIS la opción “Window => Refresh”, entonces podrá notar que han sido creados cuatro mapas de temperatura del aire. Luego haga doble click en uno de los mapas, por ejemplo “netrad_2009145”, use “Pseudo” como representación y presione OK para visualizar el mapa. Muévase sobre el mapa con el mouse, manteniendo presionado el botón izquierdo, para ver los valores de radiación neta.

9.5.2.3. Remuestreo del producto LST de MODIS

Luego de importar todos los mapas de temperatura de superficie a formato ILWIS, es necesario resamplear esas imágenes para obtener un tamaño de píxel de 500 m. Para hacer esto es necesario tipear las siguientes expresiones en la línea de comandos de la ventana principal de ILWIS:

```
Surfacetemp_2009145r.mpr{dom=VALUE.dom;vr=-100.00:100.00:0.01}:=MapResample(SurfaceTemp_2009145,airtemp_2009145.grf,nearest)
```

```
Surfacetemp_2009153r.mpr{dom=VALUE.dom;vr=-100.00:100.00:0.01}:=MapResample(SurfaceTemp_2009153,airtemp_2009145.grf,nearest)
```

```
Surfacetemp_2009161r.mpr{dom=VALUE.dom;vr=-100.00:100.00:0.01}:=MapResample(SurfaceTemp_
```

2009161,airtemp_2009145.grf,nearest)

Surfacetemp_2009169r.mpr{dom=VALUE.dom;vr=-100.00:100.00:0.01}:=MapResample(SurfaceTemp_2009169,airtemp_2009145.grf,nearest)

Cuando haya finalizado haga doble click en uno de los mapas creados, por ejemplo "surfacetemp_2009145r", use "Pseudo" como representación y presione OK para visualizar el mapa. Muévase sobre el mapa con el mouse, manteniendo presionado el botón izquierdo, para ver los valores de temperatura de superficie.

9.6. Cálculo de ET

9.6.1. Cálculo de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Calcular el NDVI usando los valores de reflectancia de los canales rojo (b01) e infrarrojo cercano (b02) obtenidos del producto Reflectancia de Superficie de MODIS. Para hacer esto, seleccionar de la menú principal de ILWIS las opciones "Operations => Raster Operations => Map Calculation". Típear el algoritmo correspondiente al cálculo del NDVI (Figura 9.9), especificar un nombre de salida (en este caso "ndvi_2009145"), seleccionar como "Value" como dominio ("Domain"), especificar el rango de valores ("Value Range") entre 0 y 1, y definir la precisión de los valores ("Precision") en 0.001. Ejecutar el comando presionando 'Show'. Visualizar el mapa creado ("ndvi_2009145") usando 'NDVI1' como representación. Repetir el mismo procedimiento para calcular el NDVI del resto de las fechas: 153, 161 y 169. Para realizar el procesamiento en forma eficiente, se aconseja hacer uso del historial de la línea de comandos del ILWIS. Solo necesita cambiar el día juliano en la ecuación, entonces presione 'enter' para ejecutar el comando y calcular el nuevo mapa de NDVI.

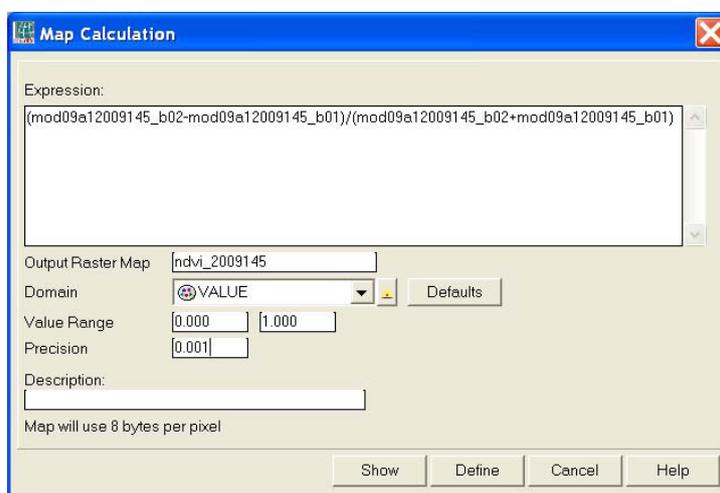


Figura 9.9. Ventana 'Map calculation' para calcular el NDVI

9.6.2. Crear Listas de mapas en ILWIS ('Map Lists')

Para calcular la ET de varias fechas en forma simultánea, es conveniente crear listas de mapas o 'Map Lists'. Con el propósito de ejecutar una misma operación varias veces, es necesario crear una lista de mapas para cada uno de los productos importados que serán utilizados en el cálculo de ET (surfacetemp_resampled, ndvi, airtemp and netrad). Para crear una lista de mapas, seleccionar desde el menú principal de ILWIS la opción "File => Create => Map List". Seleccionar la lista de capas (mapas) en el orden apropiado para incluir en la lista de mapas, presionar el botón ">" para mover los mapas a la lista de la derecha, especificar un nombre de salida para la lista de mapas (en este caso usar "NDVI"), y ejecutar el comando presionando OK (Figura 9.10). Repetir el mismo procedimiento para crear una lista de mapas para cada dato de entrada, es decir para "surftemp", "airtemp" y "netrad".

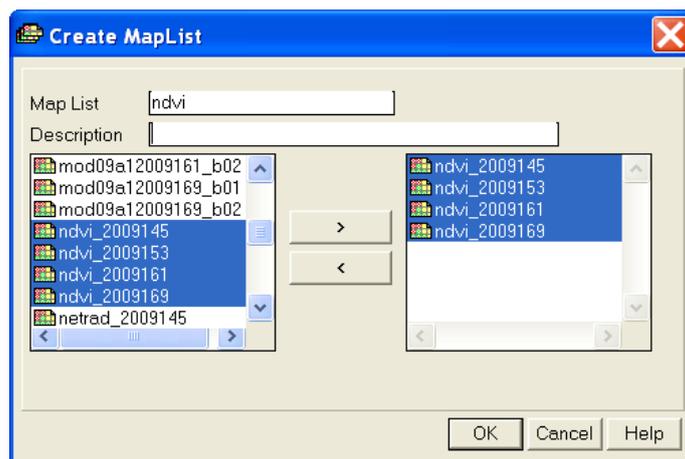


Figura 9.10. Ventana Crear lista de mapas

9.6.3. Cálculo del NDVI escalado (SNDVI)

Para calcular el SNDVI a partir de la lista de mapas, seleccionar desde el menú principal de ILWIS la opción "Operations => Raster Operations => Map List Calculation". Típear el algoritmo del mismo modo que en la Figura 9.11: $(@1 - \text{MAPMIN}(@1)) / (\text{MAPMAX}(@1) - \text{MAPMIN}(@1))$. Especificar un nombre a la lista de mapas de salida (en este caso 'SNDVI') y ejecutar el comando presionando 'Show'. Una vez que el cálculo de la lista de mapas de NDVI escalado finalizó, hacer doble click en uno de los mapas, por ejemplo "sndvi_1", usar "Pseudo" como representación y presionar OK para visualizar el mapa. Muévase sobre el mapa con el mouse, manteniendo presionado el botón izquierdo, para ver los valores de SNDVI de superficie.

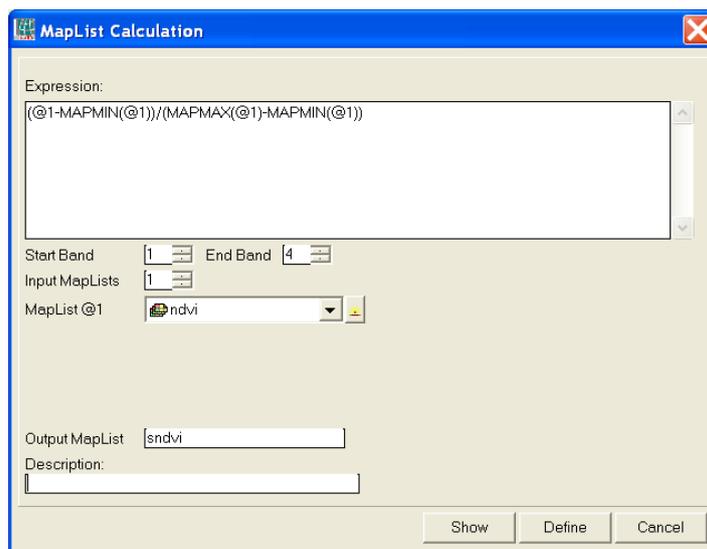


Figura 9.11. Cálculo de la lista de mapas de SNDVI

9.6.4. Calcular B y n

Para calcular B y n a partir de la lista de mapas de 'sndvi', seleccionar del menú principal de ILWIS la opción "Operations => Raster Operations => Map List Calculation". Típear el algoritmo como se indica en la Figura 9.12 (izquierda): $0.0109 + (0.051 * @1)$. Especificar un nombre a la lista de mapas de salida (en este caso 'B') y ejecutar el comando presionando 'Show'. Siga el mismo procedimiento para calcular 'n', pero ahora aplique la fórmula como se indica en la Figura 9.12 (derecha): $1.067 - (0.372 * @1)$. Visualizar los resultados obtenidos utilizando 'Pseudo' como Representación.

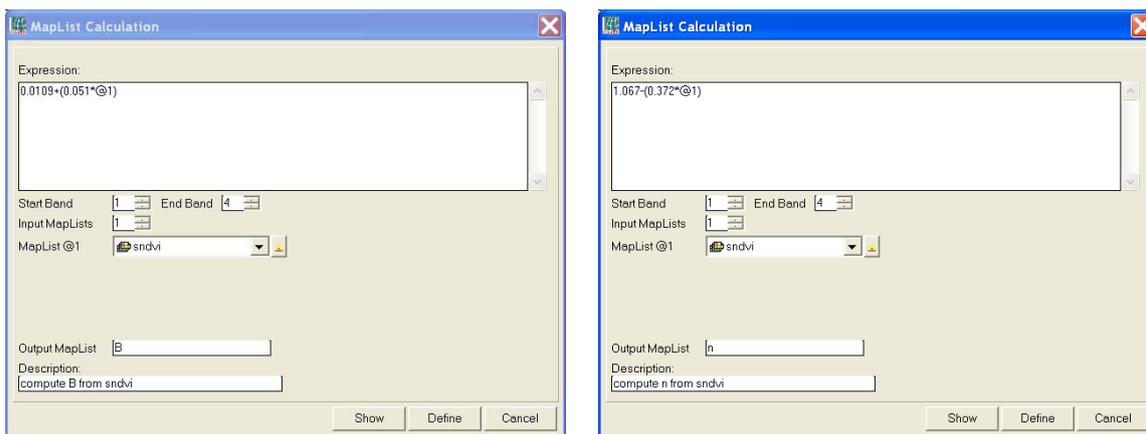


Figura 9.12. Cálculo de la lista de mapas de B (izquierda) y n (derecha)

9.6.5. Calcular diferencias de temperature

Seguir el mismo procedimiento descrito arriba para calcular las diferencias de temperatura entre las listas de mapas de temperatura de superficie (“surftemp”) y temperatura del aire (“airtemp”). Seleccionar del menú principal de ILWIS la opción “Operations => Raster Operations => Map List Calculation”. Tippear el algoritmo como se indica en la Figura 9.13. En este caso use dos listas de mapas de entrada (‘Input MapList’), “surftemp” como lista 1 y “airtemp” como lista 2. Especificar un nombre a la lista de mapas de salida (en este caso ‘tempdif’) y ejecutar el comando presionando ‘Show’. Visualizar los resultados obtenidos utilizando ‘Pseudo’ como Representación.

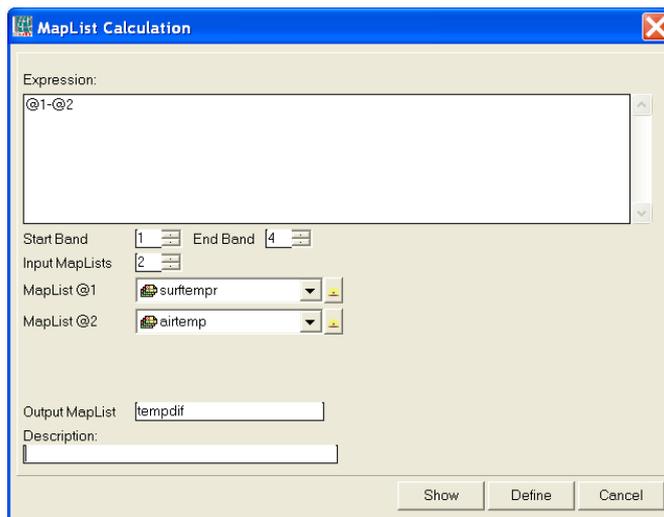


Figura 9.13. Cálculo de la lista de mapas de ‘tempdif’

9.6.6. Calcular ET

Usando el calculador de listas de mapas (‘Map List Calculator’) aplicar la siguiente fórmula para calcular la evapotranspiración en mm d-1 (Figura 9.14): $(@1*0.408)-(@2*(POW(@3,@4)))$. Note que los valores de radiación neta son afectados por el factor 0.408 (inversa del calor latente de vaporización) para convertir las unidades de MJ.m-2.d-1 a mm.d-1.

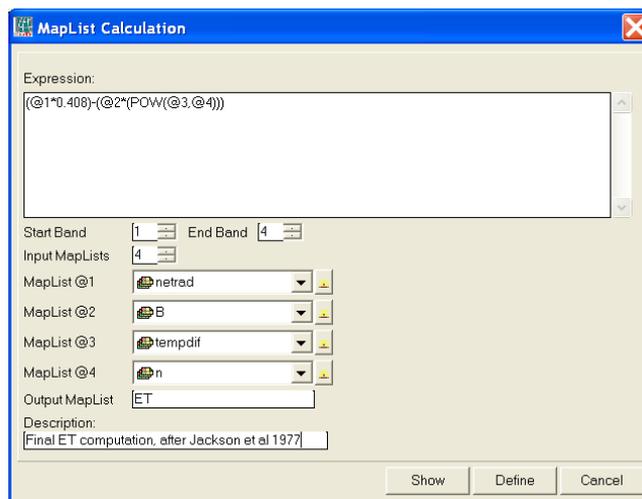


Figura 9.14. Cálculo de la lista de mapas de 'ET'

Visualizar los resultados obtenidos utilizando 'Pseudo' como Representación. Para el día juliano 153, el mapa de ET debería parecerse al de la Figura 9.15. Desde la ventana activa seleccionar la opción "Layers => Add Layer", navegar hasta la ubicación "Extensions\Geonetcast-Toolbox\util\maps" y seleccionar el vector "country_02", destildar la opción "Info", activar la opción "Boundary Only" y presionar "OK".

9.7. Verificar los resultados de ET

La validación de los valores de ET es una tarea complicada. Al menos para evaluar si los resultados obtenidos tienen sentido, fueron calculados los valores de evapotranspiración potencial (ETP) de cada estación meteorológica siguiendo la metodología Penman. Con este propósito se utilizaron datos de temperatura del aire, velocidad del aire a 1,5 m, humedad relativa y heliofanía efectiva. Los valores máximos diarios de ETP para cada período de 8 días fueron calculados. Estos valores pueden ser comparados con las estimaciones de ET realizadas en este ejercicio.

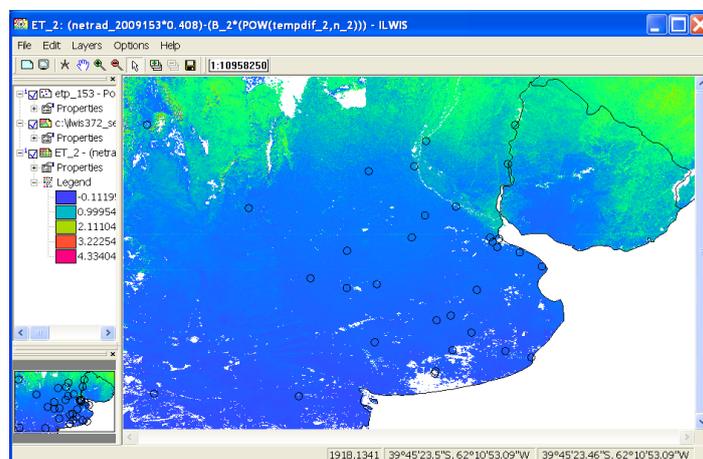


Figura 9.15. Mapa de ET para el día juliano 153

Abrir la tabla "etp_153" y revisar su contenido. Usted notará que existen diferencias notables entre los valores de ET calculados por ambas aproximaciones (ETP y ET derivada de sensores remotos). En este caso, sólo se usarán aquellas estaciones en que ambos valores son similares. Típear la siguiente ecuación en la línea de comandos:

```
finalPet=iff(mean_ETP_Penmanmean_ETP_Thorntwaite<0.5,mean_ETP_Penman,?)
```

Presionar 'Enter' para ejecutar la operación, aceptar las opciones por defecto y presionar 'OK'. Una nueva columna será creada y los valores de esta columna podrán ser comparados con los valores de ET estimados mediante sensores remotos para el día juliano 153, o ET_2 de la lista de mapas. Cerrar la tabla. Convertir la tabla a un mapa de puntos. Para hacer esto, haga click derecho sobre la tabla "etp_153" y seleccione la opción "Table Operations => Table to Point Map". Como sistema de coordenadas seleccione "airtemp_2009145" y como mapa de salida ingrese el nombre "etp_153". Presione "Show" para ejecutar la operación. Visualice el mapa creado y cierre la ventana. Desde la ventana de mapa activa utilizada para visualizar el mapa "ET_2" seleccione la opción "Layers=> Add

Layer”, navegue en el directorio ILWIS, seleccione el mapa de puntos recién creado “etp_153”, active en el menú “Display Options” la opción “Attribute”, seleccione la columna “final PET” y presione OK. Desde la ventana de mapa activa, seleccione “File => Open Pixel Information”, muévase con el mouse sobre los puntos en el mapa y observe los resultados en la tabla de información de píxel (“Pixel information table”). Cierre la capa de mapa activa. Convierta el mapa de puntos “etp_153” a formato raster. Haga click derecho con el mouse sobre el mapa de puntos “etp_153”, y seleccione “Rasterize => Point to Raster”. Seleccione “airtemp_2009145” como sistema de referencia (“Georeference”) y como nombre de salida del mapa raster ingrese “etp_153”. Presione “Show” para ejecutar la operación. Usted puede acercar la vista del mapa usando la herramienta de “zoom” para ver los resultados.

Desde el menú principal de ILWIS seleccionar “Operations => Raster Operations => Cross”. Como primer mapa elegir “ET_2”, como Segundo mapa seleccionar la columna de atributos “finalPet”. Para hacer esto haga click en el signo “+” delante del mapa “etp_153” para seleccionar la columna apropiada. Como tabla de salida especificar. Como tabla de salida (“Output Table”) ingresar “compareETp_Eta” y presionar ‘Show’. Desde el menú de la nueva tabla creada seleccionar el ícono “Graph”, como eje X elegir “map2” (valor de ETP (Penman) resultante de la tabla de atributos) y como eje Y seleccionar “ET_2”, y presionar OK. Haga doble click en el ícono X-Axis para especificar el rango de valores del eje (0 a 2, intervalo: 0,5) y presione OK. Repita la operación para el eje Y. Destilde la opción “Legend”. Haga doble click sobre el ícono “map2 * ET_2” y cambie el color transparente por rojo. El gráfico resultante debería parecerse al de la Figura 9.16.

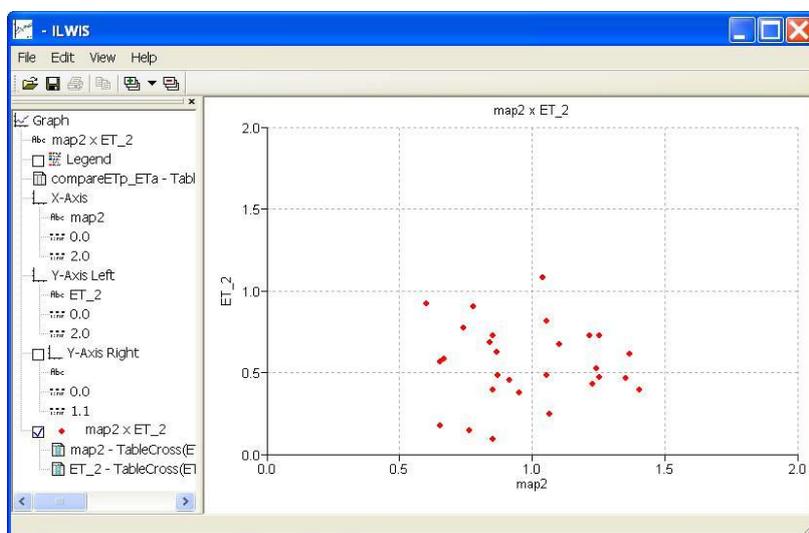


Figura 9.16. Comparación de los valores de ET estimados con sensores remotos y la ETP calculada para el día juliano 153

9.8. Conclusiones

En la Figura 9.16 puede verse que los valores de ET estimados mediante el uso de sensores remotos son menores a la ETP calculada con datos meteorológicos, lo cual coincide con lo esperado.

Con el propósito de validar las estimaciones de ET, INTA usará datos de ET medidos mediante el uso de torres “eddy covariance” y cálculos de ET a partir de información meteorológica. Actualmente el INTA tiene acceso a datos de ET medidos con tres torres eddy covariance, ubicadas en sitios cubiertos por coberturas vegetales representativas (bosques nativos, forestaciones y agricultura). Además, en el futuro se utilizarán datos meteorológicos provenientes de 150 estaciones instaladas por el INTA a lo largo de todo el territorio argentino.

Para considerar posibles errores en los valores de las variables de entrada utilizadas (NR, B, n and Ts-Ta) para el cálculo de ET, se testeará la sensibilidad de las estimaciones de ET explorando los posibles efectos de valores extremos de dichas variables.

REFERENCES

- Allen RG, LS Pereira, D Raes, M Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 290.
- Carlson TN, W.J. Capehart, R.R. Gillies (1995): A new look at the Simplified Method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 54: 161-167.
- Caselles V, M.M. Artigao, E. Hurtado, C. Coll, and A. Brasa (1998): Mapping actual evapotranspiration by combining Landsat TM and NOAA-AVHRR images: Application to the Barrax Area, Albacete, Spain. *Remote Sensing of Environment* 63:1-10.
- Courault D, B. Seguin, A. Olioso (2003): Review to estimate evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models. ICID. Workshop on Remote sensing of ET for large regions. 17 Sept 2003.
- Di Bella CM, CM Rebella y JM Paruelo. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 21, Nº 4, 791–797.
- Gowda P.H, Chavez J.L, Colaizzi P.D, Evett S.R, Howell T.A and Tolk J.A (2007): Remote sensing based energy balance algorithms for mapping ET: current status and future challenges. *Trans Am Soc Agric Biol Engineers* 50(5):1639–1644
- Granger R, D.M. Gray (1990): A net radiation model for calculating daily snowmelt in open environments. *Nordic Hydrology*, 21: 217–234.
- Jackson R.D., R.J. Reginato, S.B. Idso (1977): Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13, 651–656.
- Kalma J.D, T.R McVicar and M.F McCabe. 2008. Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data. *Surv Geophys* (2008) 29:421–469.
- Kumar L, K.A. Skidmore and E. Knowles (1997): Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *Int. J. Geographical Information Science*, 1997, vol. 11, no. 5, 475-497.
- Lagouarde J.P, and Y. Brunet (1989): Spatial integration of surface latent heat flux and evaporation mapping. *Advances in Space Research* 9:259-264.
- Mu Q, Z Maosheng, SW Running. 2011. Improvement to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote sensing of environment* 115:1781-1800.
- Nosetto M, EG Jobbágy, y JM Paruelo (2005): Land use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in Central Argentina. *Global Change Biology* 11:1101-1117.
- Paruelo J.M. (2008): Functional characterization of ecosystems using remote sensing. *Ecosistemas* 17 (3).
- Seguin B, and B. Itier (1983): Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing* 4:371-383.