

**Presentación de Proyecto de Investigación para su evaluación y acreditación por la  
Secretaría de Ciencia, Arte y Tecnología  
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.**

**Título del Proyecto:**

**Estudio de la Evapotranspiración en la vertiente sur de la cuenca del Río Salado por medio de  
balances de masa y energía  
[EVARSAL]**

**Apellido y Nombre del Director: Rivas Raúl Eduardo**

**Cargo Docente: Profesor Adjunto**

**Categoría de Investigador: II**

**Apellido y Nombre del Codirector:**

**Cargo Docente:**

**Categoría de Investigador:**

**Lugar de Radicación: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA DE LLANURAS**

**Unidad Académica: Rectorado**

**Código y Especificación de Disciplina: 0602 Geohidrología, 1102 Agricultura en zonas templadas**

**Fecha de Inicio del Proyecto : 01/2017**

**Fecha de Finalización : 12/2018**

**Evaluación externa: SI - NO  
(adjuntar comprobante con período de acreditación)**

**Institución:**

**Personal Participante:**

APPELLIDO Y NOMBRE	CAT. INV.	CAT. DOC.	DEDIC.	HS	FUNCIÓN	UNIDAD ACADEMICA	OTRO PROY. (SI-NO)	FIRMA
Rivas, Raúl	II	Adj.	1	25	Dir.	Rec.	No	
Carmona, Facundo	V *	Ayd.	1	25	Int.	Rec.	No	

**Colaborador Participante:**

APELLIDO Y NOMBRE	CAT. INV.	CAT. DOC.	DEDIC.	HS	FUNCIÓN	UNIDAD ACADEMICA	OTRO PROY. (SI-NO)	FIRMA
Bayala, Martín	No	No	---	20	Int.	<i>CIC</i>	No	
Holzman, Mauro	No	No	---	10	Int.	<i>Rec.</i>	No	
Mancino, Christian	No	No	---	10	Int.	<i>CIC</i>	No	
Degano, María Florencia	No	No	---	40	Int.	<i>Rec.</i>	No	
Silicani, Matías	No	No	---	16	Int.	<i>CIC</i>	Si **	
Adan Faramiñan	No	No	---	15	Int.	<i>Exa.</i>	No	

\* Solicitud de Categoría V presentada en la convocatoria de Categorización 2014 del programa de Incentivos a docentes-investigadores.

\*\* Participante del Proyecto “EROSIÓN HÍDRICA A ESCALA DE MICROCUENCA AGRÍCOLA. ESTUDIO DESDE EL ENFOQUE DE LA DINÁMICA DE LA CONECTIVIDAD HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOLÓGICA” presentado por el Dr. Marcelo Varni en la actual convocatoria

Se recomienda que, salvo alguna circunstancia específica, las fechas de inicio y finalización sean 1º de enero y 31 de diciembre, respectivamente.

- (1) Cat. Inv.: *I- II- III- IV- V.*
- (2) Cat. Doc.: *Tit.- Asoc.- Adj.- JTP- Ayd.*
- (3) Dedic: Exclusiva: *1* / Semiexclusiva: *2* / Simple: *3*
- (4) Horas totales dedicadas al proyecto
- (5) *Dir.* (Director) - *Cod.*(Codirector) - *Int.* (Integrante)
- (6) Unidad de Pertenencia: *Agr.- Eco.- Exa.- Hum. - Ing. - Soc. - Arte. - Vet. - Der - Salud - Rec. -.*
- (7) Participa en otro proyecto: si es *SI*, indicar en pie de pág. Título y Director.

# Estudio de la Evapotranspiración en la vertiente sur de la cuenca del Río Salado por medio de balances de masa y energía

## EVARSAL

### 1. OBJETIVOS

#### 1.1. Objetivos Generales:

En esta investigación se pretende calcular la evapotranspiración por medio de datos de satélite, utilizando medidas locales para calibrar la metodología y validar los resultados.

El fin del presente proyecto será contribuir al conocimiento científico acerca del proceso de evapotranspiración, para el desarrollo de aplicaciones científico-técnicas y la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos. En relación a los objetivos generales, se propone:

- ✓ desarrollar una metodología para obtener la evapotranspiración a partir de datos de diferentes misiones de satélite;
- ✓ validar la metodología con información de terreno provista por estaciones meteorológicas, balances de agua y, principalmente, estaciones de balance de energía y medidas directas de lisímetros de pesada;
- ✓ generar una base de datos, de libre acceso, con mapas de evapotranspiración para los últimos 15 años y generar algoritmos para facilitar una actualización diaria luego del desarrollo del proyecto.

#### 1.2. Objetivos Específicos:

El proyecto se enmarca en el estudio y cálculo de la evapotranspiración por medio de datos de satélite. Para ello se combinarán datos de satélite sobre las regiones del espectro solar y térmico de los sensores CERES y MODIS, principalmente. Como punto de partida se estimará la evapotranspiración del cultivo de referencia,  $ET_0$ , (Allen *et al.*, 1998) a partir de una simplificación propuesta en Carmona *et al.*, 2016b. La hipótesis de trabajo en este caso se basa en reemplazar las variables meteorológicas básicas necesarias en el cálculo de la  $ET_0$  por las mismas (o función de éstas) generadas a partir de bandas de los sensores de satélite (*Hipótesis 1*). En un segundo paso, se incorporarán *mapas de usos de suelo* y clasificaciones de imágenes para obtener la evapotranspiración máxima de cultivo,  $ET_c$ , sobre toda la región de estudio, diferenciando con imágenes de mayor resolución espacial las diferentes cubiertas (*Hipótesis 2*). Finalmente, se plantea el uso de un índice espectral basado en la temperatura radiativa de superficie, como medida del nivel de humedad de suelo, para determinar la evapotranspiración real,  $ET_r$  (*Hipótesis 3*). Para llevar a cabo el trabajo, además de los datos de satélite, se utilizarán *i*) datos de estaciones meteorológicas (propias del instituto, del Servicio Meteorológico Nacional, del INTA y otras redes disponibles), *ii*) medidas de estaciones de balances de energía (con instrumentos específicos no habituales en las estaciones convencionales), *iii*) balances de masa (MAGyP) y *iv*) medidas *in situ* de la evapotranspiración registradas por medio de un lisímetro operativo (IHLLA-Tandil). Los medidas registrarás servirán para 1) calibrar el modelo con datos locales y 2) aplicar y validar los mapas elaborados con datos de satélite.

En resumen, los objetivos específicos se centraran en:

- 1) Construir lisímetros de pesada digital de registro continuo (similares al instalado en Tandil);
- 2) Calibrar los métodos (*Hipótesis 1, 2 y 3*) a partir de registros puntuales;
- 3) Utilizar datos de sensores de satélite para obtener mapas mensuales y diarios de la evapotranspiración desde el año 2000 a la actualidad. Se prevé el desarrollo de algoritmos para mecanizar la elaboración de productos de satélite;
- 4) Validar los productos de satélite generados con información de terreno de estaciones, balances de agua en el suelo y lisímetros;

5) Generar una base de datos, de libre acceso, que permitirá el desarrollo de estudios de diversos objetivos como pueden ser; el cálculo de agua necesaria para riego, estudios de variabilidad climática, determinación de zonas potencialmente anegables, la toma de decisiones en el control de inundaciones y sequías, la planificación de obras de infraestructura, entre otros fines propios del sistema pampeano. Además, a partir de imágenes de satélite de mayor resolución espacial (por ej. del sensor OLI), se elaboraran resultados para casos particulares.

Con el proyecto se desea:

- Contribuir al entendimiento del proceso de evapotranspiración en los sistemas de llanura;
- Cuantificar la pérdida de agua real del sistema suelo-agua-planta;
- Mejorar la precisión en la determinación de la evapotranspiración y reproducir adecuadamente la variación espacio-temporal con la incorporación de datos de satélite;
  
- Armar una base de datos con diferentes grados de interpretación numérica y visual, y promover su uso, tanto para fines científicos como científico-técnicos, por parte de investigadores y técnicos de instituciones intermedias de ciencia y tecnología (INTA, CONAE, MAGyP e INA, entre otras) y funcionarios públicos como herramienta en la toma de decisiones acerca de la gestión de los recursos hídricos. Estas metas son objetivos del FONARSEC 19 bajo la dirección de quien presenta este proyecto.

## 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

La evapotranspiración (ET) es la variable hidrológica de mayor relevancia en la llanura pampeana (Rivas *et al.*, 2002), donde cerca del 85 % de agua que precipita se pierde a través de dicho proceso (Weinzettel y Usunoff, 2001). En un sentido más amplio, este término hidrológico cobra mayor relevancia si se tiene en cuenta que la productividad primaria de la región es función del agua disponible para evaporar. Desde principios del siglo pasado, muchos estudios se han llevado a cabo para estimar la ET. Las primeras formulaciones se basaron en relaciones empíricas, logrando un salto cualitativo importante a partir de que Penman (1948) presentó una ecuación incorporando todas las variables meteorológicas con relación directa sobre el proceso de ET. Hoy en día, existe una diversa gama de métodos para estimar la ET a diferentes escalas. A escala puntual, la ET se puede determinar por medio de porómetros, medidores de flujo de sabia en la planta y lisímetros; a escala de parcela por medio de balances de agua, relación de Bowen, centímetros, entre otros; y a escala regional, principalmente, por medio de balances de energía (o ecuaciones derivadas) incorporando datos de satélite (Soegaard y Boegh, 1995; Wang *et al.*, 2006; Rivas y Carmona, 2010; Carmona *et al.*, 2016b).

Para poder gestionar y planificar de forma correcta el manejo hidrológico de una cuenca o región, es fundamental conocer al detalle la variación espacio-temporal de la ET. En este sentido, las imágenes de satélite son una atractiva herramienta que permite obtener la ET a escala regional, permitiendo cuantificar, por medio de modelos, la pérdida real de agua en espacio y tiempo. Pese a que existen varios modelos para estimar la ET a escala regional, en general estos modelos cuentan con serias limitaciones (relacionadas a la disponibilidad de medidas de terreno, imágenes de satélite y nubosidad, entre otras) que degradan su resultado final. Por lo tanto, hoy en día el estudio de la ET resulta clave para lograr una mayor comprensión y simulación de la pérdida de agua de una región.

Aunque el uso de los datos de satélite está extendido en Argentina (en los ámbitos científico y técnico) aún hoy no se utiliza de manera sistemática en las diferentes áreas del conocimiento, y en particular, en estudios ambientales de alto impacto social y económico. Las limitaciones, en muchos casos, se deben a la necesidad de entrenamiento específico en el procesamiento de la información, a la inadecuada resolución temporal de las misiones de satélite más conocidas (LandSat, SPOT, CBERS, entre otras), y a la falta de sitios locales (servidores con información de datos ambientales de diferentes áreas de Argentina) que provean información en formato accesible para no expertos. Además es necesario que los sitios incluyan información acerca de la calidad del dato que el usuario adquiere, es decir la magnitud registrada y/o estimada y el error asociado a ésta.

Con éste proyecto se pretende generar productos de satélite acerca de la pérdida de agua del sistema y validarla con datos locales. La información generada y los modelos serán de utilidad para la aplicación en

otras áreas de Argentina (previa calibración). Además, el hecho de disponer de información de terreno facilitará futuras simulaciones de variables ambientales que puedan estimarse con datos de misiones de satélite a lanzarse en los próximos años (por ejemplo el satélite Argentino SABIA MAR).

El proyecto concluirá con el desarrollo y análisis de mapas de evapotranspiración para la llanura pampeana, desarrollo de algoritmos y publicación de resultados más relevantes. Reportará beneficios sustanciales para la planificación y gestión del medio ambiente de la región, aportando información base para modelos hidrológicos distribuidos que requieren un detalle espacial de la evapotranspiración. Además, aportará datos para proyectos de aplicación que desarrollan con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP, proyectos de recarga de agua al acuífero pampeano y a la red de humedad de suelo que lleva a cargo CONAE (proyecto SAOCOM). Para su desarrollo se complementará con el proyecto “*Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires. REDIMEC SRL - ADA – CICPBA*”, que se encuentra en curso (FONARSEC 19, ANPCyT).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Justificación de la Metodología

En el marco de este estudio se calibraran y validaran ecuaciones para el cálculo de la evapotranspiración, y se estudiará la forma de aplicarlas con datos de satélite.

En primer lugar será necesario comprobar que es posible obtener la  $ET_0$  por medio de datos de satélite, ecuación propuesta en principio para su aplicación local con datos meteorológicos básicos. En este sentido, las variables básicas necesarias son la radiación solar global, radiación de onda larga entrante, presión atmosférica y temperatura del aire (Carmona *et al.*, 2016a). Las primeras tres variables se obtendrán del producto de satélite SYN1-CERES, mientras que para la temperatura del aire se analizarán varias alternativas, como pueden ser su reemplazo por la temperatura radiativa de superficie ( $T_s$ ) de los productos MODIS y SYN1-CERES, o el uso de ecuaciones para obtener la temperatura del aire a partir de la  $T_s$  (por ejemplo Emamifar *et al.*, 2013) (*Hipótesis 1*). En esta línea se está trabajando actualmente, donde se está en proceso de redacción de un trabajo para obtener la  $ET_0$  con datos SYN1-CERES (Carmona *et al.*, 2016b), y otro trabajo que valida el producto de satélite radiación solar global con información de terreno generada en centros de investigación de Argentina (Carmona *et al.*, 2016c).

En un segundo paso, se incorporarán *mapas de usos de suelo* y clasificaciones de imágenes para obtener la evapotranspiración máxima de cultivo,  $ET_c$ , sobre toda la región de estudio, diferenciando con imágenes de mayor resolución espacial las diferentes cubiertas (*Hipótesis 2*). La justificación radica en que el cálculo de la  $ET_0$  corresponde únicamente a la *evapotranspiración potencial o máxima sobre una superficie hipotética de referencia* (pasto corto, bien regado, albedo de 0,23, emisividad de 0,98, entre otros requisitos), mientras que en la llanura pampeana si bien gran parte de la superficie, en ciertas circunstancias, puede asemejarse a dichas condiciones, la mayor parte de la superficie presenta otras características dadas por rotación de cultivos, cuerpos de agua, zonas anegables, etc., siendo que pueden clasificarse de acuerdo a sus propiedades reflectivas. Además, dichas propiedades permiten obtener coeficientes propios de cada cubierta, el albedo y la emisividad de superficie, necesarios para el cálculo de la  $ET_c$ .

En un tercer y último paso, se plantea calcular la evapotranspiración real,  $ET_r$ , mediante el uso de un *índice de estrés* basado en la relación existente entre un índice de vegetación y la temperatura radiativa de superficie, como medida del nivel de humedad de suelo (*Hipótesis 3*). Esto es posible como consecuencia de que los cambios reflectivos y radiativos de la superficie (temperatura de superficie) están asociados a la disponibilidad de agua en la parte superficial del suelo y, en coberturas vegetales, asociados a la humedad disponible en el perfil de suelo explorado por las raíces y transpirada por la vegetación (Holzman *et al.*, 2014b). De acuerdo a estudios previos, esas condiciones de humedad subsuperficial puede obtenerse mediante datos de satélite, hecho que permite conocer la variación espacio-temporal del agua disponible en el perfil de suelo para ser utilizada en el proceso de evapotranspiración.

### 3.2. Medidas, metodología y validación

El estudio se sustenta en la estimación de la evapotranspiración con satélite, previa calibración de la metodología con medidas directas (lisímetros) e indirectas (ecuaciones en base a registros de estaciones de terreno). Los productos de evapotranspiración de satélite obtenidos serán comparados con resultados puntuales en sitios de validación. La escala temporal de trabajo será mensual (para serie histórica) y de resolución semanal y diaria para periodos hídricos críticos y tiempo cuasi-real. Las investigaciones y métodos de trabajo a desarrollar se dividirán en dos escalas de trabajo; a escala local para obtener ajustes y calibraciones propias de la región, y a nivel regional para obtener la evapotranspiración píxel a píxel sobre la llanura pampeana.

#### 3.2.1. Medidas

A escala local se utilizarán medidas puntuales de diferentes tipos, que se detallan a continuación:

- Medidas agro-meteorológicas registradas por una *estación de balance de energía* entre los años 2006 y la actualidad (ver publicaciones del grupo en <http://teledeteccion.wix.com/gtihlla>);
- Registros de variables meteorológicas y radiativas que se obtendrán de un conjunto de 9 *estaciones de balance de energía* próximas a instalarse en el marco del proyecto FONARSEC “*Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires. REDIMEC SRL - ADA – CICPBA*” (Inv. Responsable: Dr. R. Rivas);
- Registros meteorológicos básicos provistos por el Servicio Meteorológico Nacional a través de su red de estaciones;
- Datos de evapotranspiración potencial (logrados a partir de ecuaciones en base a registros meteorológicos básicos) y real (con balances de masa) obtenidos por personal calificado del MAGyP;
- Medidas directas de evapotranspiración a partir de lisímetros. Actualmente se cuenta con un lisímetro de operación manual (con registros desde el año 2011), y se pretende construir un segundo lisímetro de operación automática y registro continuo en el marco del presente proyecto.

Con respecto a los datos de satélite, se utilizarán los siguientes tipos de datos:

- Datos de los términos de radiación (onda larga y corta), temperatura de superficie, presión atmosférica, entre otras variables, a escalas diaria y mensual del producto SYN1-CERES ([http://ceres.larc.nasa.gov/order\\_data.php](http://ceres.larc.nasa.gov/order_data.php));
- Datos de sensores de satélite actualmente operativos (MODIS/Aqua, MODIS/Terra, entre otros) y datos de sensores recientemente en operación (OLI y TIRS del satélite Landsat 8, **SENTINEL**);
- Eventualmente, datos de otras misiones de satélite (por ejemplo, ASTER, SPOT, etc.) y/o *productos de usos del suelo* (por ejemplo *GlobCover*, [Bontemps et al., 2011](#)) para clasificar los diferentes tipos de cubiertas.

Se procesarán los datos disponibles, tanto de terreno como imágenes de satélite, para su posterior uso en el desarrollo de algoritmos y validación.

#### 3.2.2. Métodos

- *Evapotranspiración del cultivo de referencia*

En el proyecto que se pretende llevar a cabo, el producto de evapotranspiración del cultivo de referencia,  $ET_{0-SAT}$ , se obtendrá por medio de datos de satélite (producto SYN1-CERES) a partir de la siguiente ecuación:

$$ET_{0-SAT} = a \left[ \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) Rn_{ref} f_c^{-1} \right] + b \quad (1)$$

siendo  $a$  (adimensional) y  $b$  ( $\text{mm d}^{-1}$ ) dos parámetros experimentales,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado como función de la temperatura media del aire ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante psicrométrica

(kPa °C<sup>-1</sup>),  $R_{n,ref}$  es la radiación neta sobre la superficie de referencia (W m<sup>-2</sup>) y  $f_c = 28,36$  un factor de conversión de unidades de Wm<sup>-2</sup> a mm d<sup>-1</sup>.

Los parámetros experimentales  $a$  y  $b$  se obtendrán por medio de la comparación entre la ET de referencia que se calcula con la ecuación recomendada en el Manual de la FAO N° 56 (Allen *et al.*, 1998),  $ET_{0-PM}$ , y la evapotranspiración de equilibrio,  $ET_{eq}$  (término entre corchetes en la Ecuación (1)). En el caso de forzar el ajuste por el origen ( $b = 0$ ) se tiene que  $a = \alpha$ , siendo  $\alpha$  el valor del parámetro de Priestley y Taylor (1972) calibrado en las condiciones ambientales de la región (en Carmona *et al.* (2013b) se obtuvo un valor de  $\alpha = 1,41$ ).

La  $\Delta$  se calculará por medio de la ecuación:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T_{skin} + 237,3)^2} \quad (2)$$

donde

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_{skin}}{T_{skin} + 237,3}\right) \quad (3)$$

y siendo  $T_{skin}$  la temperatura de piel dada por el producto SNY1-CERES, que se propone utilizar en lugar de la temperatura del aire,  $T_a$ . Una comparación entre la  $T_a$ , medida en terreno, y la  $T_{skin}$  se lleva a cabo en (Carmona *et al.*, (2016b) para justificar la suposición impuesta.

Por otra parte, la constante psicrométrica se obtiene utilizando la presión atmosférica,  $P_{atm}$ , del producto SNY1-CERES, por medio de:

$$\gamma = \frac{c_p P_{atm}}{0,622 \lambda} \quad (4)$$

donde  $C_p$  es el calor específico del aire ( $1,013 \times 10^{-3}$  MJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>),  $\lambda$  es el calor latente de vaporización, 2,45 (MJ kg<sup>-1</sup>) y 0,622 es el cociente del peso molecular del vapor de agua y el aire seco.

Finalmente, considerando las características del cultivo de referencia y teniendo los datos de SNY1-CERES de radiación solar global ( $R_{s\downarrow}$ ), radiación de onda larga de la atmosfera ( $R_{l\downarrow}$ ) y  $T_{skin}$ , de acuerdo con Carmona *et al.* (2016a) la  $R_{n,ref}$  se calculará como:

$$R_{n,ref} = 0,77 R_{s\downarrow} + 0,98(R_{l\downarrow} - \sigma T_{skin}^4) \quad (5)$$

donde  $T_{skin}$  se utiliza en lugar de  $T_a$ , al igual que en el cálculo de la  $\Delta$ .

#### - Evapotranspiración potencial

Se calculará la evapotranspiración de cultivo,  $ET_c$ , a partir de mapas que diferencien el tipo de cubierta. Para ello, se harán clasificaciones a partir de imágenes de satélite de resolución espacial media (sensores MODIS, TM y OLI principalmente) para obtener mapas de coeficientes de cultivo,  $K_c$  (posiblemente función de un índice de vegetación, como por ejemplo el índice *NAVI* desarrollado en Carmona *et al.* (2015a)), y se combinará con los resultados de la  $ET_{0-SAT}$  para obtener la  $ET_c$  de satélite ( $ET_{c-SAT} = ET_0 * K_c$ ), de acuerdo a Allen *et al.* (1998).

#### - Evapotranspiración real

Finalmente, a partir de un índice de estrés hídrico, IEH, se obtendrá la fracción evaporativa del suelo, FE, como medida de la humedad del suelo, y por lo tanto la  $ET_r$  de satélite,  $ET_{r-SAT}$  como el producto entre el IEH y la  $ET_c$ . En principio, se utilizará el índice TVDI (*Temperature Difference Vegetation Index*), validado

por en la región pampeana, siendo la FE = (1 - TDVI). El TVDI se calcula a partir de (Sandholt *et al.* (2002), Holzman *et al.* (2014)):

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (6)$$

donde en este caso  $T_s$  corresponde a la temperatura radiativa del píxel y  $T_{s_{\min}}$  y  $T_{s_{\max}}$  las temperaturas de superficie mínima y máxima para la región de estudio, respectivamente.

### 3.2.3. Validación

Tal como se mencionó anteriormente, para validar los productos generados se utilizarán varias fuentes de información. Las validaciones se harán a partir de:

- Valores calculados de  $ET_0$  y  $ET_c$  a partir de datos meteorológicos básicos registrados por estaciones del IHLA y del SMN;
- Medidas de estaciones de balance de energía: se utilizarán datos registrados en los últimos años por el Grupo de Teledetección del IHLA (GT-IHLA, 2006-actualidad) y datos que se registraran en el marco del proyecto FONARSEC. La ecuación propuesta para estimar la  $ET_r$  se validará por medio de la evapotranspiración real que se calcula como término residual del *balance de energía en superficie*,  $ET_{r-EBE}$ , es decir como:

$$ET_{r-EBE} = Rn - H - G \quad (7)$$

siendo  $Rn$  la radiación neta,  $H$  el flujo de calor sensible y  $G$  el flujo de calor en el suelo.

- Valores de  $ET_c$  (de acuerdo a la ecuación de Penman-Monteith recomendada por la FAO en el Manual N° 56, Allen *et al.* (1998)) y  $ET_r$  (balances de agua) provistos por el MAGyP;
- Medidas de lisimetría para obtener la FE (con sensores de humedad insertos en todo el perfil de suelo del lisímetro, según Silicani (2014)) y la  $ET_r$ .

## 4. PLAN DE ACTIVIDADES Y CRONOGRAMA

### 4.1. Actividades

Para desarrollar el plan de trabajo propuesto se realizarán las tareas que se detallan a continuación.

*En cuanto a las medidas locales:*

- a) Intercalibrado de equipos;
- b) Instalación, mantenimiento y seguimiento de estaciones meteorológicas y de balance de energía;
- c) Puesta en marcha, control y seguimiento de los lisímetros;
- d) Descarga de datos y cálculo de magnitudes de superficie (temperatura radiativa de superficie, albedo, velocidad del viento, flujo de calor en el suelo, entre otras);
- e) Cálculo de magnitudes de evapotranspiración;

*En cuanto al procesado de las imágenes:*

- a) Elección de fechas y descarga de imágenes de satélite;
- b) Georreferenciación y recorte de imágenes;
- c) Procesado de las imágenes y generación de productos de satélite;
- d) Validación con datos de campo;
- e) Análisis estadístico espacio-temporal.

*En cuanto a las tareas de transferencia y divulgación científica:*

- a) Publicación de resultados;
- b) Transferencia de metodologías y conocimientos a instituciones intermedias;
- c) Generar sitio Web para poner a disposición los resultados obtenidos (en principio sería en el sitio definido para FONARSEC lo cual garantiza el impacto de las investigaciones).

Se intercalibrarán los equipos de terreno a utilizar para poder hacer comparables las medidas de las diferentes estaciones (equipos de radiación, humedad de suelo y temperatura,...). Además, se controlará periódicamente el funcionamiento de los equipos. Los controles son necesarios para garantizar la calidad del dato a utilizar en la validación de la información de satélite.

Con respecto a los datos de satélite, serán contrastadas las variables obtenidas desde satélite con medidas de campo (temperatura de superficie, albedo, radiación solar global...) para garantizar la precisión y calidad de los datos de satélite utilizados. En éste sentido, actualmente se está trabajando en una publicación acerca de la calidad del producto de radiación solar global dado por el sensor CERES (Carmona *et al.*, 2016c).

La base de los controles, como así también de las medidas de campo, se sustentarán en técnicas empleadas en experiencias internacionales.

Los datos medidos a escala puntual, y a nivel de parcela, se contrastarán con los resultados logrados desde satélite. La unidad de medida de la evapotranspiración será en vatios por metro cuadrado ( $W m^{-2}$ ) y se convertirán a  $mm día^{-1}$  (para una mejor interpretación de profesionales de las ciencias ambientales) para la elaboración de mapas mensuales, semanales y/o a escala diaria.

## 4.2. Cronograma

A continuación se presenta una tabla con las actividades y los tiempos estimados de desarrollo de las mismas.

<i>Actividades</i>	<i>Meses</i>								
	<i>1-3</i>	<i>4-6</i>	<i>7-9</i>	<i>10-12</i>	<i>13-15</i>	<i>16-18</i>	<i>19-20</i>	<i>21-24</i>	
<i>1.- Instalación de dos lisímetros, sensores de humedad y de balance de energía</i>	###				###				
<i>2.- Intercalibrado de sensores</i>	#				#				
<i>3.- Registro de medidas (lisímetros, estaciones,...)</i>	###	###	###	###	###	###	###	###	###
<i>4.- Cálculo de humedad, funciones, ET ....</i>			##			##			
<i>5.- Selección y descarga de imágenes</i>	###					###		###	
<i>6.- Procesado de imágenes</i>		###				###		###	
<i>7.- Desarrollo de algoritmos y productos de ET</i>			##		##		##	##	##
<i>8.- Validación de productos</i>				###			###		
<i>9.- Análisis estadístico espacio-temporal</i>		###		###			##	#	
<i>10.- Publicación de resultados</i>				###					###
<i>11.- Sitio de libre acceso a datos y productos</i>									###
<i>12.- Divulgación y transferencia</i>		#		#		#		#	#

# equivale a un mes

## 5. APORTES ACADÉMICOS Y/O DE TRANSFERENCIA ESPERADOS

*Sobre el sector socio-económico y/o sector productivo:*

El proyecto se refiere al estudio del estado hídrico en la región pampeana. La correcta determinación de la ET tendrá un impacto significativo en, principalmente, modelos de cultivos, lo cual se traduce en un impacto productivo (producción de cereales y pasturas) y por ende en un impacto económico positivo. Además, entre otras aplicaciones, servirá en estudios de variabilidad climática, o para predecir la extensión en tiempo y espacio de zonas anegadas, contribuyendo por ejemplo a la gestión en materia de subsidios.

*Sobre las capacidades institucionales:*

El Grupo de Teledetección, GT, abocado al proyecto se encuentra dentro del ámbito del Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA, [www.ihlla.org.ar](http://www.ihlla.org.ar)). El proyecto contribuirá en dos cuestiones: 1) por un lado al fortalecimiento del GT, específicamente en el modelado del proceso de evapotranspiración y su medida directa con la construcción de dos lisímetros de pesada digital, y 2) los resultados obtenidos se integrarán otros subgrupos del IHLLA con el fin de mejorar la interpretación del sistema de llanura pampeano, su modelización y resolución de temas puntuales. Además de formaran dos recursos humanos, la Geóloga

María Florencia Degano, que inicio en 2016 sus estudios doctorales, y el alumno Adán Faramiñan, quien está desarrollando una practica profesional supervisada en el grupo de trabajo.

*Sobre las áreas disciplinares o campos de aplicación:*

Las áreas de aplicación se centran principalmente en la Hidrología, la Producción Agrícola y el Medio Ambiente. El proyecto tiene una base sumamente creativa, dado que se centra en la estimación de la evapotranspiración utilizando únicamente datos de satélite, resultando beneficioso el hecho de no depender de medidas puntuales de terreno. Se utilizará un índice de estrés hídrico, IEH, como medida del grado de humedad del suelo, lo cual va en acuerdo con resultados previos obtenidos por el grupo de trabajo.

## 6. ANTECEDENTES DEL GRUPO EN LA TEMÁTICA

En el Grupo de Teledetección del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff” se han llevado cabo en los últimos 15 años, de forma interrumpida, avances importantes en los campos de la Teledetección y su aplicación al cálculo de la pérdida de agua en el suelo en sistemas de llanura, con especial énfasis en el centro de la provincia de Buenos Aires. Las contribuciones científicas más importantes se centraron en temas relacionados a los balances de energía, la estimación de la evapotranspiración, humedad de suelo, estrés hídrico, rendimiento de cultivos, radiación neta, validación de datos de satélite, índices de vegetación, entre otras aplicaciones, principalmente sobre sistemas hidrológicos de llanura y su importancia en el manejo de recursos hídricos y la producción primaria del país (Rivas y Caselles, 2004; Ocampo y Rivas, 2011; Carmona et al., 2012, 2013, 2014, 2015a, 2015b, 2016a, 2016b y 2016c; Rivas y Carmona, 2013a; Rivas y Carmona, 2013b; Holzman 2013, Holzman et al., 2014a; Holzman et al., 2014b, Niclós et al., 2015).

En cuanto a los proyectos de investigación más recientes, en los últimos años se han llevado a cabo diverso estudios, con financiamiento de organismos nacionales e internacionales, orientados a la estimación de la humedad del suelo, el estrés hídrico, el cálculo de la evapotranspiración, validación de datos de satélite, entre otros temas de relevancia. Entre los proyectos en los cuales tuve participación se destacan:

1. *Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires. REDIMEC SRL - ADA - CICPBA.* Responsable del proyecto: Dr. R. Rivas. Aprobado el 11/2014 (Resolución N° 572/14). Duración: 3 años. Monto: \$ 43143470. **En curso**
2. *Redes neuronales artificiales e imágenes de satélite como soporte para la modelización de las propiedades biofísicas del canopeo de maíz.* APROBADO (2 años). Responsables: A. Irigoyen (Directora, UNMdP) - R Rivas (Codirector, IHLLA). Financiado por la UNMdP. **En curso**
3. *Validación de Datos de Teledetección a partir de Balances de Masa y Energía (VADATBA).* Responsable del proyecto: Dr. R. Rivas. ID:03/I033. Proyecto Incentivos Docentes, UNCPBA. **En curso**
4. *Generación de mapas de estado hídrico de la región pampeana como aporte al Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana de la Oficina de Riesgo Agropecuario del MAGyP, CICPBA.* Responsable del proyecto: Dr. R. Rivas. 2013.
5. *Campaña Internacional y uso coordinado de infra-estructura científico-tecnológicas para la evaluación del producto humedad de suelo de la misión europea SMOS (CIUCISMOS).* Área de aplicación provincia de Buenos Aires, Argentina. Subsidio del Ministerio de Ciencia e Innovación (Ref. CGL2011-13579-E), periodo 09/2012 a 09/2013. Directora: R. Niclós (España). Integrantes de equipo investigador: V. Caselles, E. Valor, C. Coll (España) y R. Rivas (Argentina).
6. *Efectos de los ciclos húmedos y secos sobre el balance de energía y la productividad neta a escala espacial: aplicación en la región pampeana.* Responsable Dr. Raúl Rivas- UNCPBA. Disciplinas: 0602, 1102. Código: 03/A178 UNCPBA. Duración 01/01/2010 a 31/12/2012.
7. *Validation of data from the SAC-D / AQUARIUS mission: Application to the knowledge of vegetation water stress.* CONAE-NASA. Responsable Dr. Raúl Rivas- UNCPBA. Aprobado Agosto 2009, Duración 3 años.

En esta línea, en la presente convocatoria se propone un plan para seguir trabajando en el estudio de la evapotranspiración en el sistema de llanura pampeano. En cuanto al aporte de Grupo al estudio de la

evapotranspiración y variables asociadas, se puede mencionar las tesis doctorales de los Dres. Raúl Rivas y Facundo Carmona (2004 y 2014), y el trabajo de especialización de Riesgo y Drenaje del técnico M. Silicani referido a la construcción de un lisímetro de bajo costo (2014), además de un número elevado de publicaciones científicas en ámbitos nacionales e internacionales. Para más detalles de publicaciones y trabajo previo, por favor consultar la página Web del Grupo de Teledetección (<http://teledeteccion.wix.com/gtihlla>).

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage, 298 pp.
2. Bontemps, S.; Defourny, P.; Van Bogaert, E.; Arino, O.; Kalogirou, V.; Ramos Perez, J. 2011. GLOBCOVER 2009 Products description and validation report. UCL y ESA, Vers. 2.2, 53 pp.
3. Brutsaert W. 1984. Evaporation into the atmosphere, Theory, History, and Applications. Cornell University. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 299 pp.
4. Carmona, F., R. Rivas, D. Ocampo, J. Schirmbeck y M. Holzman, 2011. Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. *Aqua – LAC*, 3 (1).
5. Carmona, F., R. Rivas y V. Caselles, 2013. Estimate of the alpha parameter in an oat crop under rain-fed conditions. *Hydrological Processes*, 27 (19), pp. 2834-2839.
6. Carmona, F., R. Rivas y V. Caselles, 2014. Estimation of daytime downward longwave radiation under clear and cloudy skies conditions over a sub-humid region. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 115, Issue 1, pp 281-295.
7. Carmona, F. 2014. Desarrollo de un modelo general para la estimación de la radiación neta con imágenes de satélite, 124 pp, Facultad de Física, Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universidad de Valencia.
8. Carmona, F., R. Rivas, y D. Fonnegra, 2015a. Vegetation Index to estimate chlorophyll content from multispectral remote sensing data. *European Journal of Remote Sensing*, Vol. 48, 319-326.
9. Carmona, F., R. Rivas y V. Caselles, 2015b. Development of a general model to estimate the instantaneous, daily, and daytime net radiation with satellite data on clear-sky days. *Remote Sensing of Environment*. vol 171, 1-13 pp.
10. Carmona, F., Rivas, R. y Kruse, E. 2016a. Estimating daily net radiation in the FAO Penman-Monteith method. *Theoretical and Applied Climatology*. First online: 03 March 2016, pp 1-7
11. Carmona F., Rivas R. y Kruse E. 2016b. Estimación de la evapotranspiración de referencia con datos SNY1-CERES en la vertiente sur de la cuenca del río Salado. XVII Simposio SELPER, 7-11 de Noviembre de 2016, Puerto Iguazú, Misiones, Argentina.
12. Carmona F., Orte P.F., Rivas R., Wolfram E., y Kruse, E. 2016c. Mapas de radiación solar global de la Republica Argentina a partir del producto SNY1-CERES. XVII Simposio SELPER, 7-11 de Noviembre de 2016, Puerto Iguazú, Misiones, Argentina.
13. Emamifar, S., Rahimikhoob, A. and Noroozi, A. A. (2013), Daily mean air temperature estimation from MODIS land surface temperature products based on M5 model tree. *Int. J. Climatol.*, 33: 3174–3181. doi:10.1002/joc.3655
14. Holzman, M. 2013. Estimación del estrés hídrico en cultivos y su relación con rendimientos en la región pampeana mediante imágenes de temperatura de superficie e índice de vegetación. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca - Argentina, 2013.
15. Holzman, M.E., Rivas, R. y Piccolo, M.C., 2014a. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28: 181-192.
16. Holzman, M.E., Rivas, R. y Bayala, M., 2014b. Subsurface soil moisture estimation by VI-LST method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11 (11): 1951-1955.
17. Niclos, R., R. Rivas, V. García-Santos, C. Doña, E. Valor, M. Holzman, M. Bayala, F. Carmona, D. Ocampo, A. Soldano, M. Thibeault, 2016. SMOS-MIRAS level 2 Soil Moisture Product Validation in croplands of the Pampean Region of Argentina. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 54, Issue 1, p. 499-512.
18. Ocampo, D. y Rivas, R. 2011. Evaluación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en argentina: aplicación en zonas húmedas y áridas. *CUADERNOS DEL CURIHAM*, Vol 17: 33-41.
19. Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, A, 194:120-145.
20. Priestley C.H.B., Taylor J. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2):81-92.
21. Rivas R., Caselles V., Usunoff, E., 2002. Reference evapotranspiration in the Azul River Basin, Argentina, *Actas XXXII AIH & VI ALHSUD Congress Groundwater and Human Development*, pp. 693-700; E. Bocanegra, D. Martínez y H. Massone (Eds.), Mar del Plata, Argentina.
22. Rivas R., Caselles V. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93:68-76.

23. R. Rivas y F. Carmona, 2010. La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: una alternativa para estudios detallados de cuencas. *Boletín Geológico y Minero*, 121 (4): 401-412.
24. Rivas, R., Carmona, F. 2013. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data. *Physics and Chemistry of the Earth*, Elsevier, Special Issue: Remote Sensing in Hydrology: Vol. 55-57, p. 27-34.
25. Sandholt I., Rasmussen, K. y Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment* 79 (2-3), 213-224.
26. Silicani, M., 2014. Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo. Tesis de especialización en riego y drenaje, Facultad de Agronomía, UNCUYO.
27. Soegaard, H.; Boegh, E. 1995. Estimation of evapotranspiration from a millet crop in the Sahel combining sap flow, leaf area index, and eddy correlation technique. *J. Hydrol.*, 166, 265-282.
28. Wang, K.; Li, Z.; Cribb, M. 2006. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley-Taylor parameter. *RSE*, 102, 293-305.
29. Weinzettel P., Usunoff E. 2001. Cálculo de la recarga mediante aplicación de la ecuación de Darcy en la zona no saturada. En: A. Medina, J. Carrera y L. Vives (Ed.). *Las caras del agua subterránea, serie hidrogeológica y aguas subterráneas*, Tomo I, 225-232.
30. Zhao-Liang, L.; Ronglin, T.; Zhengming, W.; Yuyun, B.; Chenghu, Z.; Bohui, T.; Guangjian, Y. y Xiaoyu, Z. 2009. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9, 3801-3853.

## 8. FACILIDADES DISPONIBLES Y/O FORMAS DE ACCESO Y FUENTES DE FINANCIAMIENTO

El lugar de trabajo es el Instituto de Hidrología de Llanuras «Dr. Eduardo Jorge Usunoff», es un centro de investigación y servicios de triple dependencia (Comisión de Investigaciones Científica de la Prov. de Bs. As. -CIC-, Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Bs. As. -UNCPBA- y Municipalidad de Azul). Sus objetivos son realizar investigación, transferencia, innovación, docencia y consultoría en Recursos Hídricos. Sus principales áreas temáticas son: hidrología subterránea y superficial, medio ambiente y contaminación, teledetección y SIG, hidroecología y gerenciamiento de recursos hídricos. También el IHLLA creó y gestiona una red de medición y base de datos climáticos y de hidrología superficial y subterránea en la cuenca del arroyo del Azul (ver solapa BDH Azul en esta página). Cuenta con un edificio en el Campus UNCPBA Azul y también oficinas en el Campus UNCPBA Tandil. El cuerpo profesional del IHLLA está compuesto por 50 profesionales, entre ellos 9 doctores investigadores senior y 7 junior, además de becarios, profesionales de apoyo, técnicos y administrativos. El IHLLA participa en la actualidad en 20 proyectos de investigación, transferencia e innovación financiados por distintas entidades de CyT de Argentina (ANPCyT, CIC, CONICET y Universidades) y del exterior. El IHLLA tiene una tradición de más de 30 años en investigaciones hidrológicas en llanuras de la provincia de Buenos Aires, y desde 2003 fue declarado como Centro de Referencia en Hidrología de Llanuras para América Latina y el Caribe por el Programa Hidrológico Internacional de UNESCO. Recientemente el IHLLA ha equipado su laboratorio de aguas como para poder ser considerado un laboratorio de aguas de referencia en la Provincia de Buenos Aires (ver solapa Servicios/Laboratorio de Aguas). El IHLLA dispone de un aula donde se imparten cursos de grado, posgrado y capacitación. Más de 15 años de investigación en Teledetección aplicada a la Hidrología, trabajando en cooperación con el Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de la Universidad de Valencia (España), avalan la factibilidad del presente proyecto. Específicamente, mi lugar propuesto es la subse del IHLLA, ubicada en Tandil, dentro del *Grupo de Teledetección* (GT-IHLLA, <http://teledeteccion.wix.com/gtihlla>). Se dispone de la infraestructura y equipamiento necesario (que puede consultarse en la página Web del Grupo), como así también de expertos de consulta en la temática (Dr. Vicente Caselles, Dr. Juan Manuel Sánchez Tomás, Dra. Raquel Niclós, Dr. César Coll, entre otros; prueba de ello lo garantizan las publicaciones realizadas en colaboración) para asegurar la concreción del proyecto.

El origen de los recursos del IHLLA se componen por subsidios institucionales de la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICPBA) otorgados al IHLLA, de subsidios de la Secretaría de Ciencia, Arte y Tecnología de la UNCPBA otorgados al Núcleo de Actividades Científicas y Tecnológicas de Investigaciones en Hidrología de Llanuras (NACT-IHLLA), recursos del rectorado de la UNCPBA y recursos propios del IHLLA. Además, se dispondrán de fondos del proyecto "Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires" (3 años, N° 572/14) para el desarrollo e instalación de las estaciones de balance de energía.