

# Estudio del proceso de evaporación en el Salar Tres Quebradas por medio de medidas *in situ* y datos de satélite

Carmona, F. <sup>1,2\*</sup>, Rivas, R. <sup>1,3</sup>, Faramiñán, A.M.G. <sup>1,2</sup>, Mancino, C. <sup>1,3</sup>, Bayala, M. <sup>1,3</sup>, Perez, W. <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff", Paraje Arroyo Seco s/n, campus Universitario Tandil, Argentina.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICPBA), La Plata, prov. de Buenos Aires, Argentina.

<sup>4</sup> Liex SA, Fiambalá, Catamarca, Argentina.

---

**Resumen:** El cálculo de la evaporación ( $E_v$ ) es un proceso fundamental en la planificación de inversión en minería no metálica en salares. Disponer de estimaciones confiables de la evaporación permite disminuir una de las principales incertidumbres que poseen los modelos de flujo en este tipo de cuencas. El presente trabajo se centra en el cálculo de la  $E_v$  en el salar Tres Quebradas, ubicado en la provincia de Catamarca (Argentina), utilizando el modelo de Priestley-Taylor con datos de satélite. La zona de estudio comprende las lagunas Tres Quebradas y Verde, y una zona central de evaporitas. Para los cálculos se utilizan datos de satélite (CERES y OLI-Landsat 8), información meteorológica, medidas de densidad de salmueras, medidas de  $E_v$  en Tanque tipo A y firmas espectrales. Se estimó la  $E_v$  en las lagunas del salar y se validó con medidas directas de  $E_v$  en Tanque. Complementariamente se estudió el control de la evaporación en las evaporitas a partir de una función dependiente de la profundidad del nivel freático. Los valores obtenidos de  $E_v$  fueron de  $1302 \text{ mm año}^{-1}$  y  $1249 \text{ mm año}^{-1}$  para las lagunas Tres Quebradas y Verde, respectivamente, similares a valores medidos en un Tanque tipo A. Para el caso de las zonas evaporitas se estimó un valor promedio anual de  $152 \text{ mm año}^{-1}$ , regulado por el nivel freático. En resumen, se obtuvo un caudal promedio de pérdida de agua del sistema por evaporación de  $1.31 \pm 0.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , donde más del 80% corresponde a las lagunas y el resto a las evaporitas. Los resultados logrados son consistentes y serán utilizados como dato de entrada en el modelado numérico de flujo para la estimación de la reserva de salmuera de litio.

**Palabras clave:** evaporación, CERES, salmuera, evaporitas.

## Evaporation process study through *in situ* and remote sensing data at Tres Quebradas Salt flat

**Abstract:** The calculation of evaporation ( $E_v$ ) is a fundamental process on the planning of investment for non-metallic mining in salt flats. Dispose to reliable estimates of evaporation allows to reduce one of the main uncertainties of the flow models in this type of basin. This paper focuses on the calculation of  $E_v$  in the Tres Quebradas salt flat, Catamarca (Argentina), applying Priestley-Taylor model with satellite data. Study area comprises the Tres Quebradas and Verde lagoons, and a central evaporite zone. Satellite data (CERES and OLI-Landsat 8), meteorological information, brine density measurements, evaporation measurements, and spectral signatures to

**To cite this article:** Carmona, F., Rivas, R., Faramiñán, A.M.G., Mancino, C., Bayala, M., Perez, W. 2019. Evaporation process study through *in situ* and remote sensing data at Tres Quebradas Salt flat. *Revista de Teledetección*, 54, 1-14. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.12264>

\* Corresponding author: [facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar](mailto:facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar)

calculations were used. The lagoons evaporation was estimated and by means of a Class A evaporation pan validated. The evaporation control in evaporite zones also was studied using a phreatic level function.  $E_v$  values of  $1302 \text{ mm year}^{-1}$  and  $1249 \text{ mm year}^{-1}$  for the Tres Quebradas and Verde lagoons were obtained, respectively, similar to Class A evaporation pan values measured. In the case of evaporite zones, an average annual value of  $152 \text{ mm year}^{-1}$  was estimated, regulated by the phreatic level. In summary, an average annual of system water loss by evaporation of  $1.31 \pm 0.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  was obtained, where more than 80% corresponds to the Tres Quebradas and Verde lagoons, and the rest to the central evaporite zone. The results achieved are consistent and will be used as input data in the numerical flow modeling to the estimation of the lithium brine reserve of the salt flats.

**Key words:** evapotranspiration, CERES, brine, evaporites.

## 1. Introducción

Los sensores remotos han sido ampliamente utilizados en estudios hidrológicos con la finalidad de lograr información distribuida de las características de la superficie (Kampf y Tyler, 2006, Carmona et al., 2015). El uso más extendido es con satélites de resolución espacial media (del orden de metros) que son utilizados para el seguimiento de procesos naturales de baja resolución temporal (menores al mes), y en menor medida satélites meteorológicos (METEOSAT, GOES, METEOR, GOMS, entre otros). Los satélites meteorológicos brindan información de variables ambientales de relevancia hidrológica con una resolución temporal (diaria a horaria) suficiente para la cuantificación de la precipitación y de la evapotranspiración, la humedad del suelo, entre otros (Niclos et al., 2017; Carmona et al., 2018a; Dinku et al., 2018).

Existe una amplia gama de modelos para obtener la evapotranspiración haciendo uso de datos de satélite. Entre los métodos basados en datos de satélite, Carmona et al. (2018a) los clasifica en (a) métodos de *balance de energía en superficie* (Anderson et al., 1997; Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007, Sánchez Tomas et al., 2008), (b) métodos basados en la relación Índice de vegetación – Temperatura de superficie (Jiang e Islam, 2001; Nishida et al., 2003; Tang et al., 2009), (c) métodos basados en la *ecuación de Penman-Monteith* (Rivas y Caselles, 2004; Zhang et al., 2009; Mu et al., 2011), (d) métodos basados en la *ecuación de Priestley-Taylor* (Fisher et al., 2008; Miralles et al., 2011), (e) *métodos empíricos* (Wang et al., 2007; Rivas y Carmona, 2013), y (f) métodos basados en el *balance de agua*

(Zeng et al. 2012; Long et al., 2014; Wan et al., 2015), entre otros. En particular, el cálculo de la evaporación es un proceso fundamental de llevar adelante para una planificación de inversión en minería no metálica en salares ya que la concentración de sales está dominada por el proceso de evaporación, donde una combinación adecuada de datos de diferentes misiones de satélite permite la estimación de la evaporación con adecuada precisión. En esta línea, por ejemplo, Kampf y Tyler (2006) calcularon la evaporación por medio de la caracterización del balance de energía en el Salar de Atacama utilizando imágenes ASTER.

Desde el año 2016 la empresa LIEX S.A. lleva adelante el Proyecto Tres Quebradas con el fin de determinar la factibilidad económica y proyectar qué inversión demandará producir a futuro a partir de la salmuera ubicada en el interior del salar Tres Quebradas, situado en Fiambalá (Catamarca, Argentina). En este contexto, el cálculo de la evaporación es necesario para un estudio más amplio de modelado numérico de flujo para la estimación de la reserva de salmuera de litio en el Salar Tres Quebradas (IHLLA, 2018a). La salmuera es una solución natural hipersaturada en calcio, potasio, sodio y litio, entre otros elementos, a partir de la cual se puede fabricar con un proceso industrial simple el carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ). El  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  tiene numerosos usos, desde la medicina a la elaboración de vidrio resistente al calor, pero en los últimos años ha tomado relevancia como uno de los componentes críticos para la elaboración de baterías (Manrique, 2014; Cardoso-Fernandes et al., 2019).

En este estudio, el principal objetivo es la cuantificación del proceso de evaporación en el salar

Tres Quebradas por medio de datos de satélite y medidas in situ. Se utiliza el método basado en la ecuación de Priestley-Taylor usando datos de satélite CERES (Carmona et al., 2018a) y multispectrales del sensor OLI-Landsat 8. En particular, la investigación se enfoca en la estimación de la evaporación mensual en lagunas (2001-2017) y en las evaporitas del salar, considerando el efecto del nivel freático en el control de la evaporación en el sector de evaporitas. Información complementaria de una estación meteorológica, medidas de densidad de salmueras, medidas de evaporación en Tanque Tipo A, firmas espectrales, medidas de niveles freáticos, entre otras fuentes de información, se utilizan para complementar y validar la metodología.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Área de estudio y datos utilizados

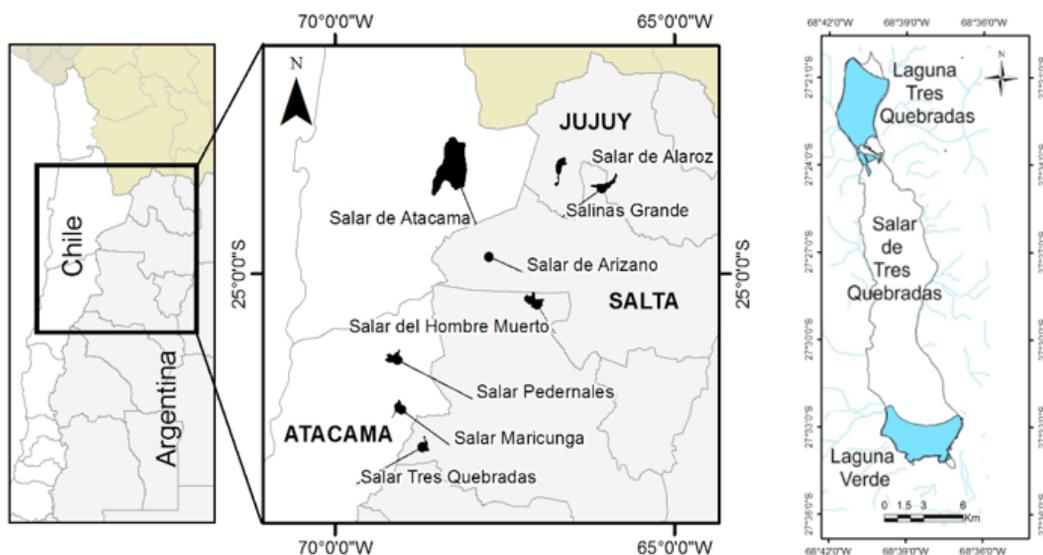
La cuenca del salar Tres Quebradas se ubica en el departamento de Tinogasta, al oeste de la provincia de Catamarca, República Argentina, entre los 27°04' y 27°49' de latitud Sur; y entre los 69°01' y 69°27' de longitud Oeste (Figura 1). La cuenca corresponde a un sistema endorreico de forma elipsoidal con medidas aproximadas de 85 km de

eje mayor y de 55 km de eje menor, dando una superficie 2639 km<sup>2</sup>. La cota más alta corresponde a 6795 m s.n.m. al suroeste en el Cerro Pisis, mientras que la cota menor se observa en el salar con 4085 m s.n.m.

En la zona central de la cuenca se encuentran un conjunto de salares (Tres Quebradas y Agua Negra) y lagunas de salmuera (laguna Tres Quebradas, Laguna Verde y Laguna Negra).

El clima en esta región presenta dos grandes sistemas de presión semipermanentes que generan la circulación de vientos: el anticiclón del Pacífico, que ingresa a la región aire seco intensificado debido al paso por el desierto de Atacama; y el anticiclón del Atlántico que afecta la región principalmente durante el verano proporcionando aire más cálido y húmedo. Estos sistemas de presión convergen en el continente generando la Baja Continental Sudamericana que durante el verano se profundiza y alcanza latitudes cercanas al Salar Tres Quebradas (3Q) con aire húmedo que ocasiona el desarrollo orográfico de grandes nubes convectivas y precipitaciones (Informe PEA para Neolithium “Technical Report”, 2016).

En este trabajo se considera el sistema que componen las lagunas Tres Quebradas y Verde, y las



**Figura 1.** Ubicación de salares en la región noreste de Argentina y norte de Chile (izquierda), y Salar Tres Quebradas (derecha).

evaporitas que relacionan a estas lagunas subterráneamente (Figura 1). El área total es de 76,8 km<sup>2</sup>, donde 26,2 km<sup>2</sup> corresponde a superficie de agua libre y 50,6 km<sup>2</sup> corresponde a las evaporitas (que tienen un comportamiento reflectivo propio de la evolución geológica del sistema). Las evaporitas son muy porosas (7,8% a 18,2%) y están compuestas por minerales de halita, escasos boratos del tipo “Ulexita” y contenidos variables de materiales clásticos o terrígenos.

Para llevar a cabo este estudio se utilizaron datos de diferentes fuentes; a escala local se utilizaron [1] registros meteorológicos de una estación Vaisala - Modelo AWS310 que se ubica en el entorno del salar, [2] medidas de evaporación en un Tanque Tipo A (ubicado junto a la estación Vaisala, utilizando una salmuera similar a aquella presente en las lagunas del salar), [3] medidas de densidad de agua en lagunas y en la salmuera contenida en el tanque de evaporación, y [4] medidas con un espectrorradiómetro de mano Spectral Vista Corporation HR-1024i de (350-2500 nm, resolución de 1,5 nm) para validar parámetros de

superficie (en particular el albedo). A escala espacial se utilizó [5] información de los productos de satélite CERES y [6] datos del sensor *Operation Land Imager* -OLI- a bordo del satélite Landsat 8.

Las fuentes de información [1], [2] y [3] fueron medidas y/o registradas por personal de la empresa Liex SA. Las medidas con un espectrorradiómetro de mano [4] se llevaron a cabo por medio de una campaña en la que se registró la reflectividad en diferentes zonas evaporitas. Los datos CERES utilizados (<http://ceres.larc.nasa.gov/>) [5] han proporcionado datos de radiación y otros tipos de información como la temperatura radiativa de superficie, las propiedades de las nubes e información meteorológica auxiliar de otras fuentes (Carmona et al., 2018b; Jiang et al., 2016; Smith et al., 2011). Por último, datos OLI Landsat [6], se utilizaron para obtener el albedo de superficie en el área de evaporitas (<https://espa.cr.usgs.gov/>). En la tabla 1 se presenta un detalle de las diferentes fuentes de información que se utilizaron en este estudio.

**Tabla 1.** Datos, instrumento y/o fuente, unidades y periodo de tiempo considerado en cada caso.

Símbolo	Variable	Instrumento / Fuente	Unidades	Fechas
<b>Escala local</b>				
[1] <i>Estación Vaisala</i>				
$P_{atm}$	Presión atmosférica	BARO-1QML-AH	kPa	
$R_{s\downarrow}$	Radiación solar global	SP Lite2 239008	W m <sup>-2</sup>	01/11/2016
$T_a / HR$	Temperatura y humedad relativa del aire	HMP155-CFG08	°C / %	–
$P$	Precipitación	QMR102AWS	mm d <sup>-1</sup>	03/2018
$u_2$	Velocidad de viento a 2 m	WMT700-CFG07	m s <sup>-1</sup>	
[2] <i>Evaporímetro</i>				
$Ev_{mT}$	Tasa de Evaporación medida	Tanque Tipo A	mm d <sup>-1</sup>	01/2017-03/2018
[3] <i>Densidad de la salmuera</i>				
$D$	Medidas de densidad de agua en laguna y en la salmuera del evaporímetro.	Densímetro	g cm <sup>-3</sup>	2016 - 2018
[4] <i>Espectrorradiometría de campo</i>				
	Firmas espectrales (350-2500 nm)	Spectral Vista Corporation HR-1024i	( - )	24/04/2018
<b>Escala espacial</b>				
[5] <i>Productos de satélite CERES</i>				
$R_{s\downarrow}$	Radiación solar global	CERES-SYN1	W m <sup>-2</sup>	
$R_{l\downarrow}$	Radiación de onda larga descendente	CERES-SYN1	W m <sup>-2</sup>	
$R_{l\uparrow}$	Radiación de onda larga ascendente	CERES-SYN1	W m <sup>-2</sup>	03/2001
$T_{skin}$	Temperatura de superficie	CERES-SYN1	K	–
$P_{atm}$	Presión atmosférica	CERES-SYN1	hPa	12/2017
$z$	Altura	CERES-SYN1	m	
$u_{10}$	velocidad del viento a 10 m	CERES-CldTypHist	m s <sup>-1</sup>	
[6] <i>Imágenes de satélite multispectrales</i>				
	17 imágenes de satélite Landsat 8 (path/row 233/79).	OLI	( - )	01/2017-05/2018

## 2.2. Modelo propuesto para el cálculo de la Evaporación

El modelo general propuesto para el cálculo de evaporación desde superficie de agua libre controlada por la salinidad de la salmuera es el siguiente:

$$Ev = K_s Ev_p \quad (1)$$

donde  $Ev$  ( $\text{mm d}^{-1}$ ) es la evaporación desde la superficie,  $K_s$  es el coeficiente de salinidad y  $Ev_p$  ( $\text{mm d}^{-1}$ ) es la evaporación potencial (considerando la densidad del agua  $1 \text{ g cm}^{-3}$ ).

El valor de  $K_s$  (adimensional) se calcula a partir de la densidad de la salmuera,  $D$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ), aplicando la ecuación propuesta por Ide (1978) (Tabla 2), mientras que para la  $Ev_p$  se propone utilizar la expresión simplificada del balance de energía propuesta por Priestley y Taylor (1972) considerando efectos ambientales ( $\alpha$ ), dada por:

$$Ev_p = \left[ \alpha \left( \frac{A}{A + \gamma} \right) Rn \right] f_c^{-1} \quad (2)$$

donde  $\alpha$  es el parámetro de Priestley y Taylor (1972),  $A$  es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado como función de la temperatura media del aire ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $Rn$  es la radiación neta en  $\text{W m}^{-2}$ ,  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ) y  $f_c$  (28,36) es un factor de conversión de unidades de  $\text{W m}^{-2}$  a  $\text{mm d}^{-1}$ .

El parámetro  $\alpha$  se introduce para considerar el efecto aerodinámico del proceso de evaporación/evapotranspiración como proporción del término radiativo ( $Rn$ ), dado que las condiciones climáticas varían temporalmente y lo mismo ocurre con este parámetro (Carmona et al., 2013). En este trabajo, se propone considerar un valor promedio de  $\alpha$  para cada mes del año, que se obtuvo por medio del cociente entre la Evapotranspiración de referencia,  $ET_{0\text{FAO/PM}}$  (Allen et al., 1998), sobre la Evaporación de equilibrio,  $ET_{eq}$  (Carmona et al., 2013), utilizando datos CERES y siguiendo los lineamientos de cálculo propuestos en Carmona et al. (2018a) (Tabla 2).

Para el cálculo de la  $Rn$ , se combinaron datos de los productos de radiación CERES con el albedo de superficie obtenido con imágenes del sensor OLI - Landsat 8. La temperatura del aire,  $T_a$ , se obtuvo por medio de una relación lineal con la  $T_{skin}$  de CERES.

Los valores de  $Ev$  estimados desde satélite fueron comparados con datos que se registraron en la estación Vaisala, para dar validez a la información generada. Complementariamente se compararon los valores de  $Ev_p$  calculados con la información registrada en la estación Vaisala (modelo de Penman-Monteith) con aquellos logrados por medio de la ecuación (2) usando datos de satélite. Esta comparación permite evaluar la calidad de los datos de satélite con medidas *in situ*, permitiendo determinar la incertidumbre de la ecuación de cálculo.

Con la finalidad de validar la información generada de Evaporación con la ecuación (1), utilizando las medidas realizadas en el tanque de evaporación Tipo A, se obtuvo la Evaporación en Tanque,  $Ev_T$ , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Ev_T = K_p Ev_{mT} \quad (3)$$

donde  $Ev_{mT}$  es la altura directa de Evaporación medida en Tanque, y  $K_p$  es el coeficiente de efecto de cubeta que se obtuvo utilizando los datos registrados en la estación Vaisala de velocidad de viento y humedad relativa del aire, de acuerdo con Allen et al. (1998) (Tabla 2).

Finalmente, para hacer comparables los valores de  $Ev_T$  con la Evaporación en los cuerpos de agua del salar, es necesario corregir el efecto de la diferencia de salinidad de los valores calculados con la ecuación (3), por medio de:

$$Ev_{Tc} = Ev_T \frac{K_{sL}}{K_{sT}} \quad (4)$$

donde  $Ev_{Tc}$  es la Evaporación en Tanque corregida ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $K_{sL}$  coeficiente de salinidad de la laguna y  $K_{sT}$  es el coeficiente de salinidad de la salmuera del Tanque. En consecuencia, se compararon los valores de  $Ev_{Tc}$  en el tanque Tipo A (con  $D$  de la salmuera conocida) con los valores de  $Ev$  logrados con la ecuación (1). A partir de esta comparación, a escala mensual, es posible evaluar la consistencia y el error asociado al modelo propuesto.

A partir de la ecuación (1) se puede estimar la Evaporación desde una superficie de agua libre considerando el control de la  $Ev$  por salinidad. Sin embargo, en las superficies de evaporitas el proceso de  $Ev$  es controlado por la profundidad del nivel freático ( $NF$ ), además de la radiación neta disponible que es limitada en gran parte por

el albedo de superficie. En este sentido, diferentes investigadores propusieron ecuaciones para modelar el control de evaporación como función del *NF* en salares (Phillip, 1957; Grilli y Vidal, 1986; Morel-Seytoux y Mermoud, 1989; Mardones, 1998; Harbaugh et al., 2000; Shah et al., 2007). Con la finalidad de calcular el control de la *Ev* en las evaporitas del Salar Tres Quebradas, en este trabajo se considera la función propuesta para la Región de Atacama (Chile) con datos muestreados en las cuencas de Pedernales y Maricunga (Vidal, 2009), por tener condiciones similares a nuestra zona de estudio, la cual se expresa de la siguiente forma:

$$Ev_{Rug} = Ev_0 f(NF) \tag{5}$$

donde  $Ev_{Rug}$  corresponde a la superficie evaporita rugosa,  $Ev_0$  es la evaporación máxima sobre una superficie de agua libre, y  $f(NF)$  es una función del nivel freático, igual a  $e^{-11,09 \cdot NF}$  para  $NF < 0,15$  m y  $0,065 \cdot NF^{-0,575}$  para  $NF > 0,15$  m.

En la tabla 2 se detallan las ecuaciones que se utilizan para calcular las diferentes variables de la *Ev*, utilizando los productos CERES y las imágenes del sensor OLI-Landsat 8 detallados en la tabla 1.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Clasificación de la zona de estudio y campaña de medida

A partir de imágenes Landsat 8 se llevó a cabo una clasificación de la zona de evaporitas considerando

**Tabla 2.** Variables y cálculos secundarios utilizados en la estimación de la evaporación.

Símbolo	Variable	Ecuación	Unidades
$K_s$	coeficiente de salinidad	$K_s = -3,7628 \cdot D^2 + 6,3353 \cdot D - 1,5725$	(-)
$\alpha$	parámetro $\alpha$	$\alpha = \frac{ET_{0 \text{ FAO PM}}}{ET_{eq}} = \frac{ET_{0 \text{ FAO PM}}}{\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) Rn f_c^{-1}}$	(-)
$e_s$	presión de vapor saturado del aire	$e_s = 0,6108 \left[ \frac{17,27 T_a}{T_a + 237,3} \right]$	kPa
$\Delta$	pendiente de la curva de presión de vapor saturado como función de la temperatura media del aire	$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T_a + 237,3)^2}$	kPa °C <sup>-1</sup>
$\gamma$	constante psicrométrica	$\gamma = \frac{C_p P_{atm}}{0,622 \lambda}$	kPa
$\lambda$	calor latente de vaporización	$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3}) T_a$	MJ kg <sup>-1</sup>
$C_p$	calor específico del aire	$C_p = 0,001005 \left( 1 - 0,84 \frac{0,622 e_a}{P_{atm} - 0,378 e_a} \right)$	MJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
$Rn$	Radiación neta	$Rn = R_{S_i} (1 - a_{sup}) + R_{l_i} - R_{l_i}$	W m <sup>-2</sup>
$T_a$	Temperatura del aire	$T_a = a \cdot T_{skin} + b$	°C
$a_{sup}$	albedo	$a_{sup} = (0,356 b_2 + 0,130 b_4 + 0,373 b_5 + 0,085 b_6 + 0,02 b_7 - 0,018)$	(-)
$b_i$	reflectividad de superficie	$i = \text{número de la banda de satélite}$	(-)
$K_p$	coeficiente de efecto de cubeta	$K_p = 0,61 + 0,00341 \overline{HR} - 0,000162 \overline{u_2} \overline{HR} - 0,00000959 \overline{u_2} B + 0,00327 \overline{u_2} \ln B - 0,00289 \overline{u_2} \ln(86,4 \overline{u_2}) - 0,0106 \ln(86,4 \overline{u_2}) \ln(B) + 0,00063 \ln(B) 2 \ln(86,4 \overline{u_2})$	(-)

considerando un valor de *HR* promedio,  $\overline{HR}$ , de 25%, un valor de borde  $B = 1$  m, una altura de medida  $z = 2$  m, y una velocidad promedio,  $\overline{u_2}$ , de 19 km h<sup>-1</sup>.

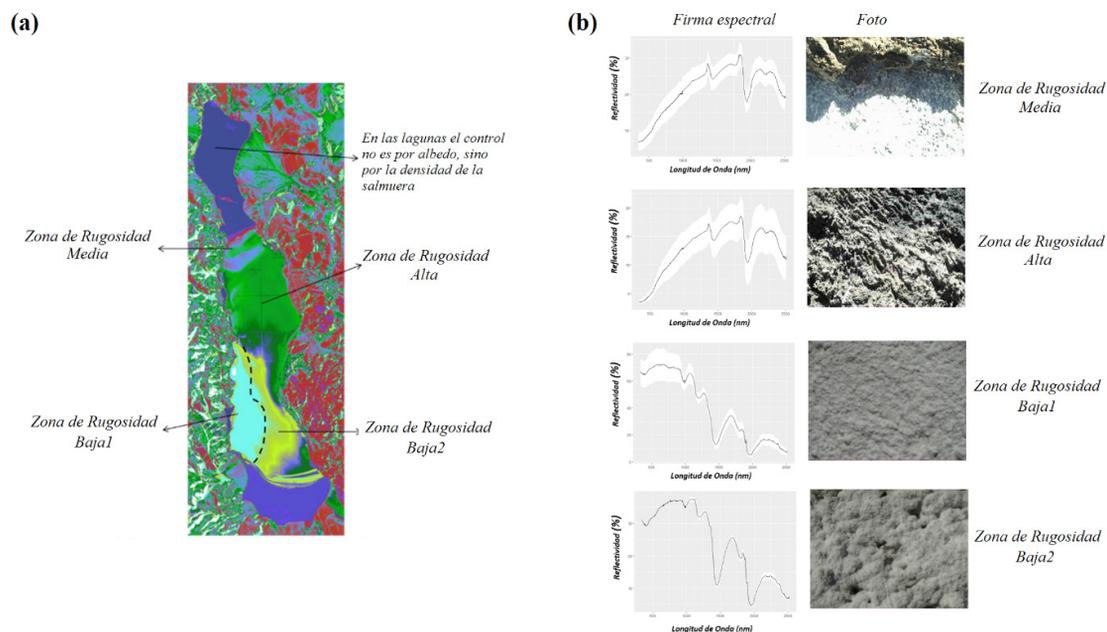
las características de rugosidad (explicada por el albedo de la superficie y tenida en cuenta esta característica por los geólogos en campo) y se validó por medio de una campaña de medida de reflectividad llevada a cabo el 24/04/2018, sobre diferentes zonas del salar. Se clasificó en 3 sectores la zona de evaporitas, denominados de rugosidad alta, media y baja. En el caso de la zona de rugosidad baja se la subdividió en dos zonas de diferente respuesta de albedo, diferenciación representativa de la descarga de agua del acuífero (la descarga de agua de menor salinidad diluye sales y reduce la rugosidad de la evaporita).

Para validar la clasificación obtenida con las imágenes Landsat, se obtuvieron un total de 42 firmas espectrales en la zona de estudio (rango espectral 350-2500 nm) con un equipo de mano *HR-1024i* de Spectral Vista Corporation. Complementariamente, se realizaron medidas de densidad del agua (para verificar la consistencia de los valores de densidad usados en los cálculos de  $E_v$  en lagunas y dar valor a los registros de los técnicos en minería), medidas del nivel freático, variables químicas de la salmuera en pozo, y medidas radiométricas de temperatura de la superficie.

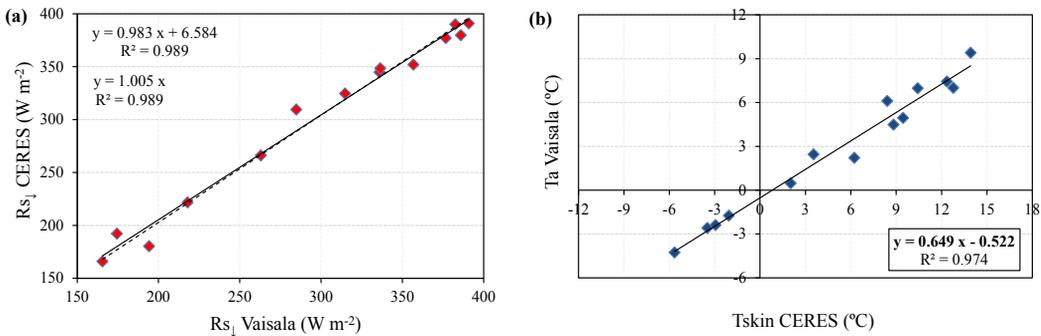
En la figura 2 se muestra un mapa de albedo de superficie indicando los sectores clasificados en el salar, y las firmas espectrales promedio de cada sector utilizadas para validar la información obtenida desde satélite (tomado de IHLA, 2018b).

### 3.2. Evaporación potencial

En primer lugar, antes de obtener la  $E_{v_p}$  con satélite, se analizó la validez de los productos de satélite CERES en la zona de estudio. Debido a las condiciones orográficas del entorno del salar, resultaba necesario corroborar si las variables de la ecuación (2) eran posibles de obtenerse con satélite. Es por ello por lo que, considerando el periodo de registro de la estación Vaisala, se compararon los valores promedio mensuales de la Radiación solar global (término de mayor peso en la  $E_{v_p}$ ) de terreno con aquellos obtenidos desde satélite (Figura 3a), de acuerdo al trabajo de Carmona et al. (2018b). Por otro lado, debido a la necesidad de contar con datos de temperatura del aire para el cálculo de las variables  $\Delta$  y  $\gamma$ , se realizó una función de regresión lineal entre la  $T_{skin}$  de CERES y la  $T_a$  registrada en la estación Vaisala (Figura 3b).



**Figura 2.** a) Mapa de albedo logrado con una imagen Landsat 8 indicando zonas evaporitas con diferentes rugosidades. (b) Firmas espectrales promedio y foto correspondiente a cada zona de validación.



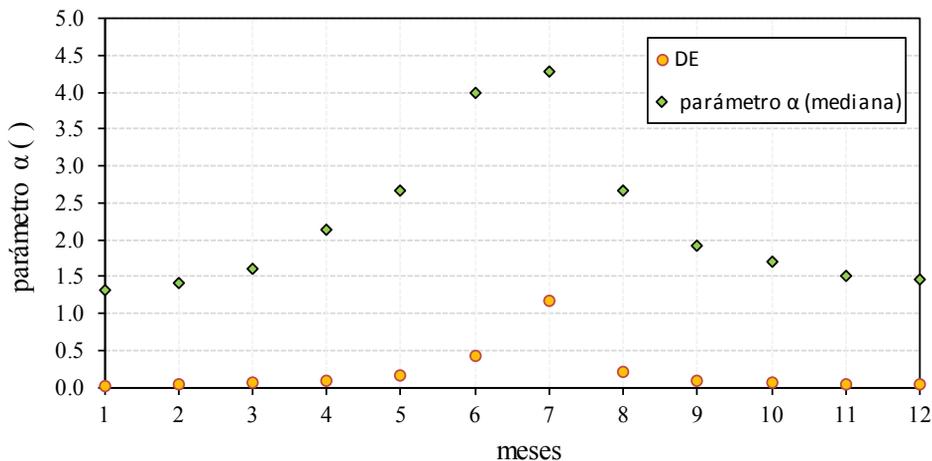
**Figura 3.** (a) Validación de los datos promedio mensuales de  $R_{s_i}$  de CERES con medidas *in situ* de la estación Vaisala, (b) función de ajuste para estimar  $T_a$  a partir de la  $T_{skin}$ .

Como se muestra en la figura 3 (a), la radiación solar global de CERES presenta un acuerdo casi perfecto con los datos de terreno, con un  $r^2$  de 0.99 y prácticamente sin sesgo. Por otro lado, como se muestra en la figura 3 (b), se logró obtener una ecuación lineal de  $T_a$  como función de la  $T_{skin}$  de CERES, con un  $r^2$  de 0.97. Este ajuste facilita la estimación de la  $Ev_p$  sin la necesidad de disponer de medidas *in situ*.

Para el caso del parámetro  $\alpha$  de Priestley - Taylor, en la figura 4 se muestran los valores obtenidos para cada mes del año (que se utilizan en el cálculo de la  $Ev_p$ ). Valores cercanos a  $\alpha=1.5$  se observan para los meses de verano, mientras que  $\alpha$  aumenta hacia el invierno con valores superiores a 4.0 durante los meses de junio y julio, producto del aumento del efecto aerodinámico (vientos

más fuertes principalmente) sobre el radiativo (disminuye la  $R_n$  disponible) en el proceso de evaporación.

A partir de la metodología propuesta, y considerando los valores de  $\alpha$  obtenidos, se calculó la  $Ev_p$  media mensual para la serie de datos CERES que se indican en la tabla 1. En la tabla 3 se presentan, para el año 2017, los valores de  $Ev_p$  mensuales aplicando la Ec. (2) con datos de satélite, además aquellos valores de terreno obtenidos utilizando los datos de la estación Vaisala, por la cual se calcula de manera automática la  $Ev_p$  aplicando el modelo de Penman Monteith (Vaisala, 2012), y sus diferencias en mm d<sup>-1</sup>. Los resultados muestran un comportamiento similar entre los valores de terreno con aquellos logrados desde satélite, con diferencia porcentual promedio anual de un



**Figura 4.** Medianas mensuales del parámetro alfa y desviaciones estándar (DE), periodo 2001-2017.

**Tabla 3.** Evaporación potencial media mensual durante el año 2017 con la estación Vaisala y utilizando la ecuación (2) con datos de satélite. DIF. es la diferencia en mm d<sup>-1</sup> entre los valores estimados (satélite) y los observados (estación).

Fecha	Evp Vaisala - modelo PM (mm d <sup>-1</sup> )	Evp Ec. (2) - Satélite (mm d <sup>-1</sup> )	DIF. (mm d <sup>-1</sup> )
ene-17	6,6	6,0	-0,6
feb-17	5,7	5,6	-0,1
mar-17	5,7	5,1	-0,6
abr-17	4,8	4,5	-0,3
may-17	3,1	3,2	0,1
jun-17	2,7	2,9	0,2
jul-17	3,2	3,6	0,4
ago-17	3,7	3,3	-0,4
sep-17	4,5	4,7	0,2
oct-17	5,1	6,0	0,9
nov-17	5,5	6,5	1,0
dic-17	6,3	6,8	0,5
Media anual	4,8	4,9	0,1

2%, un  $r^2$  de 0,86 entre los conjuntos de datos, y valores totales de Evaporación potencial anual de 1734 mm año<sup>-1</sup> con la estación Vaisala y de 1771 mm año<sup>-1</sup> aplicando la ecuación (2).

Por otro lado, en el caso de asumir una superficie de agua libre ( $D=1 \text{ g cm}^{-3}$ ) en la estimación de  $Ev_p$  con satélite, y un valor de albedo próximo a cero, se obtiene un valor de 2135 mm año<sup>-1</sup> (equivalente a una pérdida de agua media de 5,9 mm d<sup>-1</sup>), resultado similar al logrado por Mardones (1986) en el Salar de Atacama (con  $D$  del orden de 1,045 g

cm<sup>-3</sup> y  $Ks$  de 0,95) que obtuvo valores de  $Ev_p$  entre 5,1 y 6,2 mm d<sup>-1</sup>.

### 3.3. Evaporación en lagunas y superficies evaporitas

En la tabla 4 se presentan los resultados de la  $Ev$  obtenidos con el Tanque Tipo A,  $Ev_p$ , como así también los valores de  $Ev$  corregidos del efecto diferencial de salinidad entre la salmuera del tanque y el de laguna,  $Ev_{Tc}$ , tanto para la laguna Tres Quebradas como la laguna Verde, junto con los valores de  $Ev$  estimados con datos de satélite para ambas lagunas,  $Ev_L$ , durante el año 2017.

La  $Ev_T$  corresponde a la evaporación real desde una superficie de agua extensa y modela la pérdida de agua en las lagunas del salar (siempre y cuando las densidades resulten similares). Un valor de  $Ev_T$  acumulado anual de 1547 mm año<sup>-1</sup> (4,2 mm d<sup>-1</sup>) se obtuvo para las condiciones de medida durante el 2017. Sin embargo, al corregir los valores del efecto de salinidad diferencial se obtuvo una  $Ev_{Tc}$  de 1368 mm año<sup>-1</sup> para la laguna Tres Quebradas y acumulado anual de 1302 mm año<sup>-1</sup> con datos de satélite, mientras que para el caso de la laguna Verde se observó un valor de  $Ev_{Tc}$  de 1319 mm año<sup>-1</sup> y un valor acumulado anual de 1249 mm año<sup>-1</sup> con datos de satélite, resultando en diferencias porcentuales menores al 5% en ambos casos, y un  $r^2$  de 0,76 en la comparación de los conjuntos de datos mensuales de tanque Tipo A corregidos y los logrados desde satélite.

**Tabla 4.** Evaporación media mensual con Tanque Evaporímetro Tipo A, valores corregidos por efecto diferencial de salinidad, y valores obtenidos con datos de satélite para las lagunas Tres Quebradas y Verde durante el año 2017.

Fecha	Laguna Tres Quebradas				Laguna Verde		
	EvT (mm d <sup>-1</sup> )	EvTc (mm d <sup>-1</sup> )	EvL (mm d <sup>-1</sup> )	DIF. (mm d <sup>-1</sup> )	EvTc (mm d <sup>-1</sup> )	EvL (mm d <sup>-1</sup> )	DIF. (mm d <sup>-1</sup> )
ene-17	6,1	3,5	3,5	0,0	3,9	3,9	0,0
feb-17	5,1	2,9	3,3	0,4	3,3	3,7	0,4
mar-17	5,0	4,1	3,2	-0,9	4,5	3,5	-1,0
abr-17	4,3	3,4	3,1	-0,3	3,5	3,2	-0,3
may-17	2,9	2,7	2,5	-0,4	2,6	2,3	-0,3
jun-17	1,8	1,6	2,6	1,0	1,5	2,5	1,0
jul-17	2,6	2,5	2,7	0,2	2,3	2,4	0,1
ago-17	3,3	3,2	2,9	-0,3	2,8	2,6	-0,2
sep-17	4,0	4,9	4,5	-0,6	3,8	3,4	-0,4
oct-17	4,1	4,8	5,4	0,3	3,9	4,3	0,4
nov-17	5,3	5,7	5,1	-0,6	5,1	4,5	-0,6
dic-17	6,4	5,6	4,2	-1,4	6,2	4,6	-1,6
Media anual	4,2	3,7	3,6	-0,1	3,6	3,4	-0,2

Los resultados obtenidos indican que no existe tendencia a una sobreestimación o subestimación y que la metodología propuesta resultaría útil para la extensión de los datos de Evaporación a un periodo extenso. En este sentido, se calcularon los valores promedio mensuales de  $Ev_L$  en ambas lagunas durante el periodo 2001 – 2017.

Los resultados de  $Ev_L$  durante el periodo 2001-2017, tanto en la laguna Tres Quebradas como Verde, mostraron valores promedio mensuales de entre 2,5 a 5,4 mm d<sup>-1</sup>. Sin embargo, como diferencia significativa, en la laguna Verde se observó una distribución similar de la  $Ev$  respecto a la radiación neta a lo largo del año, mientras que en la laguna Tres Quebradas se observaron mayores valores de  $Ev$  en los meses de primavera, como consecuencia del efecto de la variación de salinidad en la salmuera. Esto se debe a que la laguna Verde presenta características de tamaño y físico-químicas poco variable durante el año, mientras que en la laguna Tres quebradas se presenta una mayor variabilidad con una fuerte disminución de la salinidad durante primavera debido al ingreso de agua de menor salinidad por escurrimiento, principalmente. En cuanto a las desviaciones interanuales, no se observaron diferencias significativas entre los años de estudio, con valores de desviación estándar de entre 0,1 y 0,4 mm d<sup>-1</sup>.

Por otro lado, teniendo en cuenta la clasificación de las superficies de las evaporitas, los  $NF$  promedio medidos en cada una de ellas (proporcionadas por los registros de la empresa Liex SA) y las  $Ev$  máximas obtenidas, se calcularon las tasas de evaporación para cada una de las cuatro zonas

clasificadas. En contrapartida con la metodología para el cálculo de  $Ev$  en lagunas, en este trabajo no fue posible validar la información obtenida sobre las evaporitas, sin embargo, suponemos que los valores obtenidos deberían, en principio, ser confiables dado que se utiliza un modelo propuesto para un sistema similar que fue validado (Vidal, 2009), quedando como objetivo futuro corroborar estos resultados. En este caso, se obtuvieron valores promedio mensuales de entre 1,2 a 2,4 mm d<sup>-1</sup> para el sector de rugosidad media, considerando un  $NF$  medio de 0,1 m, mientras que para los otros 3 sectores (con  $NF$  de entre 0,3 a 0,5 m de profundidad) los valores promedio mensuales calculados fueron de entre 0,2 a 0,4 mm d<sup>-1</sup>, resultando en un valor acumulado anual de  $152\pm 37$  mm año<sup>-1</sup> para toda el área de evaporitas (aproximadamente de 50 km<sup>2</sup>).

En la figura 5 se muestran los valores obtenidos de  $Ev$  en cada sector del sistema para cada mes del año. Se distingue claramente la mayor  $Ev$  que se produce en las superficies de agua libre y, además, en la zona de evaporitas de rugosidad media, la cual limita con la laguna Tres Quebradas. En las demás zonas de evaporitas la  $Ev$  es reducida y los valores obtenidos están dentro del margen de error de los métodos de estimación.

### 3.4. Caudales totales de evaporación del sistema de estudio

Al considerar las áreas de las lagunas y de las zonas de evaporitas, además de la tasa de evaporación, es posible calcular los caudales de pérdida de

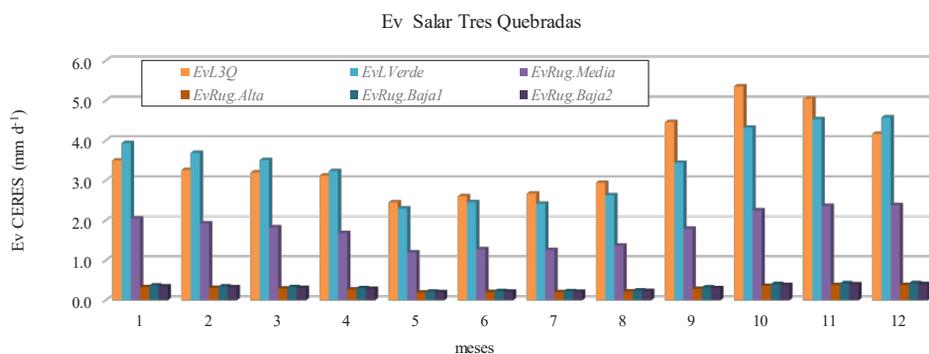
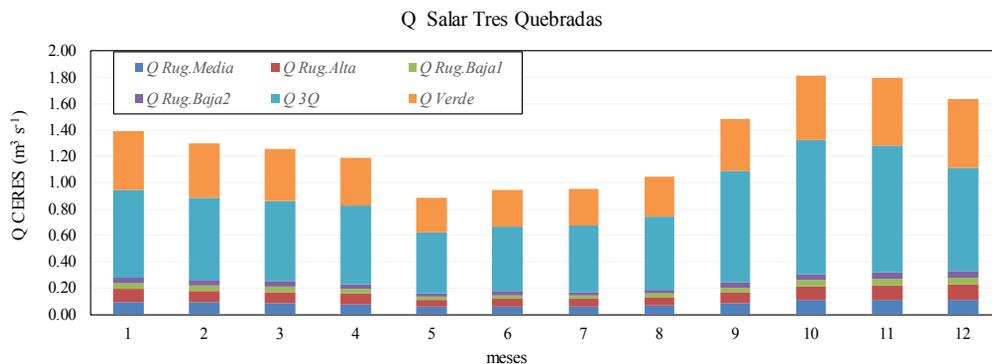


Figura 5. Valores de  $Ev$  mensuales para las lagunas Tres Quebradas y Verde, y las zonas evaporitas del Salar Tres Quebradas.



**Figura 6.** Valores de Q mensuales evaporados para los diferentes sectores del Salar Tres Quebradas.

agua del sistema (dado que cada caudal de salida corresponde a la tasa de  $E_v$  por el área de cada superficie, obtenidas con imágenes Landsat 8), necesarios para el modelado hidrogeológico en proyectos de explotación de minerales extraídos desde una salmuera. Considerando los valores medios de las áreas de los diferentes sectores, se obtiene un caudal total de salida por evaporación,  $Q$ , de  $1,31 \pm 0,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , donde más del 80% de la pérdida de agua corresponde a las superficies de agua, las lagunas Tres Quebradas y Verde, y el resto corresponde a las zonas evaporitas. Al momento de modelar se utilizó este valor como referencia. En la figura 6 se muestran los valores de Q medios mensuales para el Salar Tres Quebradas.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se utilizaron datos de satélite, productos CERES y datos Landsat, para modelar la pérdida de agua por evaporación del Salar Tres Quebradas (Argentina), donde el área de estudio, compuesto por las lagunas y evaporitas, abarcan en conjunto aproximadamente  $77 \text{ km}^2$ . Para estimar la evaporación en las superficies de agua libre se aplicó el modelo de Priestley-Taylor con datos CERES considerando el control del proceso por el efecto de la salinidad. En la comparación con medidas *in situ* para el año 2017 se obtuvieron diferencias promedio de entre  $0,1$  y  $0,2 \text{ mm d}^{-1}$  para las lagunas. De un análisis interanual, no se observaron diferencias significativas de la tasa de evaporación entre los diferentes años del estudio (2001-2017). La variable importante por considerar al momento de evaluar el proceso

de evaporación en las lagunas es la densidad de éstas (función de la salinidad) y el área que cubre cada laguna. Es importante remarcar, que el método aplicado tiene la capacidad de identificar y cuantificar los cambios temporales en el proceso de evaporación por cambios en la salinidad del agua. Cuerpos de agua menores, que tienen variaciones significativas en el área expuesta al proceso de evaporación, no se consideraron en este estudio debido a que presentan una elevada salinidad limitando el proceso de evaporación y no representan un peso significativo en los cálculos del caudal de salida.

Para el caso de las superficies de evaporitas, se logró sectorizar el área a partir de imágenes Landsat de acuerdo con la rugosidad de la superficie (equivalente al albedo en este caso), y se validó la información con medidas de un espectrorradiómetro manual. Aplicando un modelo que regula la tasa de evaporación como función del nivel freático, se obtuvieron valores significativamente menores a los observados en las superficies de agua libre. En resumen, al considerar el área de cada sector del estudio, se obtuvo un caudal anual de pérdida de agua del sistema por evaporación de  $1,31 \pm 0,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , donde más del 80% de la pérdida de agua corresponde a las superficies de las lagunas Tres Quebradas y Verde, y el resto a las zonas evaporitas. Los resultados logrados son consistentes y serán utilizados como dato de entrada en el modelado numérico de flujo para la estimación de la reserva de salmuera de litio.

## Agradecimientos

El trabajo se realizó gracias a un convenio firmado entre el IHLA (CONICET-UNCPBA-CIC) y la empresa Liex SA. Los autores además desean agradecer al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y a la Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires por fomentar la aplicación de soluciones científicas a casos reales de interés productivo, al personal técnico de la empresa Liex S.A. por el aporte de información y el financiamiento de las investigaciones, y al *Atmospheric Science Data Center* de la *NASA Langley Research Center* por proveer los datos CERES. Además, se agradece a los revisores anónimos que contribuyeron para mejorar el documento.

## Referencias

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper. p. 56. Crop evapotranspiration. *Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome. pp. 65.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - model. *Journal of irrigation and drainage engineering*. ASCE, 133(4), 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Anderson, M.C., Norman, J.M., Diak, G.R., Kustas, W.P., Mecikalski, J.R. 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote sensing of environment*, 60(2), 195-216. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212-213:198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Cardoso-Fernandes, J., Teodoro, A.C., Lima, A. 2019. Remote sensing data in lithium (Li) exploration: A new approach for the detection of Li-bearing pegmatites. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.001>
- Carmona, F., Rivas, R., Caselles, V. 2013. Estimate of the alpha parameter in an oat crop under rain-fed conditions. *Hydrological Processes*, 27(19), 2834-2839. <https://doi.org/10.1002/hyp.9415>
- Carmona, F., Rivas, R., Caselles, V. 2015. 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*. 171, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.003>
- Carmona, F., Orte, P. F., Rivas, R., Wolfram, E., Kruse, E. (2018a). Development and Analysis of a New Solar Radiation Atlas for Argentina from Ground-Based Measurements and CERES\_SYN1deg data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.003>
- Carmona, F., Holzman, M., Rivas, R., Degano, F., Kruse, E., Bayala, M. (2018b). Evaluación de dos modelos para la estimación de la evapotranspiración de referencia con datos CERES. *Revista de Teledetección*, 51, 87-98. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.9259>
- Dinku, T, Funk, C, Peterson, P, Maidment, R., Tadesse, T., Gadain, H., Ceccato, P. 2018. Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(Suppl. 1), 292-312. <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- Fisher, J.B., Tu K.P., Baldocchi, D.D. 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUX- NET sites. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 901-919. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.025>
- Grilli, A., Vidal, F. 1986. Evaporación desde Salares: Metodología para Evaluar los Recursos Hídricos Renovables. Aplicación en las Regiones I y II. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, VI, N° 2.
- Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M., McDonald, M. 2000 MODFLOW-2000. The U. S. Geological Survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. US Geol. Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr200092>
- Ide, F. 1978. *Cubicación del yacimiento salar de Atacama*. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Minas, 144 p.
- IHLA, (2018a). *Flow numerical modeling and simulation of exploitation scenarios in Salar de Tres Quebradas*, Fiambalá, Catamarca, Argentina. Informe Inédito, para LIEX S.A.
- IHLA. (2018b). *Informe de las actividades de campo Salar 3Q*. Informe Inédito, para LIEX S.A.

- Jiang, L., Islam, S. 2001. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water resources research*, 37(2), 329-340. <https://doi.org/10.1029/2000WR900255>
- Jiang, B., Liang, S., Ma, H., Zhang, X., Xiao, Z., Zhao, X., Jia, K., Yao, Y., Jia, A. 2016. GLASS daytime all-wave net radiation product: Algorithm development and preliminary validation. *Remote Sensing*, 8(3), 222. <https://doi.org/10.3390/rs8030222>
- Kampf, S.K., Tyler, S.T. 2006. Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the Salar de Atacama, Northern Chile. *Advances in Water Resources*, 29(2), 336-354. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.02.017>
- Long, D., Longueuevergne, L., Scanlon, B.R. 2014. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resources Research*, 50(2), 1131-1151. <https://doi.org/10.1002/2013WR014581>
- Manrique, A. 2014. *Explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina*. - 1a ed. - Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata, 2014. E-Book. ISBN 978-987-544-641-0 1. Ingeniería. I. Título CDD 620, 111 pp.
- Mardones, L. 1986. Características geológicas e hidrogeológicas del salar de Atacama. In: *El litio, un nuevo recurso para Chile*, (Lagos, G.; editor). Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería en Minas, Editorial Universitaria, p. 181-216.
- Mardones, L. 1998 *Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d'Ascotan et d'Atacama*. PhD Thesis, University of Paris, Paris, France.
- Miralles, D.G., Holmes, T.R.H., De Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Meesters, A.G.C.A., Dolman A.J. 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 453-469. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>
- Morel-Seytoux, H., Mermoud, A. 1989. Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis une nappe peu profonde. *Hydrologie Continentale*, 4(1), 11-23.
- Mu, Q.Z., Zhao, M.S., Running, S.W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781-1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Niclos, R., Rivas, R., García-Santos, V., Doña, C., Valor, E., Holzman, M., Bayala, M., Carmona, F., Ocampo, D., Soldano, A., Thibeault, M. 2016. SMOS-MIRAS level 2 Soil Moisture Product Validation in croplands of the Pampean Region of Argentina. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(1), 499-512. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2460332>
- Nishida, K., Nemani, R.R., Glassy, JM, Running, S.W. 2003. Development of an evapotranspiration index from aqua/MODIS for monitoring surface moisture status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 493-501. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.811744>
- Priestley, C. H. B., Taylor, R.J. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2)
- Phillip, J.R. 1957, Evaporation, and moisture and heat fields in the sol. *Journal of Meteorology*, 14, 354-366. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1957\)014%3C0354:EAMAHF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014%3C0354:EAMAHF%3E2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.021>
- 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*, 55-57, 27-34. ISSN 1474-7065. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.002>
- Sánchez, J. M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V.A., Telesca, V. 2008. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351(1-2), 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.041>
- Shah, N., Nachabe, M., Ross, M. 2007 Extinction depth and evapotranspiration from groundwater under selected land covers. *Ground Water*, 45(3), 329-338. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00302.x>
- Smith, G.L., Priestley, K.J., Loeb, N.G., Wielicki, B.A., Charlock, T.P., Minnis, P., Doelling, D.R., Rutan, D.A. 2011. Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present and future. *Advances in Space Research*, 48(2), 254-263. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.03.009>

- Tang, Q.H., Peterson, S., Cuenca, R.H., Hagimoto, Y., Lettenmaier, D.P. 2009. Satellite-based near-real-time estimation of irrigated crop water consumption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D05), 114. <https://doi.org/10.1029/2008JD010854>
- Vaisala 2012, Manual User's Vaisala Automatic AWS310.
- Vidal, J. 2009 *Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno*. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Universidad Católica de Chile.
- Wan Z., Zhang K., Xue X.W., Hong Z., Hong Y., Gourley J.J. 2015. Water balance based actual evapotranspiration reconstruction from ground and satellite observations over the Conterminous United States. *Water Resources Research*, 51(8), 6485-6499. <https://doi.org/10.1002/2015WR017311>
- Wang K.C., Wang P., Li Z.Q., Cribb M., Sparrow M. 2007. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D15), 107. <https://doi.org/10.1029/2006JD008351>
- Zeng Z.Z., Piao S.L., Lin X., Yin G.D., Peng S.S., Ciais P., Myneni R.B. 2012. Global evapotranspiration over the past three decades: estimation based on the water balance equation combined with empirical models. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014026>
- Zhang K., Kimball J.S., Mu Q., Jones L.A., Goetz S.J., Running S.W. 2009. Satellite based analysis of northern ET trends and associated changes in the regional water balance from 1983 to 2005. *Journal of Hydrology*, 379(1-2), 92-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.047>
- Zhang, K., Kimball, J. S. and Running, S. W. 2016, A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 834-853. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>