

ANEXO

DETERMINACIÓN DE NECESIDADES HÍDRICAS EN PRADERAS ASISTIDA CON IMÁGENES

DETERMINACIÓN DE NECESIDADES HÍDRICAS ASISTIDA CON IMÁGENES

Estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) mediante percepción remota

La evapotranspiración es un proceso que incluye la pérdida de agua desde la superficie del suelo y de las plantas, además de la transpiración desde las hojas de las plantas. Es un parámetro que debe conocerse para determinar las reales necesidades de agua de praderas o cultivos.

Dentro de las aplicaciones de la percepción remota, se encuentra la estimación de las necesidades de agua de la cubierta vegetal, mediante el uso de imágenes multiespectrales, de satélite o dron, y estaciones meteorológicas. Una metodología ampliamente utilizada y aceptada para la estimación de las necesidades de agua de un cultivo, es aquella denominada “Coeficiente de Cultivo-Evapotranspiración de referencia”, Kc-ETo, que se describe de forma detallada en el manual de FAO56.

El procedimiento Kc-ETo, calcula la evapotranspiración del cultivo, ETc, multiplicando un coeficiente de cultivo (Kc), que indica el estado de desarrollo de un cultivo con respecto a un cultivo de referencia (pasto o alfalfa), por un segundo factor, que es la evapotranspiración de referencia (ETo). La ETo caracteriza básicamente la demanda evaporativa de la atmósfera, en la que se engloban parámetros meteorológicos como la radiación, la velocidad del viento y la sequedad del aire.

La metodología para estimar el consumo de agua de los cultivos con datos de imágenes se basa en el empleo de la relación que existe entre la respuesta espectral del cultivo expresada por el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el coeficiente de cultivo Kc. La determinación del Kc desde las imágenes satelitales unido a la demanda atmosférica proporcionada por las estaciones meteorológicas permite el cálculo de la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar.

En el presente estudio, la estimación de la ETc y la relación de Kc con NDVI, está dada por las siguientes ecuaciones. Adicionalmente, para el cálculo de las necesidades bruta de riego (dado que el ensayo estaba siendo regado con un sistema de aspersión K-line) la ETc se dividió considerando una eficiencia de riego del 70%.

$$ETc = Kc \times ETo$$

ETc: evapotranspiración del cultivo (mm)

ETo: evapotranspiración de referencia (mm)

Kc: coeficiente de cultivo

$$Kc = 1,25 + NDVI + 0,2$$

Fuente: Cuesta et al 2005

La obtención de ETo se hizo mediante la descarga de información proporcionada por la estación meteorológica ubicada en Tamel Aike, Coyhaique, lat: -45.75, lon: -72.06, elev: 470 m. (<https://agrometeorologia.cl/#>)

Adquisición de imágenes

En el sitio de estudio se establecieron cinco tratamientos (Cuadro 1), cada uno con cuatro repeticiones en un diseño de bloques completamente al azar (Figura 1), cada parcela mide 5 x 5 m.

Cuadro 1. Tratamientos ensayo de riego

Tratamiento	Lámina de riego
R-0	Sin riego
R-25	25%
R-50	50%
R-75	75%
R-100	100%

En la práctica, la lámina de riego 100% consideraba aplicación de 25 mm por riego, y así, la de 75% tenía cerca de 18 mm, la de 50% 12,5 mm y la de 25% cerca de 6-7 mm (Figura 1).



Figura 1. Distribución de tratamientos en ensayo de riego

Imágenes de Dron

Para las imágenes capturadas con dron, se usó un cuatricóptero Marca DJI, modelo Matrice 210 RTK, el que se equipó con una cámara multispectral Micasense RedEdge M, con las siguientes bandas:

- **banda espectral Azul**, Longitud de onda de 475nm en banda pasante de 20nm. Definición de 1,2Mpx.
- **banda espectral Verde**, Longitud de onda de 560nm en banda pasante de 20nm. Definición de 1,2Mpx.
- **banda espectral Rojo**, Longitud de onda de 668 nm en banda pasante de 10nm. Definición de 1,2Mpx.
- **banda Infrarrojo Cercano**, Longitud de onda de 840 nm en banda pasante de 40nm. Definición de 1,2Mpx.
- **banda espectral Borde Rojo**, Longitud de onda de 717 nm en banda pasante de 10nm. Definición de 1,2Mpx.

En el ensayo señalado, se realizaron 9 vuelos de dron, en las fechas señaladas en el Cuadro 2, obteniéndose una resolución espacial menor a 5 cm.

Cuadro 2. Fechas de vuelo con dron

Vuelo dron	Fecha
1	22-dic-20
2	19-ene-21
3	02-feb-21
4	04-feb-21
5	09-feb-21
6	12-feb-21
7	17-feb-21
8	19-feb-21
9	09-mar-21

La planificación, la superficie a sobrevolar y los detalles técnicos del plan de vuelo se realizó a través de la aplicación de la marca Dji, (Dji Gs Pro). El procesamiento de las imágenes y confección de ortomosaicos se realizó con el programa Agisoft Methashape. En cada tratamiento de confección una zona buffer con 1 m de radio, que es la zona efectiva de riego de los aspersores, y se calculó el NDVI para cada uno de los tratamientos y diferentes fechas, mediante el software Qgis 3.8

Imágenes satelitales

Con el objeto de tener una referencia de los valores de NDVI y estimación de la ETc, de una superficie mayor a la del ensayo, se utilizó la plataforma Auravant, en su versión gratuita (<https://auraview.auravant.com/main.php>). Esta plataforma, dentro de sus aplicaciones, entrega una serie temporal de imágenes Sentinel 2, en fechas donde las condiciones climáticas permiten la captura de dicha imagen, las cuales tienen un pixel de 10 m y es posible obtener los valores promedio de NDVI para un potrero en particular (Figura 2).



Figura 2. Plataforma Auravant, versión gratuita

En esta plataforma se generó un polígono de 0,7 ha y se obtuvo el NDVI (Figura 3), posteriormente se calculó de la ETC, para 5 fechas coincidentes o lo más cercanas a las fechas de vuelo del dron (Cuadro 3)

Cuadro 3. Fechas de imágenes satelitales y de vuelo de dron.

Vuelo	Fecha	
	Sentinel-Auravant	Dron
1	21-12-2020	22-12-2020
2	01-02-2021	02-02-2021
3	04-02-2021	04-02-2021
4	09-02-2021	09-02-2021
5	16-02-2021	17-02-2021



Figura 3. Potrero de estudio y cálculo de NDVI en plataforma Auravant

Resultados imágenes con dron

El comportamiento del NDVI para los distintos tratamientos y fechas de vuelo, se presenta en la Figura 4, donde se puede apreciar claramente las parcelas sin riego a medida que avanza el verano. En la primera fecha, 22 de diciembre de 2020, que es la fecha de preparación del ensayo, se observan valores similares de NDVI para todos los tratamientos, entre 0,56 a 0,60 (Cuadro 4 y Figura 5), no existiendo diferencia significativa entre ellos (Tukey $p \leq 5\%$).

A partir de la tercera fecha de vuelo (02-02-21) y hasta término de las mediciones se observa la caída del NDVI en el tratamiento sin riego respecto a los tratamientos con riego, existiendo diferencia estadística significativa, entre la situación con riego respecto a la sin riego. El NDVI en los tratamientos con riego, tampoco presentó diferencia estadística significativa entre ellos, salvo para la fecha 7 (17-feb-21), donde el tratamiento R-100 es distinto estadísticamente del tratamiento R-25, pero igual estadísticamente a R-50 y R-75.

Cuadro 4. NDVI promedio para tratamiento y fecha de vuelo

Trat	NDVI								
	22-dic-20	19-ene-21	02-feb-21	04-feb-21	09-feb-21	12-feb-21	17-feb-21	19-feb-21	09-mar-21
x 0	0,60	0,55	0,28	0,27	0,24	0,21	0,21	0,23	0,27
x 25	0,60	0,59	0,50	0,51	0,54	0,54	0,54	0,54	0,45
x 50	0,59	0,57	0,47	0,48	0,55	0,55	0,55	0,55	0,45
x 75	0,57	0,54	0,44	0,46	0,56	0,56	0,58	0,56	0,47
x 100	0,56	0,58	0,50	0,51	0,58	0,57	0,64	0,58	0,47

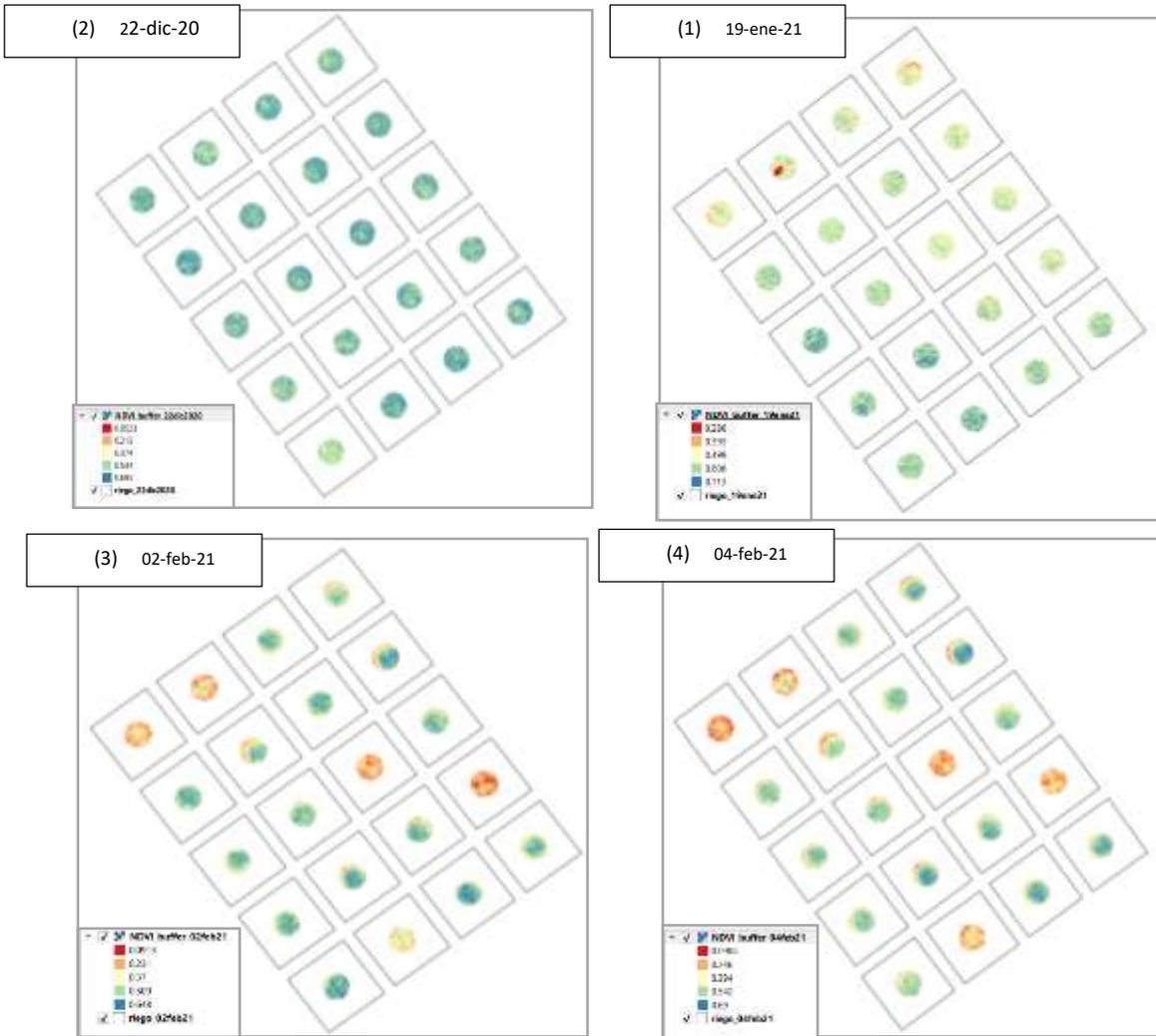


Figura 4. Evolución de NDVI para distintos tratamientos y distintas fechas

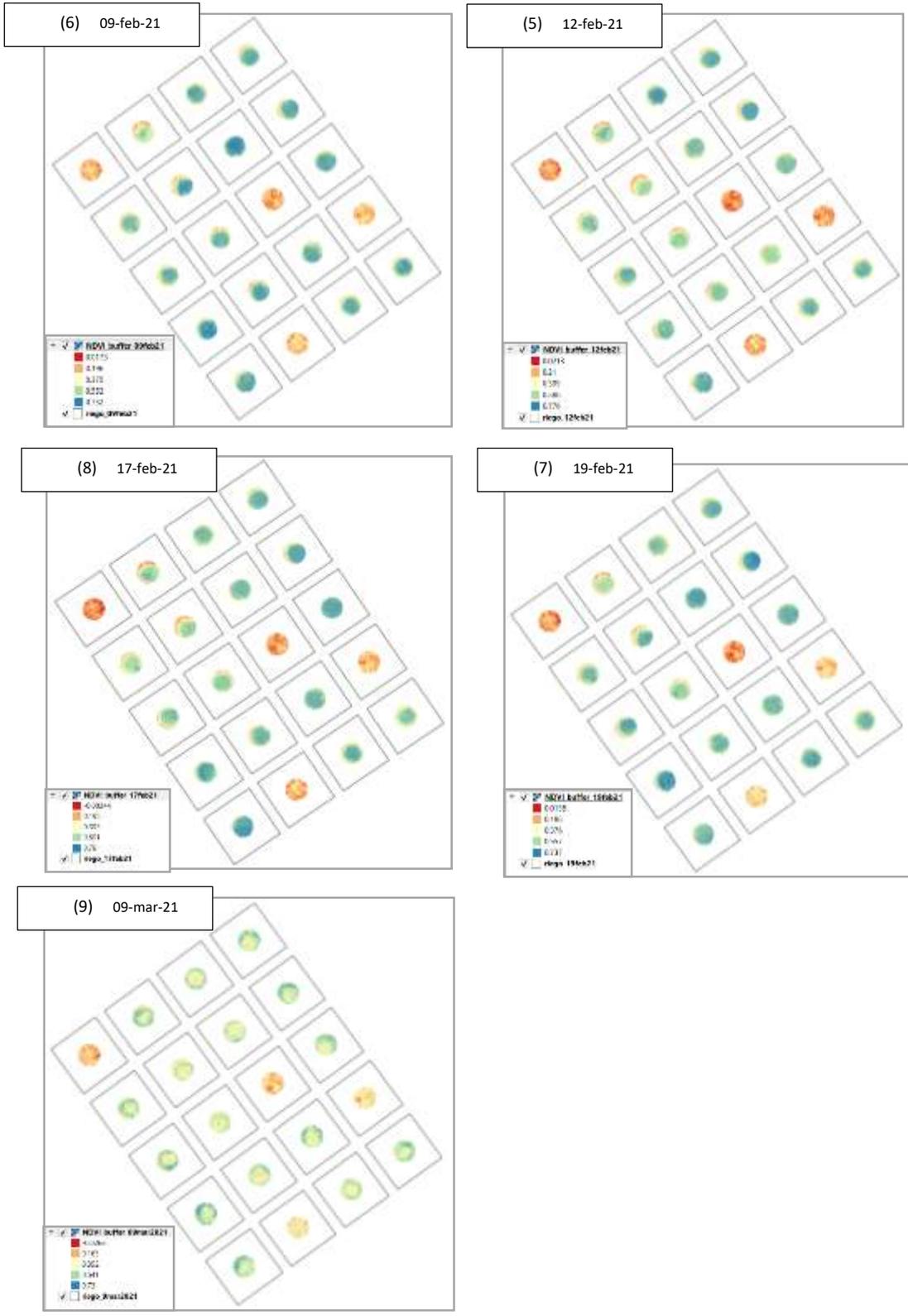


Figura 4. Evolución de NDVI para distintos tratamientos y distintas fechas (cont.)

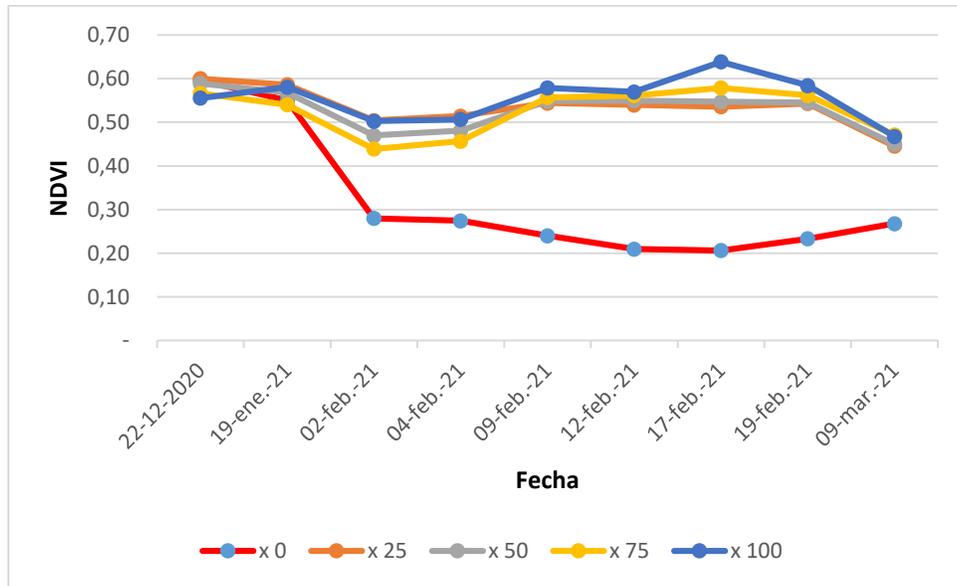


Figura 5. NDVI promedio para tratamiento y fecha de vuelo

Respecto a la ETC, los valores calculados se presentan en el Cuadro 5. La ETC, dado que se estima de manera indirecta del NDVI, tiene un comportamiento similar a éste, en cuanto a diferencias estadísticas entre los tratamientos y distintas fechas. Se observa que los mayores valores de evapotranspiración (mm/día) para los tratamientos con riego se encuentran entre las fechas del 4 al 12 de febrero (Figura 6)

Cuadro 5. ETC promedio (mm/día) para tratamiento y fecha de vuelo

Trat	22-dic-20	19-ene-21	02-feb-21	04-feb-21	09-feb-21	12-feb-21	17-feb-21	19-feb-21	09-mar-21
x 0	2,99	5,34	3,12	4,33	3,36	3,23	1,42	1,79	1,40
x 25	3,00	5,60	4,58	6,52	5,67	5,83	2,58	3,07	1,94
x 50	2,96	5,47	4,35	6,21	5,71	5,90	2,61	3,07	1,95
x 75	2,87	5,27	4,15	5,99	5,77	6,00	2,73	3,14	2,01
x 100	2,83	5,56	4,57	6,45	5,94	6,06	2,94	3,24	2,00

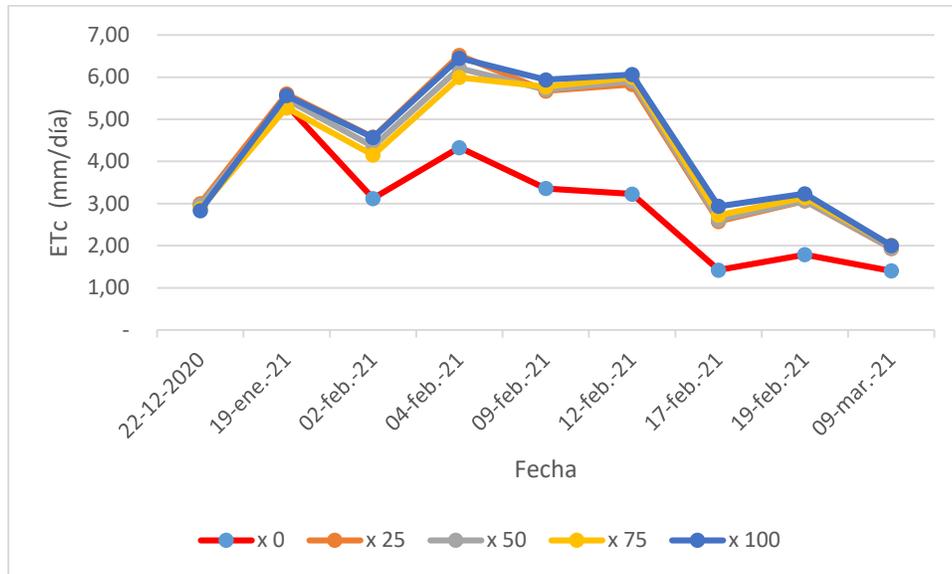


Figura 6. ETc promedio (mm/día) para tratamiento y fecha de vuelo

Las necesidades brutas de riego (mm/día), considerando una eficiencia de riego del 70%, se presentan en el Cuadro 6, donde es posible observar que para la fecha 19 de enero, se requiere aplicar cerca de 8 mm/día para cubrir necesidades del cultivo. Para las fechas de mayor evapotranspiración, las necesidades de riego son sobre 8 mm/día o incluso cercanas o sobre 9 mm/día para tratamiento R-100, lo cual podría explicarse por una mayor cantidad de forraje.

Cuadro 6. Necesidad bruta de riego (mm/día) por tratamiento y fecha de vuelo

Trat	22-dic-20	19-ene-21	02-feb-21	04-feb-21	09-feb-21	12-feb-21	17-feb-21	19-feb-21	09-mar-21
x 0	4,27	7,63	4,46	6,19	4,80	4,61	2,03	2,55	2,01
x 25	4,29	8,00	6,54	9,31	8,11	8,32	3,68	4,38	2,77
x 50	4,23	7,81	6,22	8,88	8,15	8,43	3,74	4,39	2,79
x 75	4,11	7,53	5,93	8,56	8,25	8,57	3,89	4,49	2,88
x 100	4,05	7,95	6,52	9,21	8,48	8,66	4,19	4,62	2,86

Resultados imágenes satelitales

En las imágenes satelitales obtenidas de la plataforma Auravant, se determinó el NDVI promedio para todo el polígono de estudio. El NDVI obtenido de las imágenes capturadas con el dron, se promedió para cada fecha, con el objeto de tener un único valor comparable (Cuadro 7). Se puede apreciar que el NDVI obtenido de imágenes satelitales, es siempre mayor que el NDVI obtenido de imágenes de dron, lo cual se debe al tamaño de la superficie cubierta por la imagen satelital y a su resolución espacial y, dado su tamaño de pixel, no es posible diferenciar el detalle de los tratamientos.

Cuadro 7. NDVI promedio de imágenes satelitales y de dron por fecha de vuel

fecha	NDVI	
	Imagen Satelital	Dron
21-12-2020	0,78	0,58
01-02-2021	0,67	0,44
04-02-2021	0,65	0,45
09-02-2021	0,63	0,49
16-02-2021	0,63	0,50

Finalmente, para las fechas coincidentes, se realizó un análisis de regresión lineal (Figura 7), entre la ETc calculada desde imágenes satelitales y la ETc calculada de imágenes de dron, obteniéndose una buena correlación entre ellas (R^2 0,89), sin embargo es necesario aumentar el "n" de muestreo, lo cual se llevará a cabo cuando se incorporen más sitios de ensayos y fechas de vuelo durante la próxima temporada de evaluaciones.

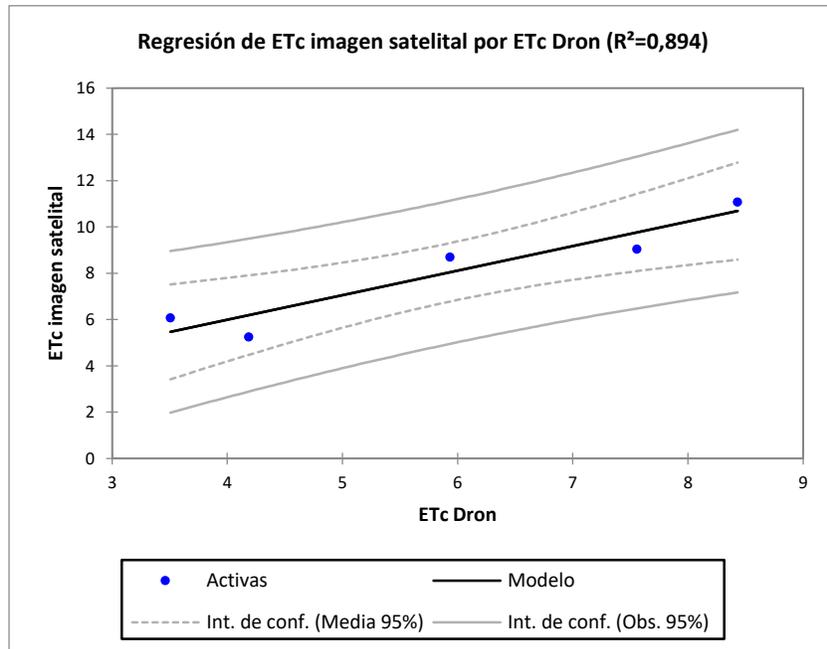


Figura 7. Regresión entre ETC de imagen satelital y ETC de imagen de dron

Conclusiones preliminares

De acuerdo a los resultados preliminares, el uso de imágenes de dron y satelitales, permitiría estimar las necesidades hídricas de la pradera, aplicando la metodología de coeficiente de cultivo- evapotranspiración de referencia, Kc-ETo y el índice de vegetación NDVI.

Asimismo, hubo una buena correlación entre la ETc calculada desde imágenes satelitales y la ETc calculada de imágenes de dron. Sin embargo es necesario aumentar el “n” de muestreo/vuelos y los resultados deben ser contrastados con datos de terreno medidos con sensores de humedad, lo cual se llevará a cabo cuando se incorporen más sitios de ensayos y fechas de vuelo, previstos en el desarrollo del proyecto.