



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Evaluación del riego en sistemas de producción agrícola mediante técnicas de percepción remota

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del agua

Presenta:

Ing. Miguel Ángel Pachicano Hernández

Asesor:

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán



14 de diciembre de 2017

**ING. MIGUEL ÁNGEL PACHICANO HERNÁNDEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Rodolfo Cisneros Almazán** *Asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 14 de diciembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Evaluación del riego en sistemas de producción agrícola mediante técnicas de percepción remota”.

Introducción

1. El riego agrícola apoyado con datos de percepción remota alcances y perspectivas
2. Determinación de la eficiencia de riego mediante datos espectrales Landsat 8 OLI en el ejido de San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, México
3. Determinación de la eficiencia de riego mediante datos de alta resolución en el ejido de San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, México

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN



**FACULTAD DE
INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 6
Zona Universitaria • CP 78200
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 a139
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber financiado mis estudios de Maestría mediante el convenio 430864.

Mi profundo agradecimiento a mi alma máter, la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por abrirme las puertas al conocimiento.

A mí querida Facultad de Ingeniería y al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, por permitir desarrollarme en el ámbito de la investigación y adquirir habilidades para el desarrollo profesional.

Al Dr. Rodolfo Cisneros Almazán, por su valiosa guía y asesoramiento durante mi estancia en el posgrado, depositando su confianza en mí, y por sus observaciones, comentarios y gestión de recursos que fortalecieron este trabajo.

Al Dr. Carlos Arturo Aguirre Salado, por el inmenso apoyo incondicional brindado, tanto intelectual, material, moral, motivacional y por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y que a pesar de las circunstancias, siempre tuvo tiempo para ayudarme. Por iniciarme y guiarme con la mayor paciencia en el ámbito de la investigación desde la licenciatura. Por su apoyo en discusiones, razonamientos y análisis que fortalecieron y ayudaron a la consecución de este trabajo. Es un verdadero privilegio conocer personas de gran calidad humana como usted, de verdad muchas gracias por todo.

Al Dr. Hilario Charcas Salazar, por su valiosa guía durante la estancia en el posgrado, por el apoyo intelectual y material y sobretodo la gestión de recursos para la culminación y fortalecimiento de este trabajo.

Al Dr. Alfonso Calera Belmonte y al Dr. Isidro Campos por recibirme en la estancia de investigación en la Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España, y por el apoyo material e intelectual, de verdad muchas gracias.

A la Sección de Teledetección y SIG de la Universidad de Castilla-La Mancha, Carme Plaza, María Calera, Jaime Campoy, Dolores Ubide, por su recibimiento y atenciones durante mi estancia en España.

A mi gran amigo el Ing. Juan Carlos Díaz Rivera, por tu sincera amistad incondicional y el apoyo brindado durante el posgrado, tus comentarios, sugerencias, análisis y observaciones siempre han sido importantes en la realización de este trabajo. Por escucharme, aconsejarme y motivarme en los momentos más críticos de este proceso y por ser para mí un ejemplo de superación y perseverancia, gracias amigo.

A mis amigos Ivan Huerta, Eligio Mata, Coral Sánchez, Gabriel Pérez, Eduardo Trejo, Susana Díaz, Yajaira Rodríguez, Kyara Jiménez por su sincera amistad a lo largo de estos años, por motivarme, ayudarme y por vivir experiencias inolvidables.

A los Ingenieros Geólogos Erik Maldonado Arochi y Alberto Robles Gorjon por su valiosa e importante aportación a este trabajo, en la toma de datos por medio de un dron.

A los habitantes del ejido San Francisco de Asís, por su recibimiento y cálidas atenciones durante las visitas a la zona de estudio.

DEDICATORIA

A Dios, porque es de él, de quien se recibe amor puro y sincero, siempre ha estado protegiéndome y dándome fuerzas para continuar a pesar de las dificultades y adversidades, gracias a sus bendiciones me permitió llegar hasta este punto.

A mis padres Francisco y Martha, por su apoyo, esfuerzo, sacrificio y paciencia durante todos mis estudios, nada habría sido posible sin ustedes, y sé, que en las decisiones que tome, siempre estarán para apoyarme. Este trabajo es por ustedes, los quiero infinitamente.

A mis hermanos Javier, Guadalupe y Laura, por ser un ejemplo de superación y motivación, siempre los llevo en mi mente y corazón, los quiero hermanos.

A mis sobrinos, Diego, Sebastián, Javier y Matías, por llenar nuestro hogar de felicidad, espero ser una motivación para ustedes, ya que ustedes lo son para mí.

A mi abuelo Santos Hernández, por su cariño tierno y sincero.

"Sabiduría, prudencia y ciencia"

CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Introducción.....	1
CAPÍTULO 1. El riego agrícola apoyado con datos de percepción remota alcances y perspectivas	4
1.1. Percepción remota para el manejo del agua de riego.....	6
1.2. Sensores remotos aplicados a riego, historia y especificaciones.....	7
1.2.1. MODIS.....	8
1.2.2. Landsat.....	14
1.2.3. Spot.....	18
1.2.4. Sentinel.....	21
1.3. Alcances y perspectivas de la percepción remota.....	23
CAPITULO 2. Determinación de la eficiencia de riego mediante datos espectrales Landsat 8 OLI en el ejido de San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, México.....	24
Resumen.....	25
Abstract.....	25
2.1. Introducción.....	26

2.2.	Fundamentos teóricos de la determinación de la eficiencia de riego por medio de percepción remota.....	27
2.2.1.	Eficiencia del uso del agua.....	29
2.2.2.	Uso consuntivo.....	30
2.2.3.	Evaporación.....	30
2.2.4.	Transpiración.....	30
2.2.5.	Evapotranspiración.....	31
2.2.6.	Evapotranspiración de referencia.....	31
2.2.7.	Evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar..	32
2.2.8.	Coeficiente de cultivo (K_c).....	32
2.2.9.	Coeficiente de cultivo basal (K_{cb}).....	36
2.2.10.	Percepción remota aplicada al manejo de agua en los cultivos.....	38
2.2.11.	Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI)..	39
2.2.12.	Relación NDVI- K_c	40
2.3.	Materiales y métodos.....	41
2.3.1.	Área de estudio.....	41
2.3.2.	Imágenes de satélite empleadas.....	46
2.3.3.	Balance de agua en el suelo por medio de datos de percepción remota.....	48
2.3.4.	Cálculo de la eficiencia de riego utilizando datos de percepción remota.....	51

2.4.	Resultados y Discusión.....	54
2.5.	Conclusión.....	56
CAPITULO 3.	Determinación de la eficiencia de riego mediante datos de alta resolución en el ejido de San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, México....	58
	Resumen.....	59
	Abstract.....	59
3.1.	Introducción.....	60
3.2.	Materiales y Métodos.....	60
3.2.1.	Área de estudio.....	65
3.2.2.	VANT's empleado para obtención de datos de muy alta resolución espacial.....	67
3.2.3.	Índice de vegetación utilizando imagen RGB.....	71
3.2.4.	Cálculo de coeficiente de cultivo (Kc) utilizando GRVI.....	75
3.2.5.	Recomendación de riego utilizando datos de muy alta resolución.....	71
3.3.	Conclusión.....	81
	Conclusiones.....	82
	Referencias.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2		Página
Figura 1	Evolución temporal del coeficiente de cultivo, con las diferentes fases en las que se divide el ciclo de crecimiento.....	33
Figura 2	Curva generalizada de Coeficiente de cultivo.....	38
Figura 3	Localización del área de estudio.....	41
Figura 4	Curva patrón de NDVI para maíz del año 2015.....	48
Figura 5	Comportamiento de ET_0 en el año 2015.....	49
Figura 6	Curva de agotamiento en zona radicular con precipitación.....	51
Figura 7	Cálculo de ET_c anual a nivel regional.....	52
Figura 8	Metodología para el cálculo de la eficiencia de riego utilizando datos satelitales.....	53
Capítulo 3		
Figura 9	Localización del área de estudio, a) ortomosaico fuente de agua “Los Peroles”, b) ortomosaico zona de cultivo.....	65
Figura 10	Dron DJI Mavic Air, con sensor CMOS de 12 MP.....	67
Figura 11	Ortomosaico generado de vuelo de dron DJI Mavic Air, 10 ha.....	69
Figura 12	Colocación y medición de puntos de control terrestre. a) Colocación de marcas, b), c), d) medición de puntos de control terrestre.....	70
Figura 13	Gráfica de distribución de relación NDVI-GRVI obtenida de Landsat 8 OLI, fecha de 29 de octubre de 2017.....	74
Figura 14	Estimación de volúmenes requeridos de agua a nivel píxel.....	76

Figura 15 Metodología de capítulo 3, para la obtención de volúmenes de riego
requeridos a nivel píxel..... 78

Figura 16 Volúmenes de agua necesaria a nivel parcelario..... 79

ÍNDICE DE CUADROS

Capítulo 1		Página
Cuadro 1	Especificaciones generales del sensor MODIS.....	11
Cuadro 2	Características espectrales del sensor MODIS.....	12
Cuadro 3	Características de satélite ERTS-1, Landsat 2 y Landsat 3.....	15
Cuadro 4	Características de satélite Landsat 4.....	15
Cuadro 5	Características de satélite Landsat 5.....	16
Cuadro 6	Características de satélite Landsat 7.....	16
Cuadro 7	Características de satélite Landsat 8.....	17
Cuadro 8	Características de satélites SPOT.....	19
Cuadro 9	Características de satélites Sentinel.....	22
 Capítulo 2		
Cuadro 10	Fechas de imágenes Landsat y su NDVI promedio a nivel parcelario.....	47
 Capítulo 3		
Cuadro 11	Características de dron DJI Mavic Air	68
Cuadro 12	Puntos de control terrestre corregidos con datos de Red Geodésica Nacional Activa.....	71
Cuadro 13	Requerimiento de volúmenes de agua a nivel parcelario, y su extensión en hectáreas.....	77

Resumen

La estimación precisa de las demandas hídricas en los cultivos y la distribución adecuada de los volúmenes de agua de riego es un reto en el ámbito de la agricultura, en este sentido es necesario desarrollar técnicas y métodos que permitan evaluar la gestión adecuada de riego, buscando el aprovechamiento de los recursos hídricos desde el enfoque medioambiental y productivo. Este documento considera la evaluación de la eficiencia de riego a nivel regional y las necesidades hídricas de los cultivos a nivel píxel mediante el uso de técnicas de percepción remota, integrando el modelo FAO 56 para el cálculo de la evapotranspiración (ET) por medio de la metodología comúnmente utilizada Coeficiente de cultivo-Evapotranspiración de referencia (K_c-ET_0). La región evaluada abarca aproximadamente 700 ha de riego en el ejido de San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, México, su principal fuente de abastecimiento de agua es un manantial ubicado a 20 km de la zona de riego conocido como “Los Peroles”. El modelo integra el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) obtenido de imágenes de satélite Landsat 8 OLI del año 2015 para el cálculo del coeficiente de cultivo (K_c) y así estimar la evapotranspiración anual a nivel regional, posteriormente se evaluó la eficiencia del riego con un total de un 47.5% comparado con investigaciones hechas en la misma región con técnicas de campo se muestra como herramienta de cálculo operativa y eficaz para la evaluación de ET en grandes extensiones de cultivo. Por otro lado, se utilizó la metodología K_c-ET_0 para la determinación de las necesidades hídricas de cultivos a nivel píxel, utilizando datos de muy alta resolución espacial, obtenidos de imágenes de un vuelo de VANT's (Vehículo Aéreo No Tripulado) marca DJI Mavic Air, equipado con una cámara RGB. Para obtener los requerimientos de riego a nivel píxel utilizando la información espectral obtenida con el vuelo del dron, se adaptó el índice de vegetación verde y rojo (GRVI) al modelo FAO 56, que fue diseñado para ser utilizado con el NDVI. Para validar la aplicabilidad del GRVI, al modelo FAO 56, se realizó un análisis de correlación entre el NDVI-GRVI obteniendo un valor de $R^2 = 0.94$ demostrando la aplicabilidad del GRVI para la obtención de los requerimientos de riego a nivel píxel.

Palabras clave: Evapotranspiración, K_c , NDVI, Landsat 8 OLI, eficiencia de riego, VANT's, GRVI, volúmenes de agua.

Abstract

Crop water estimation and supplying is a great challenge in agriculture. So, it is required to develop new techniques and methods that permit evaluating water management in order to find tools for a smart decision making concerning irrigation issues from an environmental and productive point-of-view. This work proposed a framework to evaluate irrigation efficiency at regional level, and water requirement at pixel level by using remote sensing. The FAO 56's model was used to estimate evapotranspiration based on the calculation of crop coefficient and reference evaporation. The study area covered 700 ha and was located in the Ejido San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, Mexico. A groundwater spring named "Los Peroles" and located 20 km near agricultural land is used as main water source. The first part of the research work was to construct a model by using normalized difference vegetation index data calculated from Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) data in order to calculate crop coefficient (K_c) for estimating yearly evapotranspiration at regional level. These calculations were used to obtain an irrigation efficiency of 47.5%. This value was comparable with results obtained by others in the same region by field techniques, being an operational and effective way to estimate evapotranspiration in a large cropland area. The second part of this work was to determine crop water requirement at pixel level, by using data from a red-green-blue camera mounted on a DJI Mavic Air unmanned aerial vehicle. In this regard, an innovative application of vigor information was proposed. The FAO 56 model was designed by using NDVI, however in this work, the Green-Red vegetation index (GRVI) built using drone data was introduced for using as proxy of Landsat — based NDVI. For validating GRVI, a correlation analysis ($R^2 = 0.94$) between Landsat 8 OLI — based NDVI vs UAV-RGB — based GRVI was done. The results obtained showed that very high spatial resolution GRVI data can be used successfully to estimate crop water requirements at pixel level.

Key words: Evapotranspiration, K_c , NDVI, Landsat 8 OLI, irrigation efficiency, UAV, GRVI, water volume

Introducción

La gestión sustentable de los recursos hídricos es uno de los principales objetivos a nivel mundial. El aumento exponencial de la población, la industrialización, y la agricultura traen consigo grandes requerimientos de agua (Evsahíbioglu and Özdíkílier, 2015), sin embargo, los recursos hídricos son cada vez más escasos y su distribución en los diversos sectores requiere un especial manejo y cuidado (Abdul Karim *et al.*, 2013). Por lo que, la vigilancia de los recursos hídricos en agricultura es de gran importancia debido a la mala distribución y desabasto que existe en las regiones agrícolas, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria y la sustentabilidad de los recursos (Schellberg *et al.*, 2008).

El área de riego en México es de aproximadamente 6.1 millones de hectáreas, de las cuales en el 90% se implementa el riego por gravedad, sin embargo, este sistema de riego es uno de los métodos menos eficientes por la cantidad de agua que se pierde. En este sentido, se han desarrollado diversas metodologías para la gestión de agua de riego por medio de la percepción remota.

Las técnicas de percepción remota permiten estudiar a nivel regional y global diversas variables ambientales. La percepción remota se remonta a los 60's por el lanzamiento del satélite Landsat. En este sentido, se han desarrollado herramientas de procesamiento como los Índices de Vegetación (VI, por sus siglas en inglés) para la evaluación de cultivos y gestión de los recursos hídricos, buscando principalmente la correcta distribución y mejorar las prácticas agrícolas, y así aumentar el uso eficiente del vital líquido. Actualmente los VANT's (Vehículos Aéreos No Tripulados) y los diversos sensores multiespectrales, se han convertido en una de las herramientas tecnológicas más utilizadas en regiones agrícolas, aunado a ello el desarrollo de nuevos modelos enfocados en la evaluación los cultivos v.gr. estado de crecimiento y calidad de cultivo, deficiencias nutricionales y enfermedades (Freeman *et al.*, 2015).

Entre las aplicaciones de la percepción remota en la gestión de riego en regiones agrícolas se encuentran: la medición de los requerimientos de agua de riego (Durgo Rao *et al.*, 2001; Casa *et al.*, 2009; Al-Najar, 2011; Abdul Karim *et al.*, 2013; Abuzar

et al., 2013; Thorp *et al.*, 2015), estimación de la evapotranspiración y coeficientes de cultivo para manejo de agua de riego (Hunsaker *et al.*, 2003; Gowda *et al.*, 2008; Gontia and Tiwan, 2010; Gleen *et al.*, 2011; Farg *et al.*, 2012; Guermazi *et al.*, 2016), así como la planeación y calendarización de agua de riego (Amri *et al.*, 2014; Vanino *et al.*, 2015; Kadam *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2016). Existen diversas aplicaciones de los VANT's en agricultura, principalmente para el monitoreo de estrés hídrico en los cultivos (Molina *et al.*, 2014; Gago *et al.*, 2015; Kyratzis *et al.*, 2015;), seguimiento de plagas y enfermedades (Faical *et al.*, 2016), control de malezas (Gómez-Candón *et al.*, 2014; Pérez-Ortiz *et al.*, 2015), inventarios de cultivos (Dandois and Ellis, 2013), uso óptimo de fertilizantes (Schellberg *et al.*, 2008) y manejo eficiente del agua (Ore *et al.*, 2015).

Por otra parte, las prácticas de riego en el Ejido de "San Francisco de Asís", Rioverde, San Luis Potosí, México, no han sido las óptimas debido a que no se tiene acceso a un asesoramiento técnico en el manejo de las parcelas y a la falta de infraestructura hidráulica, poniendo en riesgo la disponibilidad de la principal fuente de agua, el Manantial conocido como "Los Peroles". Por lo que resulta indispensable la realización de estudios que permitan realizar un aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos de la región.

Objetivo general

Implementar una metodología para la estimación de la eficiencia de riego y la cuantificación del volumen de agua requerido como una herramienta de planeación dentro del ciclo de producción de maíz mediante el uso de técnicas de percepción remota en el Ejido de “San Francisco de Asís”, Rioverde, San Luis Potosí, México.

Objetivos particulares

- 1) Determinar la eficiencia de riego (%) mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 8 OLI y el método K_c-ET_0 que considera la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo en el Ejido de “San Francisco de Asís”, Rioverde, San Luis Potosí, México.
- 2) Estimar el volumen de agua (l) requerido a nivel píxel utilizando el método K_c-ET_0 que considera la evapotranspiración de referencia y el coeficiente de cultivo y datos de muy alta resolución espacial obtenidos con un dron DJI Mavic Air con un sensor CMOS, en parcelas determinadas de referencia dentro del área de estudio.

Hipótesis nula

- 1) Mediante el uso de sensores remotos no es posible estimar la cantidad de agua utilizada en la evapotranspiración, ni tampoco evaluar la eficiencia de riego.
- 2) No es posible estimar volúmenes de agua requerido por los cultivos a nivel píxel con el uso de imágenes de muy alta resolución espacial obtenidas mediante un dron equipado con un sensor RGB.

Hipótesis alterna

- 1) Mediante el uso de sensores remotos es posible estimar la cantidad de agua utilizada en la evapotranspiración y con ello evaluar la eficiencia de riego.
- 2) Es posible estimar volúmenes de agua requerido por los cultivos a nivel píxel con el uso de imágenes de muy alta resolución espacial obtenidas mediante un dron equipado con un sensor RGB.

Capítulo 1

El riego agrícola apoyado con datos de percepción remota alcances y perspectivas

En las siguientes décadas, la tasa de crecimiento de población aumentará y consigo la demanda alimentaria, que solamente realizando prácticas agrícolas amigables con el medio ambiente en términos de utilización de insumos (Calzadilla *et al.*, 2011). El riego se puede definir como la aplicación artificial de agua al suelo para los cultivos. La programación del riego es de vital importancia ya que permite una agricultura sostenible. Por lo que se requiere conocer la cantidad de agua necesaria en las distintas etapas de desarrollo del cultivo para poder obtener el máximo rendimiento y con ello la optimización del vital líquido (Calzadilla *et al.*, 2011). Por otro lado, la percepción remota definida como una técnica para la recolección de datos de la superficie terrestre a través de imágenes, ha sido una herramienta ampliamente utilizada en el riego agrícola (Chen *et al.*, 2008), ya que permite estimar variables biofísicas de la superficie, además existe una gran variedad de métodos para la evaluación de cultivos y vegetación natural.

Existen diferentes autores que han aplicado la percepción remota en estudios relacionados con el riego en la agricultura. Guerhazi *et al.* (2016) estudiaron la cuenca de Regueb al centro de Túnez (34°52'00"N - 94°47'00"E) un área aproximada de 1925 km², región con clima semiárido y precipitación promedio anual de 210 mm, utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 OLI para la identificación de áreas irrigadas y la estimación de los requerimiento de riego por medio de 5 métodos de clasificación supervisada e índices espectrales. Ellos obtuvieron como requerimiento de riego un volumen total de agua entre los 10 y 14.5 Mm³.

En 2007, Tasumi y Allen analizaron la región de Magic Valley al sur de Idaho (42°33'20"N - 114°23'15"), una región con clima semiárido y una precipitación media anual de 280 mm, utilizaron percepción remota para evaluar los programas de siembra y desarrollo de cultivos como el frijol, maíz, papa, trigo, cebada y remolacha, por medio del cálculo de la evapotranspiración de cultivo cuantificaron el consumo de agua y el aprovechamiento del riego.

Conrad *et al.*, (2007) analizaron una región de Asia, al Noreste de Usbekistan, la provincia de Khorezm (41°20'N-61°0'E), utilizaron imágenes MODIS para mapear y

monitorear la cobertura vegetal y el uso de suelo, midiendo la Evapotranspiración con el modelo SEBAL y cuantificar la diferencia entre la mala distribución de las aguas de riego, con respecto a las aguas arriba y a las aguas abajo y la disminución de 972 mm a 712 mm.

1.1. Percepción remota para el manejo de agua de riego

La percepción remota se ha aplicado ampliamente en agricultura desde el lanzamiento del primer satélite en el 1960. Las actividades agrícolas abarcan grandes extensiones territoriales, lo que dificulta conocer con exactitud el estado de los ciclos vegetativos y reconocer los problemas que pueden existir de distribución de riego y el estado de salud de los cultivos y prever plagas y enfermedades. En este sentido la percepción remota aporta la información de monitoreo oportuna y precisa, teniendo así una tecnología rápida, precisa, económica, temporal y dinámica (Chen *et al.*, 2008). Existen diversas aplicaciones de la percepción remota en la gestión de riego y monitoreo agrícola (Boken *et al.*, 2004; Abuzar *et al.*, 2013; Ponvert Delisles and Lau Quan, 2013), requerimientos de riego (Casa *et al.*, 2009; Choudhury *et al.*, 2013; El-Shirbeny *et al.*, 2015), predicción de rendimiento (Chung *et al.*, 2003), humedad de suelos (Calagno *et al.*, 2007; Melton *et al.*, 2012) y fenología de cultivos (Brown and De Beurs 2008; Karlsen *et al.*, 2014). Una de las aplicaciones más importantes de la percepción remota en la gestión del riego es el cálculo de coeficiente de cultivo, albedo, temperatura superficial y evapotranspiración (Bashir *et al.*, 2007; Benhadj *et al.*, 2007; Calagno *et al.*, 2007; Castañeda-Ibañez, 2013; García *et al.*, 2013; Gonzalez-Dugo *et al.*, 2013; Amri *et al.*, 2014; Campos *et al.*, 2016; Kumar Singh *et al.*, 2016).

1.2. Sensores remotos aplicados a riego, historia y especificaciones

La respuesta espectral de la vegetación es la principal forma de medición de los sensores remotos, ya que los cuerpos tienen la propiedad de absorber y reflejar energía solar en diferentes longitudes de onda (Chen *et al.*, 2008). Los sensores remotos han sido ampliamente aplicados a la medición de variables climáticas relacionadas a la vegetación, principalmente al desarrollo vegetativo, área foliar, contenido de biomasa, clases de vegetación y vigor; entre otras. Por medio de sensores remotos es posible tener un monitoreo espacial y temporal de regiones agrícolas extensas (Bradley *et al.*, 2007; Bajocco *et al.*, 2010).

En las últimas décadas la percepción remota se está convirtiendo en una alternativa económica y viable para los agricultores, ya que provee de información de alta resolución espacial y temporal, y con ello es posible analizar regiones extensas de cultivo y su consumo de agua; también es posible analizar la distribución de los recursos hídricos por medio del cálculo del coeficiente de cultivo (K_c), obtenido de los índices de vegetación (VI, por sus siglas en inglés), el K_c basado en los índices de vegetación; y ayuda a predecir los requerimientos de riego en los cultivos (Bashir *et al.*, 2007; Cassa *et al.*, 2009; Glenn *et al.*, 2010; Glenn *et al.*, 2011; Abdul Karim *et al.*, 2013; Garcia *et al.*, 2013; Amri *et al.*, 2014; Farg *et al.*, 2015). En este sentido es una herramienta que facilita la toma de decisiones en la distribución del riego. Sin embargo, las escalas espaciales y la temporalidad de toma de imágenes pueden llegar a ser un problema, además de la disponibilidad de información de los diferentes sensores.

El riego asistido por imágenes de satélite es una herramienta que se está utilizando en regiones con problemas de gestión de agua, y ha contribuido a la recuperación de los mantos acuíferos y suelos, así como también beneficia al agricultor desde el enfoque económico (Alexandridis *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015; Peña-Arancibia *et al.*, 2016).

1.2.1. MODIS

La problemática ambiental a finales de los 80's trajo consigo un interés para el desarrollo científico, principalmente en el monitoreo de la cobertura vegetal, con el objetivo de evitar daños al equilibrio de los ecosistemas terrestres, así como la afectación del ciclo hidrológico, erosión de suelo, pérdida de biodiversidad, y a escalas mayores, el calentamiento global.

Hasta el año 2000, el único sensor que proporcionaba datos espectrales globales, era el Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés), sin embargo, la resolución espacial con la que cuenta es de 1 km, es decir, una resolución baja, ideal para realizar estudios a gran escala o a nivel global. Actualmente es utilizado principalmente para el monitoreo meteorológico, oceanográfico y evaluación de parámetros hidrológicos. En este sentido, se desarrollaron otros sensores, a bordo de diferentes satélites, es el caso del sensor Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés), a bordo de las plataformas EOS-AM1 Terra y EOS-PM1 Aqua, lanzadas en 1999 y 2002 respectivamente. Este sensor cuenta con 36 bandas espectrales que permite las mejoras en la corrección atmosférica, además la resolución espacial abarca desde los 250 m, 500 m y 1 km, en las dos primeras las resoluciones espectrales se encuentran entre los espectros rojo e infrarrojo además del espectro visible que permiten el detalle de la clasificación.

El satélite Terra conocido también como EOS-AM fue lanzado en diciembre de 1999, girando alrededor de la Tierra a una altitud de 708 km, y está programado para cruzar por el ecuador a las 10:30 de la mañana con una dirección norte-sur y una inclinación de 98.2° (Mas *et al.*, 2011). El tamaño de este satélite es de 3.5 x 6.8 m y su peso es de 5,200 kg, con una potencia de 2,530 W y la velocidad de transmisión de datos es de 18,545 kb/s, lleva a bordo cinco instrumentos: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES), Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) y Measurement of Pollution in the Troposphere (MOPITT) con diversas aplicaciones

científicas como: el monitoreo de la cobertura vegetal, investigación geológica, generación de Modelos Digitales de Elevación, propiedades de la cobertura de nubes y el monitoreo de gases de efecto invernadero; mientras que el satélite Aqua conocido también como EOS-PM fue lanzado en mayo de 2002 (Mas *et al.*, 2011), su dirección es sur-norte pasando por el ecuador a la 1:30 p.m. con una inclinación de 98° (Mas *et al.*, 2011), con un peso aproximado de 3 toneladas y una extensión de 4.8 m, además del sensor MODIS y el sensor CERES, lleva a bordo cuatro instrumentos: Atmospheric Infrared Sounder (AIRS), Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU-A), The Humidity Sounder for Brazil (HSB) y el Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E) estos sensores tienen diferentes usos ambientales como: el sondeo de la temperatura atmosférica, vapor de agua, precipitación y humedad.

El sensor MODIS cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit), con 36 bandas espectrales desde el espectro visible hasta el infrarrojo térmico y el rango de la longitud de onda es de 0.4 a los 14.4 μm , cuenta con una resolución espacial de 250 m, 500 m y 1 km, la temporalidad del sensor es de 16 días. Las primeras 19 bandas abarcan el rango de 0.405 y 2.155 μm , de la 1-7 su principal aplicación es terrestre, de la 8 a la 16 se utilizan en el monitoreo del océano y la 17 a 19 en estudios atmosféricos, las bandas 20 a la 36 con rango espectral de 3.666-14.385 μm que cubre la porción del infrarrojo térmico y las resoluciones espaciales varían desde 250 m (2 bandas) y 500 m (5 bandas) hasta 1 km (29 bandas) (Mas *et al.*, 2011). Entre las especificaciones técnicas del sensor MODIS, se encuentran un espejo móvil que escanea el terreno siguiendo la dirección de la trayectoria perpendicularmente a un ángulo de $\pm 55^\circ$ y la dimensión de la franja escaneada es de 2,330 km ortogonal por 10 km a lo largo de la órbita, y un telescopio con dos espejos fuera del eje focal que sirven para recibir la radiación y dirigirla a cuatro sistemas ópticos en diferente rango espectral. En el Cuadro 1, se muestran las especificaciones del sensor MODIS obtenidas de la página de internet MODIS Web NASA (Mas *et al.*, 2011).

En el Cuadro 2, se muestran las 36 bandas del sensor MODIS, en la columna 1 se están los usos principales de las bandas del sensor MODIS, entre los que se encuentran el monitoreo de las propiedades de las nubes incluyendo altitud, vapor de agua en las nubes, el monitoreo del color oceánico, detección de fitoplancton, características biogeoquímicas, evaluación del vapor de agua, detección de aerosoles, monitoreo de la capa de ozono, propiedades físicas de la superficie y temperatura de la superficie. La columna 3, contiene información del ancho de banda que es la región del espectro electromagnético que abarca cada banda del sensor, es decir su resolución espectral con la unidad de medida de nanómetro. En la columna 4, se muestra la radiancia espectral que es una medida del flujo radiante obtenida por el sensor que considera las porciones del espectro electromagnético es decir la longitud de la onda. En la columna 5, se muestra un factor para la calibración de los datos obtenidos del sensor, este factor discrimina la señal por la contaminación del ruido.

Cuadro 1. Especificaciones generales del sensor MODIS. Tomado y adaptado de Mas et al. (2011) <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.

Propiedad	Descripción
Órbita	Altitud: 708 y 705 km Terra/Aqua, pasando por el ecuador de forma descendente a la 10:30 a.m. y ascendente a la 1:30 p.m.; helio síncrona, casi polar, circular.
Tasa de escaneo	20.3 rpm, ortogonal
Dimensiones de la franja escaneada	2,330 km (ortogonal) por 10 km (a lo largo de órbita, al nadir)
Telescopio	17.78 cm diámetro con planos de desvío intermedios
Tamaño	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Peso	228.7 kg
Poder	162.5 W (promedio orbital)
Tasa de transferencia de datos	10.6 Mbps (pico); 6.1 Mbps (promedio orbital)
Codificación	12 bits
Resolución espacial	250 m (bandas 1-2), 500 m (bandas 3-7) y 1000 m (bandas 8-36)
Vida útil	6 años

Cuadro 2. Características espectrales del sensor MODIS tomada y adaptada de Mas et al. (2011) <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>.

Principal uso	Banda	Ancho de banda	Radiancia espectral	SNR3 o NE (delta) T requerido T(K)4
Límites de Tierra/Nubes/aerosoles	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Propiedades de Tierra/Nubes/aerosoles	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1	110
Color del océano/ fitoplancton/ biogeoquímica	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
	16	862 - 877	6.2	516
Vapor de agua atmosférico	17	890 - 920	10	167
	18	931 - 941	3.6	57
	19	915 - 965	15	250
Temperatura de la superficie/nubes	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
Temperatura atmosférica	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07

	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
Vapor de agua de nubes Cirrus	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
	26	1.360 - 1.390	6	150(SNR)
Propiedades de las nubes	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Ozono	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
Temperatura de la superficie/nubes	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
Altitud de las nubes	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

¹ Bandas de la 1 a la 19 están en nm; Bandas de la 20 a la 36 en μm .

² Los valores de radiancia espectral están en $\text{W} / \text{m}^2 / \mu\text{m} / \text{Sr}$.

³ SNR = ratio de señal de ruido.

⁴ NE (Δ) T requerido = Diferencia de temperatura equivalente al ruido.

Yang *et al.* (2012) utilizaron datos del sensor MODIS, para evaluar el distrito de riego Hetao, situado al oeste de la Región Autónoma de Mongolia, al Norte de China ($40^{\circ}48'54''$ N - $111^{\circ}39'47''$ E), el principal objetivo fue conocer el patrón espacial de la evapotranspiración (ET) de la región así como su variabilidad interanual, enfocado a la recuperación del manto acuífero, utilizaron una resolución de 250 m y una serie temporal de 11 años de imágenes, realizaron el análisis utilizando el modelo SEBAL (Bastiaansen *et al.*, 1998), que consiste en calcular la ET mediante imágenes de

satélite y la ecuación residual de balance de energía. Entre los principales resultados encontraron que el modelo SEBAL es una buena herramienta para aplicar en regiones extensas de cultivo, teniendo un 14.6% de error relativo, encontraron que las tierras agrícolas la ET aumentaba, debido a la variabilidad interanual, sin embargo, el consumo de agua no favoreció a la recuperación de las aguas subterráneas, ya que existe una región la cual tiene zonas arenosas que favorecen la infiltración.

Conrad *et al.* (2007) investigaron el noreste de Uzbekistan, la región de Khorezm (41°20' N - 61°0' E), alrededor de 2600 km² de riego. El principal objetivo del estudio fue analizar la mala distribución de los recursos hídricos del principal cuerpo de agua, debido a que se reportaban pérdidas de hasta el 40%, incluyendo la evaporación y la infiltración a los acuíferos. Utilizaron datos del sensor MODIS para evaluar la ET por medio del modelo SEBAL, obtuvieron el $R^2 = 0.6$ indicando una asociación moderada entre la ET y la evaporación, la comparación espacio-temporal del uso del agua, obtenido por medio de imágenes y el reportado anualmente, revelaron la mala distribución de los recursos hídricos, por las pérdidas de agua por evaporación y el tipo de sistema de riego, concluyeron que los datos MODIS son una herramienta con datos fiables y consistente como apoyo a la toma de decisiones en la gestión de agua.

1.2.2. Landsat

La constelación de los satélites Landsat es uno de los principales sensores que proveen información terrestre de resolución moderada, a cargo de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés). Este programa ha evolucionado para proveer de información más precisa y detallada, tanto en las correcciones radiométricas geométricas y espaciales. A partir de 1972 inicio el programa Landsat con los satélites ERTS-1, Landsat 2 y 3 con una órbita circular, casi polar, a una altitud de 920 km, girando alrededor del planeta cada 103 minutos y 27 segundos, teniendo un paso por el ecuador a las 9:30 am, con una temporalidad de 18 días, estos satélites abarcaban una región de aproximadamente 185 km, los sensores abordo eran el RVB en ERTS-1 y Landsat 2 y MSS en Landsat

2 y 3, comprendían el espectro electromagnético del visible hasta el infrarrojo cercano, y la resolución espacial para ERTS-1 y Landsat 2 era de 80 m, mientras que para Landsat 3 era de 40 m (Cuadro 3).

Cuadro 3. Características de satélite ERTS-1, Landsat 2 y Landsat 3.

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Azul	0.452 - 0.512	80
2	Verde	0.533 - 0.590	80
3	Rojo	0.636 - 0.673	80
4	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	80

En los 90's fueron lanzados los satélites Landsat 4, Landsat 5 y Landsat 6, sin embargo, Landsat 6 tuvo problemas técnicos, que impidieron poner en órbita el satélite, los satélites Landsat 4 y Landsat 5 sufrieron algunas modificaciones orbitales así como en sus características físicas. La altitud se modificó de 920 km a 705 km y la temporalidad a 16 días, una escena abarcaba un área de 185 km², con un periodo orbital de 98.9 min, el satélite Landsat 4 llevaban a bordo el sensor MSS, sensor multiespectral específicamente usado para estudios agrícolas, sin embargo contaba con una resolución espacial de 80 m (Cuadro 4), por otro lado el Landsat 5 llevaba a bordo el sensor TM, sensor de barrido multiespectral, proporciona una mayor resolución espacial y precisión radiométrica, contando con una resolución espacial de 30 m en el espectro visible e infrarrojo medio y 120 m en la banda infrarroja termal, la escena abarca 185 km (Cuadro 5).

Cuadro 4. Características de satélite Landsat 4

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Azul	0.452 - 0.512	80
2	Verde	0.533 - 0.590	80
3	Rojo	0.636 - 0.673	80
4	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	80

Cuadro 5. Características de satélite Landsat 5

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Azul	0.452 - 0.512	30
2	Verde	0.533 - 0.590	30
3	Rojo	0.636 - 0.673	30
4	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
5	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
6	Infrarrojo termal	10.40-12.50	120
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30

El satélite Landsat 7 fue lanzado en 1999 con vida útil de 5 años, capaz de recolectar 532 imágenes diarias, cuenta con una órbita heliocéntrica, es decir que pasa a la misma hora en determinado lugar, a bordo lleva el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), las características iguales a la de su antecesor, además un banda pancromática con resolución espacial de 15 m, el objetivo del Landsat 7 era actualizar la base de datos de imágenes, sin embargo, en el 2003, sufrió un fallo en el área del sensor, al adquirir las imágenes delinean un patrón de líneas sin datos, que puede ser posible corregir, con métodos de interpolación, estos sensores son de utilidad en el monitoreo de la vegetación, geología, hidrología y aplicaciones agrícolas (Cuadro 6).

Cuadro 6. Características de satélite Landsat 7

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Azul	0.452 - 0.512	30
2	Verde	0.533 - 0.590	30
3	Rojo	0.636 - 0.673	30
4	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
5	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
6	Infrarrojo termal	10.40-12.50	60
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30

Por último, en el 2013 fue lanzado el satélite Landsat 8, el satélite orbita a una altitud de 705 km y cada 99 min pasa por el mismo punto, con una temporalidad de 16 días y desfase de 8 días con respecto a Landsat 7, al día se obtienen 650 imágenes. Contando con características similares a sus antecesores, además contando con 11 bandas espectrales, que permiten mayor posibilidad de combinaciones, estas bandas espectrales son tomadas por dos instrumentos a bordo, el OLI Y TIRS, Operational Land Imager y Thermal Infrared Sensor, las bandas del 1 a 9 son captadas por OLI y 10 y 11 por TIRS (Cuadro 7).

Cuadro 7. Características de satélite Landsat 8

Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	Costera - Aerosoles	0.435 - 0.451	30
2	Azul	0.452 - 0.512	30
3	Verde	0.533 - 0.590	30
4	Rojo	0.636 - 0.673	30
5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 - 0.879	30
6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 - 1.651	30
10	(TIR 1)	10.60 - 11.19	100
11	(TIR 2)	11.50 - 12.51	100
7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 - 2.294	30
8	Pancromática	0.503 - 0.676	15
9	Cirrus	1.363 - 1.384	30

Las imágenes obtenidas de los satélites Landsat tienen diversas aplicaciones en agricultura, por su temporalidad y resolución espacial, por ejemplo Castañeda-Ibañez *et al.* (2015) estudiaron el Distrito de Riego Yaqui ($26^{\circ}45'40''\text{N}$ - $109^{\circ}45' \text{O}$), en el estado de Sonora en México, utilizaron imágenes de satélite Landsat 5 y Landsat 7 para estimar evapotranspiración por medio de un modelo, para validar los índices de vegetación obtenidos mediante imágenes de satélite, también validaron los datos espectrales con mediciones en campo de flujos turbulento con torres de covarianza, mostraron alto grado de correspondencia con un RMSE de 0.69, concluyendo que los índices de vegetación permiten determinar la variabilidad de la ET y el K_c en regiones agrícolas extensas.

Kumar Singh *et al.* (2016) estudiaron la región de Bhadarabad (24°53' N - 67°04' E), al norte de India, una región con problemas en la mala distribución del riego, y un gasto de energía elevado. En ella se ha provocado un agotamiento del 25% en las aguas subterráneas y la demanda va en aumento. Los autores utilizaron imágenes Landsat 8 para realizar una programación de riego con base a la percepción remota, obtuvieron que el enfoque sugerido para la programación de riego mediante sensores remotos puede optimizar agua de riego en un 12.5% en comparación con el enfoque convencional o prevaleciente en el área de estudio.

1.2.3. Spot

El Centro Nacional de Estudios Espaciales Francés (CNES, por sus siglas en francés) desarrolló el programa de satélite SPOT desde el año 1985. A la fecha existen varias series de satélites SPOT, particularmente los satélites SPOT-4 y SPOT-5 que llevan a bordo el sensor VEGETATION 1 y 2 lanzados en los años 1998 y 2002 respectivamente (Henry, 1999; Jarlan *et al.*, 2008). Estos programas fueron implementados por Francia, Bélgica, Italia y Suecia, teniendo como objetivo principal proveer de información de la caracterización de la vegetación y porcentaje de cobertura de las regiones continentales (Saint, 1996; Henry, 1999; Hass *et al.*, 2009). Los instrumentos se encuentran a una altitud de 822 km, cuentan con una órbita casi polar, se pueden obtener de diferentes escalas, una escena puede llegar a abarcar 60 km con resoluciones moderadas de 20 m y resoluciones altas de hasta 1.5 m, sin embargo, las escenas SPOT pueden llegar a tener costo por km². Los instrumentos obtienen información espectral en un rango que abarca desde el azul (BLUE), rojo (RED), infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo térmico (SWIR). Y cuentan con una resolución espacial de 1 km cubriendo un área total de 2400 km por imagen y con una cobertura global diaria (Henry, 1999; Jarlan *et al.*, 2008; Hass *et al.*, 2009) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Características de satélites SPOT

Productos	pancromáticos : 2,5 m - 5 m - 10 m Multiespectrales : 2,5 m - 5 m - 10 m - 20 m
Bandas espectrales	P (pancromáticas) ; B1 (verde) ; B2 (rojo) ; B3 (infrarrojo cercano) ; B4 (SWIR : infrarrojo de onda corta, para SPOT 4 y 5)
Campo amplio	60 km x 60 km
Intervalo de revisita	2 a 3 días 1 día con constelación total de satélites SPOT
Selección según necesidad	Sí, estándar o prioritaria
Archivo mundial	> 20 millones de imágenes desde 1986
Ángulo de visión	Deriva : +/- 27° Estereovisión hacia delante / hacia atrás con SPOT 5
Exactitud de ubicación	< 30 m (1 σ) con SPOT 5 < 350 m (1 σ) con Spot 1 a 4 Ortoproductos : < 10 m (1 σ) con Base de datos de referencia en 3D En otras circunstancias, depende de la calidad de los puntos de control terrestre y MDE
Niveles de preprocesamiento	1A, 1B, 2A, Ortho

Existen diversos trabajos realizados con los sensores instalados en los satélites SPOT. Por ejemplo, Amri *et al.* (2014), estudiaron la llanura Kairouan en el centro de Túnez (35°45" N - 10°15 E) el objetivo principal fue evaluar el potencial de imágenes de satélite SPOT para la estimación de evapotranspiración regional, el

enfoque propuesto se combina el método FAO-56 por medio de percepción remota, los coeficientes de cultivo y las fracciones de cobertura se estimaron utilizando correlaciones y compararon los datos medidos con datos obtenidos en campo en un estudio anterior, concluyeron que los valores de evaporación y humedad de suelo pueden ser estimados por medio de percepción remota.

Farg *et al.* (2015) estudiaron una región próxima al Delta del Nilo, Egipto ($30^{\circ}54'$ N - $31^{\circ}7'$ E) clima árido mediterráneo, con precipitación anual de 0.65 mm, el objetivo del estudio fue estimación de los K_c y ET_c (Evapotranspiración de cultivo), utilizaron datos de satélite SPOT-4, aplicaron análisis de regresión lineal múltiple para poder obtener una ecuación de predicción de K_c en las diferentes etapas de desarrollo fenológico, los resultados mostraron que la percepción remota es una buena herramienta para el seguimiento de los cultivos en su etapa vegetativa y buen indicador para el cálculo del requerimiento de riego en regiones de cultivo extensas.

1.2.4. Sentinel

El satélite Sentinel es un desarrollo de la Agencia Espacial Europea, en el marco del Programa Copérnico, se incluyen sensores de radar y sensores multiespectrales, para aplicaciones en la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica (Kuenzer *et al.*, 2015).

Sentinel-1 proporciona imágenes de radar terrestres y oceánicas durante todo el tiempo, día y noche. El primer satélite Sentinel-1A se lanzó con éxito el 3 de abril de 2014 por un Arianespace Soyuz, desde el Puerto espacial de Kourou en Guyana. El segundo satélite Sentinel-1B se lanzó el 25 de abril de 2016 desde el mismo puerto espacial. Sentinel 2 lleva a bordo una cámara multiespectral de alta resolución, cuenta con 13 bandas espectrales capaz de abarcar un área de 290 km de ancho y una temporalidad de 5 a 10 días. Como principal objetivo tiene proporcionar datos útiles para la agricultura y estudios forestales, y contribuir a la gestión de la seguridad alimentaria, derivar índices vegetales que ayuden a determinar el ciclo vegetativo y debido a su alta resolución espacial obtener más detalle de los cambios de la superficie terrestre (Kuenzer *et al.*, 2015). Por otro lado se encuentra Sentinel 2^a, que es la colaboración entre la Agencia Espacial Europea y el sector privado, fue lanzado en junio del 2015 y cuenta con un sensor multiespectral con características similares a su antecesor y con mejoras en la calidad de imagen. Sentinel-2B fue lanzado en marzo de 2017, ofrece una amplia gama de oportunidades para el estudio de la superficie terrestre, contando con características similares a las de su antecesor, además de una calidad en imágenes y mayor capacidad de almacenamiento de información y de transmisión de datos (ESA, 2017) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Características de satélites Sentinel

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1	0.435 - 0.451	60
2	0.452 - 0.512	10
3	0.533 - 0.590	10
4	0.636 - 0.673	10
8	0.851 - 0.879	10
8a	1.566 - 1.651	20
9	10.60 - 11.19	60
10	11.50 - 12.51	60

El satélite Sentinel ha sido empleado en diversas investigaciones, principalmente en monitoreo de cobertura vegetal y análisis de cambios de uso de suelo, en el enfoque de la irrigación se ha empleado para el cálculo de requerimiento de riego, sin embargo, en pocos lugares se ha desarrollado, debido a la poca disponibilidad de información y la falta de validación de los datos espectrales obtenidos por Sentinel, el uso de este satélite se ha empleado por medio de estudios multisensor, en la región de Wako-Kungu, provincia de Kwanza al sur de Angola ($11^{\circ}25'33''$ S - $15^{\circ}6'10''$ E) donde evaluaron los parámetros de cultivo utilizando datos del satélite SPOT y Sentinel, obtuvieron el K_c y monitorearon la fenología, y calcularon las necesidades de agua en diversos cultivos (Navarro *et al.*, 2016).

Por ejemplo Plaza-Jiménez (2017) estudio zonas de cultivo en la provincia de Albacete, Comunidad de Castilla-La Mancha ($38^{\circ} 57'N$, $01^{\circ} 50'E$), en el centro de España, utilizó la percepción remota para la predicción de las necesidades de riego en diversos cultivos, integró datos de satélite Landsat 8 y Sentinel 2^a, utilizo el K_c obtenido de datos espectrales y con el modelos FAO-56 estimó el ET_c , teniendo así las necesidades netas de riego para cada cultivo, además formando series de tiempo de índices de vegetación obtuvo por medio de regresión lineal simple una predicción del K_c , apoyado de los datos meteorológicos y la actualización de las bases de datos de imágenes obtuvo ET_c con una semana de antelación, generando un herramienta para la planeación de riego, optimización de los recursos hídricos y ahorro de energía.

1.3. Alcances y perspectivas de la percepción remota

El constante desarrollo de la percepción remota, que incluyen mejoras en las características de los sensores, en la calidad de imágenes, la resolución espacial, la temporalidad y la tecnología espectral combinado del desarrollo de algoritmos de procesamiento y la disponibilidad de información, ha generado un desarrollo en trabajos de investigación, principalmente en el enfoque de recursos naturales y el monitoreo de la cobertura terrestre. En este sentido, la gestión agrícola ha tenido un importante avance desde el lanzamiento de los primeros satélites, convirtiendo la percepción remota en una técnica ideal para el monitoreo y manejo de los recursos agrícolas (Chen *et al.*, 2008). La cantidad de información y la temporalidad de las imágenes permiten generar series de tiempo que permiten estimar variables agrícolas utilizadas para la predicción de rendimientos de cultivo y el estado fenológico. Los modelos basados en percepción remota se utilizan por su simplicidad, sin embargo, se tienen deficiencias en métodos de validación matemáticos o por medio de técnicas *in situ*. En los últimos años se han desarrollado técnicas para el seguimiento de los cultivos a diferentes escalas, regionales y extensas, estimando parámetros de cultivos (Chen *et al.*, 2008). En este sentido, se han generado técnicas que permiten evaluar el consumo de agua, y las necesidades de riego en los cultivos, permitiendo así, una planeación de riego, mejorando la distribución y optimización de los recursos hídricos, y para el agricultor la disminución del consumo de energía y aumento en el rendimiento de cultivo, además de sustentabilidad del suelo. La demanda hídrica de los cultivos y la estimación precisa de los volúmenes por medio de teledetección han de considerarse una herramienta potencial para el manejo del agua, considerando las características de cada cultivo y las condiciones agroclimáticas de cada región, desde el enfoque medioambiental y el aumento de la productividad (Calera *et al.*, 2016).

Capítulo 2

Determinación de la eficiencia de riego mediante datos espectrales Landsat 8 OLI en el ejido de San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, México

Resumen

El cálculo de la evapotranspiración (ET) a nivel regional permite estimar el consumo de agua de los cultivos y el suelo, los métodos convencionales para su cálculo son puntuales y no permiten obtener una distribución espacial del comportamiento de la ET en grandes extensiones. El presente capítulo presenta la metodología K_c-ET_0 utilizada ampliamente en diversas investigaciones para el cálculo de la ET utilizando NDVI obtenido de imágenes de satélite Landsat 8 OLI. Se realizó el balance de agua en el suelo que permite calcular la disponibilidad de agua anual para los cultivos. Posteriormente se calculó la ET anual para el cultivo maíz en conjunto con datos de volumen aportado de la fuente principal de agua y la precipitación efectiva. Se realizó la evaluación de la eficiencia de riego, dando un total de 47.5%. Este resultado estuvo acorde con investigaciones realizadas a nivel parcela en la misma región de estudio. La metodología desarrollada representa una herramienta fiable y eficaz para el cálculo de la ET en grandes extensiones de cultivo.

Palabras clave: Evapotranspiración, K_c , NDVI, Landsat 8 OLI, eficiencia de riego.

Abstract

Estimating evapotranspiration at regional level is required to know crop water intake. This work presents the widely used K_c-ET_0 approach in order to spatially estimate evapotranspiration by using the normalized difference vegetation index built from Landsat 8 OLI spectral data. A water balance in soil was calculated in order to know the water budget available for crop. Maize evapotranspiration was calculated using both the amount of effective precipitation as well as, the volume from the main source of water. An irrigation efficiency at parcel level in the same study area was estimated in 47.5 % being comparable with previous works. The methodology proposed is a reliable and effective tool for calculating evapotranspiration in large cultivated lands.

Keywords: Evapotranspiration, K_c , NDVI, Landsat 8 OLI, irrigation efficiency.

2.1. Introducción

En México del porcentaje total de agua que se utiliza el 80% se destina al riego para la producción de alimentos, debido a la demanda existente para el aumento exponencial de la población. Las regiones de riego son 4 veces más productivas que las área de cultivo temporal, en este sentido, la producción nacional se genera por agricultura de riego (Pineda-Morín, 2013). Es necesario implementar estrategias para la optimización de los recursos hídricos, el aumento de la productividad y una optimización en la energía en áreas de cultivo, en este sentido, se han desarrollado metodologías utilizando datos de percepción remota para la gestión adecuada de riego, principalmente para la evaluación de variables biofísicas que permiten tener un monitoreo del desarrollo de la vegetación. La estimación de los indicadores biofísicos por medio de percepción remota se centran en el cálculo del coeficiente de cultivo (K_c) (Neale et al., 1989) y con ello obtener el mapeo de la Evapotranspiración de cultivos (ET_c) (Amri et al., 2014) o de vegetación natural (Calera et al., 2016). La temporalidad de las imágenes de satélite de los diversos sensores, permiten generar, series de tiempo, que hacen posible evaluar distintas variables climáticas. El objetivo de este capítulo evaluar la eficiencia de riego utilizando técnicas de percepción remota y datos meteorológicos, aplicando el modelo FAO-56 (Allen et al., 1998), metodología ampliamente usada y aplicada para la estimación de necesidades de agua de la cubierta vegetal, determinada por la Evapotranspiración (ET), calculada por el método dual Coeficiente de cultivo-Evapotranspiración de referencia (K_c-ET_0) descrito en el manual FAO-56 (Allen et al., 1998). Desde el enfoque de gestión adecuada de riego se busca la correcta distribución de los recursos hídricos, protegiendo las aguas subterráneas y superficiales, regar un área más extensa sin disminuir el volumen asignado para el agricultor.

2.2. Fundamentos teóricos de la determinación de la eficiencia de riego por medio de percepción remota

Se han desarrollado diversas metodologías para la estimación de los requerimientos de riego para diferentes cultivos utilizando la percepción remota (Casa *et al.*, 2008; Gleen *et al.*, 2010; Amri *et al.*, 2014; Guermazi *et al.*, 2016), el principal interés de los trabajos es la cuantificación de la evapotranspiración (ET), la metodología más utilizada y comúnmente aceptada y validada es la del coeficiente de cultivo “dual” (Wright, 1982), que permite estimar la evapotranspiración como suma, la transpiración o la circulación de agua en la planta y la evaporación desde el suelo desnudo, en este sentido, se relaciona K_c-ET_0 para obtener un valor de ET definido como las necesidades agua de un cultivo o la cantidad de agua que se gasta por evaporación y transpiración de la planta. El procedimiento K_c-ET_0 , considera que la ET, es el producto de dos factores, el primero K_c es el requerimiento evaporativo de la atmósfera relacionado también al desarrollo vegetativo, relacionado al desarrollo fenológico de distintos cultivos, y el segundo la ET_0 engloba parámetros meteorológicos como la radiación, temperatura, velocidad de viento, humedad de aire. El procedimiento FAO-56, incorpora el K_c dual que permite estimar un valor muy próximo de la ET_c , esto dado por la suma de la transpiración (K_{cb}) de la planta y la evaporación desde el suelo desnudo (K_e) (Calera *et al.*, 2016). La estimación de ET_c en ausencia de estrés hídrico se calcula con las ecuaciones (1) y (2)

$$(1) ET_c = K_c ET_0$$

$$(2) ET = K_{cb} ET_0 + K_e ET_0$$

Donde:

ET: evapotranspiración del cultivo

ET_0 : evapotranspiración de referencia

K_c : coeficiente de cultivo “único”

K_{cb} : coeficiente de cultivo basal o coeficiente de transpiración

$K_{cb} ET_0$ es la componente de la transpiración en ausencia de estrés

K_e : coeficiente evaporativo

$K_e ET_0$: es la componente de evaporación desde el suelo

La disponibilidad del agua en la superficie, puede ser uno de los factores limitantes en el desarrollo vegetativo en condiciones semiáridas, es decir, cuando el contenido de agua en el suelo cae por debajo de cierto valor umbral, la planta no puede extraer al ritmo de la demanda evaporación y transpiración, es entonces que la planta entra en estrés hídrico, que llegan a afectar a la planta a tal grado de la limitación en el crecimiento vegetativo y el desarrollo del área foliar, y si el grado de estrés aumenta las hojas pueden morir. El estrés hídrico en el método K_c-ET_0 se considera introduciendo un coeficiente de estrés K_s , como en la ecuación (3), el coeficiente toma valores del rango 0 a 1, en donde el valor igual a 1 indica que la planta no se encuentra en estrés, es entonces que la ecuación (3) se convierte en la (2), por otro lado cuando el valor se acerca o es igual a 0, K_s se refiere a un máximo de estrés. Cuando se utiliza el coeficiente único K_c se introduce en la fórmula FAO-56 se muestra la ecuación (4). Las ecuaciones (3) y (4) se convierten en las ecuaciones (1) y (2), mientras la planta se encuentra en ausencia de estrés, es decir $K_s = 1$, el cálculo del coeficiente K_s se hace en el modelo FAO-56 calculando el contenido de agua en el suelo, mediante el balance de agua, estimando la disponibilidad de agua para las raíces. En este sentido, la determinación del estrés hídrico permite la aplicación de técnicas de riego que posibilitan la planeación correcta del agua de riego, es decir la aplicación correcta de la cantidad de agua para un manejo de cultivo eficaz, cuidando la productividad y sin poner en riesgo de estrés a la planta (Calera *et al.*, 2016)

$$(3) K_s K_{cb} ET_0 + K_e ET_0$$

$$(4) K_s K_{cb} K_c ET_0$$

Desde el enfoque del método FAO-56, la metodología K_c-ET_0 basada en percepción remota se obtiene un valor del K_c desde los datos espectrales obtenidos de los sensores a bordo de satélites de monitoreo ambiental (Bashir *et al.*, 2007; Gontia and Tiwari *et al.*, 2010; Glenn *et al.*, 2011; Farg *et al.*, 2012; Abdul Karim *et al.*, 2013;

Campos *et al.*, 2013; Amri *et al.*, 2014; Kumar Singh *et al.*, 2016), el K_c derivado de los índices de vegetación es considerado como una herramienta potencial para el cálculo de los requerimientos de riego (Allen *et al.*, 2011). El uso de series de tiempo de imágenes de satélite permite describir los coeficientes de cultivo a lo largo del ciclo vegetativo, proporcionando una descripción espacial de la vegetación distinguiendo las variaciones y calculando las necesidades de agua espacialmente distribuidas (Calera *et al.*, 2016).

2.2.1. Eficiencia del uso del agua

La eficiencia del uso del agua en una región de riego se puede ver afectada por la red de distribución, y se puede calcular obteniendo las diferentes eficiencias de como la red mayor, red menor, sin embargo estas son metodologías aplicadas *in situ*, dificultando la medición y el cálculo de diferente red, además de la disponibilidad de datos a nivel parcelario, por ejemplo Castañeda-Ibañez (2013) estudió el distrito de riego Yaqui, su principal objetivo fue calcular la eficiencia del uso del agua en el riego del distrito, aproximadamente 230,000 Ha, calculó la eficiencia del uso del agua utilizando los volúmenes entregados por las aguas subterráneas y la precipitación efectiva con datos meteorológicos y utilizando el modelo METRIC para cálculo de ET_c por medio de sensores remotos obtuvo una eficiencia del uso del agua de 66%, en comparación a los datos reportados por la Subdirección General del Distrito de Riego, señaló que el valor puede estar sobreestimado, sin embargo, puede ser una buena variable de referencia al hacer cálculos de grandes extensiones y se podría mejorar el estudio si se contaran con datos *in situ* a nivel parcelario, buscando el mejor aprovechamiento de los recursos hídricos y aumento de la productividad.

2.2.2. Uso consuntivo

Definido como la cantidad de agua necesaria para suministrar en suelo, teniendo como objetivo satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, que será utilizada durante todo el ciclo vegetativo para la satisfacer las necesidades. Este concepto fue empleado para mencionar el agua consumida por la Evapotranspiración, sin embargo, el consumo de humedad abarca el 99% del total del uso consuntivo y el utilizado por la planta para la formación de tejido abarca el 1% (Pineda-Morín, 2013).

2.2.3. Evaporación

Es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante, influyen diversos factores para que realice la evaporación, por ejemplo la energía solar directa, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, por otro lado también influye el grado de cobertura del suelo y la cantidad del agua disponible en este proceso (Manual FAO 56)

2.2.4. Transpiración

Es la vaporización del agua líquida en los tejidos de la planta y su posterior remoción a la atmósfera, es decir, los cultivos pierden agua a través de las estomas, además de la pérdida de gases y el vapor de agua. Este proceso ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares y el intercambio del vapor con la atmósfera controlado por las estomas. Este proceso es afectado por factores climáticos como la velocidad del viento, presión de vapor, por otro lado afectan el contenido de agua en el suelo, y la capacidad de infiltración del mismo, además de la salinidad y el medio donde se llevan a cabo las prácticas agrícolas (Manual FAO 56).

2.2.5. Evapotranspiración

Los procesos de pérdida de agua por parte del suelo y de la planta ocurren simultáneamente y es denominada Evapotranspiración, la evaporación de los suelos con cobertura vegetal es determinada principalmente por la fracción de la radiación solar que llega al suelo, que se ve disminuida de acuerdo al ciclo vegetativo, conforme aumenta el dosel y cubre mayor parte del suelo desnudo. En las etapas iniciales del cultivo el agua se pierde en mayor porcentaje por evaporación directa, conforme avance el ciclo fenológico disminuye la evaporación y aumenta transpiración de la vegetación, y en las etapas finales cuando la vegetación llega a cubrir mayor parte del suelo desnudo la transpiración se convierte en un proceso principal. En este proceso influyen diversos factores atmosféricos como la temperatura del aire, humedad relativa, radiación incidente y velocidad del viento (Manual FAO 56).

2.2.6. Evapotranspiración de referencia

La tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua, se conoce como evapotranspiración de referencia, y se denomina ET_0 . La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Este concepto se introdujo para estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo (Allen *et al.*, 1998). Los únicos factores que afectan a ET_0 son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_0 se considera también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_0 expresa la demanda o poder evaporativo de la atmósfera sin considerar las características del cultivo ni los factores del suelo. Desde este punto de vista, el método FAO Penman-Monteith es el único que determina ET_0 con parámetros climáticos, además cuenta con bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos.

2.2.7. Evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar

Este término se refiere a la evapotranspiración de una cubierta vegetal bajo condiciones estándar, es decir, en condiciones óptimas de suministro de agua, con un adecuado suministro de nutrientes, libre de enfermedades, en extensas superficies, con el objeto de obtener la máxima producción bajo unas condiciones climáticas dadas. La cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo se define como necesidades de agua del cultivo. A pesar de que los valores de la evapotranspiración del cultivo y de las necesidades de agua son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua perdida a través de la evapotranspiración. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva. El requerimiento de agua de riego también incluye agua adicional para el lavado de sales, y para compensar la falta de uniformidad en la aplicación de agua (Manual FAO 56).

2.2.8. Coeficiente de Cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo se define como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar, ET_c , y la evapotranspiración de la superficie de referencia, ET_0 , en la forma:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (5)$$

Por tanto, el K_c trata de reflejar aquellas características que diferencian el cultivo de la superficie de referencia. Dichas características son la altura del cultivo, el albedo de la cubierta, que depende de la fracción de cobertura vegetal, el área de las hojas, el número de estomas y el área expuesta de suelo desnudo, que depende a su vez de la fracción de cubierta vegetal, y que determina la evaporación desde el suelo (Allen *et al.*, 1998). A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán

progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo del período de crecimiento del mismo, describiendo una curva cuya forma refleja los cambios en la vegetación y en la cobertura vegetal causados por el crecimiento y la maduración en el ciclo de desarrollo del cultivo. La evolución del coeficiente de cultivo a lo largo de un ciclo de crecimiento de un cultivo bajo condiciones óptimas se muestra en la Figura 1 (Calera, 2005). La curva que define el coeficiente de cultivo refleja cómo el cultivo se desarrolla para optimizar los recursos de radiación, agua y nutrientes, cambiando entre otros parámetros la cobertura del suelo, LAI y altura. Normalmente, este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final de temporada.

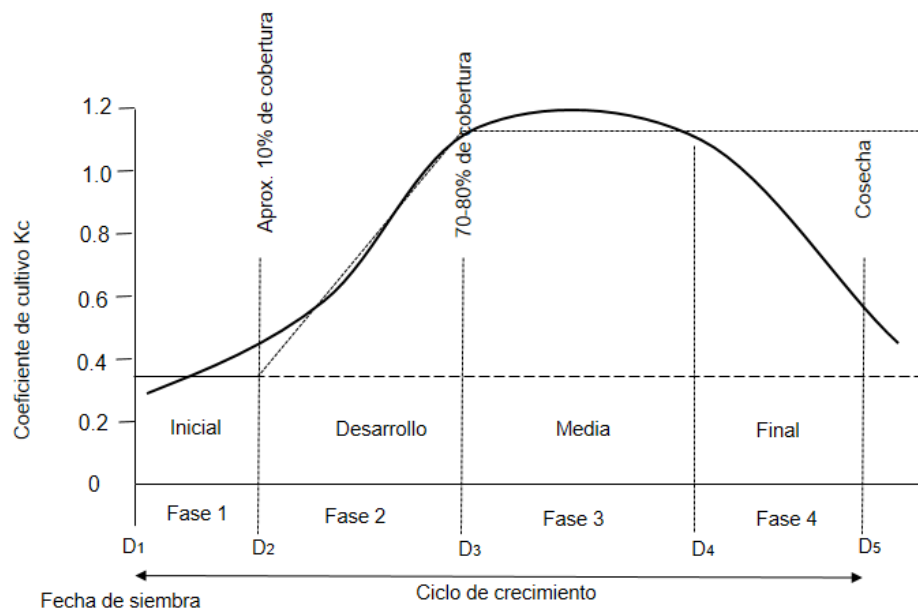


Figura 1. Evolución temporal del coeficiente de cultivo, con las diferentes fases en las que se divide el ciclo de crecimiento. Tomado de Calera, 2005.

Fase inicial

Comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10 % de cobertura del suelo. La duración de esta etapa depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima. Durante el período inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el período inicial ($K_{c,ini}$) depende fuertemente de la fracción de superficie mojada del suelo y del tiempo que permanezca en ese estado, que dependerá del intervalo de tiempo entre eventos que humedezcan el suelo, del poder evaporante de la atmósfera y de la magnitud del evento de humedecimiento. Por tanto, el valor de $K_{c, ini}$ debe ser ajustado a las condiciones de estado del suelo. Para un suelo seco, un valor típico podría corresponderse con $K_{c, ini} = 0.2-2$. Fase de desarrollo del cultivo La fase de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10 % hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. La cobertura efectiva completa se define como el estudio de crecimiento del cultivo en el que la relación entre la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar y la de referencia es máxima, esto ocurre cuando el coeficiente de cultivo alcanza su valor máximo. La variación que experimenta el coeficiente de cultivo desde $K_{c, ini}$ hasta el correspondiente a la cobertura efectiva completa, $K_{c, med}$ se aproxima por una relación lineal (Plaza Jiménez, 2017).

Para cultivos en hileras, donde se presenta comúnmente un solape entre las hojas, tales como maíz, remolacha azucarera o patata, la cobertura efectiva completa puede ser definida como el momento cuando algunas hojas de las plantas en hileras adyacentes comienzan a solaparse, lo que produce un sombreado casi completo del suelo, o cuando las plantas casi alcanzan su tamaño máximo. Para algunos cultivos, principalmente aquellos de más de 0.5 m. de altura, al inicio de la cobertura efectiva completa la fracción promedio de la superficie del suelo cubierta por la vegetación (f_c) es alrededor 0.7-0.8. Tanto la fracción de suelo expuesta al sol como la fracción sombreada de suelo no variarán significativamente cuando el cultivo

tenga un crecimiento más allá del correspondiente a una $f_c \approx 0.7$ a 0.8 . Se sobreentiende que el cultivo o la planta puede continuar su crecimiento, tanto en altura como en área foliar, después de alcanzar el estado de cobertura efectiva completa. Debido a que es difícil determinar visualmente cuando algunos tipos de vegetación densa y diseminada alcanzan la cobertura completa, tal como en los casos de los cereales de invierno y primavera y algunos pastos, se utiliza la etapa de floración como un indicativo más simple para determinar la presencia de la cobertura completa en este tipo de cultivos. Otra manera de definir el momento de cobertura completa es cuando el índice del área foliar (IAF) alcanza un valor de 3. Se define como IAF al promedio de la suma del área total de las hojas (un solo lado), por unidad de área de la superficie del suelo. A medida que el cultivo se desarrolla y sombrea cada vez más el suelo, la evaporación se verá cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convertirá en el proceso más importante (Plaza Jiménez, 2017).

Fase media

La etapa de mediados de temporada corresponde con el período entre la cobertura completa y el comienzo de la madurez. Durante este período, el coeficiente $K_{c,med}$ alcanza su valor máximo, que se mantiene relativamente constante, de tal forma que su evolución suele presentarse en forma de meseta. Asimismo, la cobertura vegetal verde se mantiene aproximadamente constante durante esta fase. El inicio de la maduración se manifiesta a menudo en las hojas por el envejecimiento, amarilleamiento o senescencia y consecuente caída o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la ET_0 de referencia. En cultivos permanentes y una gran variedad de cultivos anuales, supone la etapa más larga del ciclo, sin embargo, en cultivos hortícolas cosechados en fresco es relativamente corta, ya que interesa aprovechar su vegetación verde (Plaza Jiménez, 2017).

Fase final

Esta fase abarca desde el inicio de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de K_c y ET_c finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas. El valor de K_c al finalizar la etapa final ($K_{c,fin}$) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de $K_{c,fin}$ será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de $K_{c,fin}$ será bajo. Conociendo el coeficiente de cultivo en un determinado instante desde la curva correspondiente es posible calcular la evapotranspiración de cultivo en condiciones estándar, empleando la ecuación 3.1 lo que exige la determinación previa de la evapotranspiración de referencia a partir de los parámetros climáticos correspondientes (Plaza Jiménez, 2017).

Un aspecto de gran importancia en la curva descrita por el K_c es la contribución desde el suelo desnudo, especialmente cuando la proporción del suelo es alta, lo que ocurre en las primeras fases de desarrollo de la mayor parte de cultivos. Cuando la superficie está mojada, tras un evento de riego o lluvia, la evapotranspiración es elevada, dado que la resistencia al flujo de vapor de agua desde el suelo prácticamente disminuye a cero en la primera fase de secado, y el único factor limitante es la energía que llega al suelo. La primera fase ocurre en intervalos temporales que van de horas a varios días dependiendo de las condiciones ambientales de radiación, temperatura y cantidad de agua en las capas superiores (Plaza Jiménez, 2017).

2.2.9. Coeficiente basal de cultivo (K_{cb})

De acuerdo con el enfoque del coeficiente dual del cultivo, se determinan por separado los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación en el suelo, esto conlleva al uso de dos coeficientes, por un lado el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) para describir el proceso de la transpiración y por otro lado, el coeficiente de evaporación (K_e) que describe la evaporación que tiene lugar en la superficie del suelo. En este caso el coeficiente único es reemplazado por:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (5)$$

Donde:

K_{cb} : coeficiente basal del cultivo

K_e : coeficiente de la evaporación de agua en el suelo

El coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , se define como el cociente entre ET_c y ET_o cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero cuando el contenido de agua en la zona de raíces es el adecuado para que la transpiración se produzca sin ninguna limitación, de tal forma que el crecimiento del cultivo sea máximo. El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. El coeficiente de evaporación en el suelo, K_e , describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. Si el suelo se encuentra húmedo después de una lluvia o riego, el valor de K_e puede ser alto, conforme la capa superior de la superficie se deseca, el valor de K_e disminuye, y tiende a cero. La estimación de K_e requiere un balance de agua diario que estime el contenido de agua en la capa superficial (Allen *et al.*, 1998).

Cuando la superficie del suelo se seca, la evapotranspiración es la debida a la transpiración únicamente, descrita por el coeficiente de cultivo basal, K_{cb} . El efecto promedio del suelo y la transpiración se suele reflejar en un coeficiente promedio, reflejado en la Figura 2 como K_{cm} , que es el que a efectos prácticos se utiliza, y que es superior al coeficiente de cultivo basal. El efecto de la evaporación desde el suelo se muestra en la Figura 2 en los picos del K_c que aparecen tras cada riego; el efecto es menos acusado cuando la cobertura vegetal es alta, y por tanto el papel del suelo disminuye. Cuando el cultivo está fuera de las condiciones óptimas su valor no alcanza el valor correspondiente a las condiciones óptimas, lo que se refleja a través del coeficiente de estrés hídrico K_s , que es menor que uno y multiplica el valor del coeficiente de cultivo basal (Calera, 2005).

En la curva de evolución del coeficiente de cultivo, el máximo valor viene definido cuando el cultivo alcanza la cobertura efectiva completa. El concepto de cobertura

efectiva completa se define como la fase del crecimiento del cultivo en la que la evapotranspiración en condiciones estándar ET_c es máxima en relación a la evapotranspiración de referencia, ET_o , y por tanto el coeficiente de cultivo alcanza el máximo valor (Plaza Jiménez, 2017).

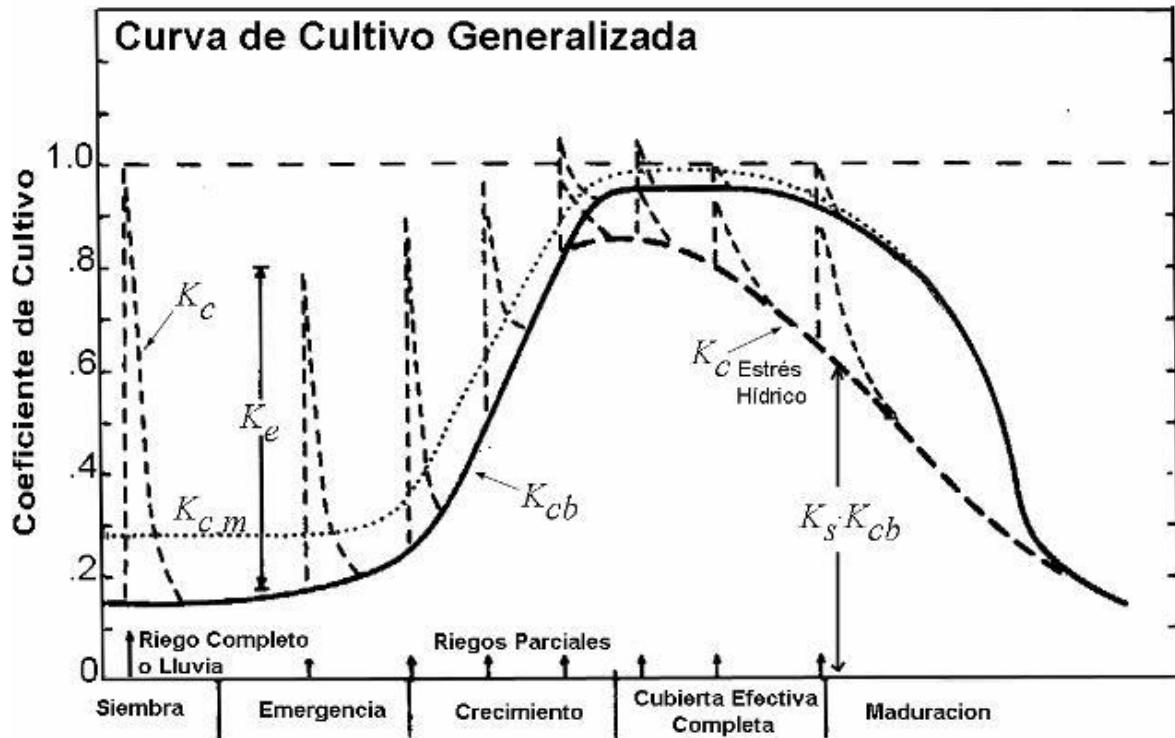


Figura 2. Curva generalizada de Coeficiente de cultivo. Tomado de Calera, 2005.

2.2.10. Percepción remota aplicada al manejo del agua en cultivos

Los sensores a bordo de los satélites de observación terrestre proporcionan información de la superficie que nos permiten evaluar variables y ciclos. Las series de tiempo de imágenes de satélite, posibilita la descripción de la evolución del coeficiente de cultivo a lo largo del ciclo de crecimiento. En los últimos años se han mejorado las resoluciones espaciales que permiten mayor detalle en las imágenes de satélite y un mejoramiento a nivel espectral, permitiendo cálculos a una escala muy alta, en este sentido se han implementado metodologías estimando las necesidades de agua distribuidas espacialmente calculando la demanda a nivel pixel.

2.2.11. Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI)

Los índices de vegetación son definidos como las combinaciones de bandas espectrales de las imágenes de satélite, debido a la respuesta espectral de cada objeto en la superficie terrestre se pueden identificar objetos, texturas y colores. En este sentido, la sensibilidad de la vegetación a la respuesta de la luz solar se puede identificar y generar cálculos de fotosíntesis y cubierta vegetal, y los factores como el suelo se atenúan. El principio físico de la respuesta espectral de la vegetación en los sensores es la reflectividad de la vegetación debido a que en el espectro rojo (Red) se obtiene baja reflectividad y una alta absorción, mientras que en el espectro infrarrojo cercano (NIR) se obtiene una alta reflectividad, el índice más comúnmente usado es el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas), este índice ha sido aplicado ampliamente en diversos estudios de vegetación propuesto por Rouse *et al.* (1973)

El NDVI es un índice utilizado para el monitoreo de la dinámica de la vegetación y detección de patrones fenológicos; este índice es robusto, ya que minimiza el efecto del ruido ocasionado por el suelo, la atmósfera, el ángulo y posición tanto del sensor como del sol (Rouse *et al.*, 1973). Se calcula mediante la siguiente expresión matemática:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}}}$$

Donde, ρ_{NIR} = reflectancia en la banda infrarrojo cercano y ρ_{Red} = reflectancia en la banda Rojo

El NDVI es uno de los índices de vegetación con más desarrollo en diversos trabajos, permite la descripción de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal y de fácil interpretación. Presenta ventajas para evaluar parámetros biofísicos de cultivos y sus valores oscilan entre -1 y 1, lo que facilita aún más la interpretación.

2.2.12. Relación NDVI-K_c

Existe una buena relación lineal entre el coeficiente de cultivo basal de cualquier cubierta (Neale *et al.*, 1987), el coeficiente de transpiración y los índices de vegetación como el NDVI, se han analizado tanto en cultivos como en vegetación natural (Campos *et al.*, 2010). El NDVI es una medida simple y directa por la normalización de las reflectividades del espectro rojo e infrarrojo que permite medir el tamaño fotosintético de la cubierta además se obtienen valores de la absorción de la radiación solar de la cubierta vegetal.

EL NDVI tiene un comportamiento anual que se ajusta bien al comportamiento del K_c, este aspecto ha sido descrito en diversas investigaciones obteniendo valores de coeficientes similares (Pineda-Morín, 2013).

$$K_c = 1.25 \text{ NDVI} + 0.1 \quad (6)$$

Esta ecuación ha sido validada para diversos cultivos, desde leñosos, herbáceos y hortícolas, sin embargo esta relación ha sido aplicada directamente a los cultivos herbáceos como el trigo, cebada, maíz, algodón, girasol, etc. En este sentido, mediante esta relación se puede estimar la Evapotranspiración con base a valores obtenidos mediante imágenes de satélite.

Se debe tener en cuenta que la aplicación de esta ecuación (6) puede sobreestimar los valores de K_c en las etapas iniciales de desarrollo, debido al comportamiento evaporativo la cubierta desnuda aumenta su valor, en esta etapa se requieren riegos frecuentes y garantizar las siguientes el desarrollo en las siguientes etapas (Plaza Jiménez, 2017).

2.3. Materiales y métodos

2.3.1. Área de estudio

La zona de riego estudiada denominada “Los Peroles” ubicada en el ejido de San Francisco de Asís, municipio de Rioverde, San Luis Potosí, México, Latitud $22^{\circ} 3'8.52''N$ y Longitud $99^{\circ}51'53.03''O$ y una altitud promedio de 1015 m sobre el nivel del mar (Figura 3). El riego en esta porción se distribuye desde el norte, en la regiones denominadas como Chacuaco, Joya y Las Sabanas, hasta el sur en la sierra La Boquilla; en el lado este la sierra el Cordón y al oeste San Marco, Paso Hondo y el Resumidero. La precipitación promedio anual es de 346 mm, pocas lluvias en febrero y el máximo se alcanza en noviembre, de 7 a 9 meses secos. En temperatura se tiene un promedio mensual de $35^{\circ}C$ en mayo y $7^{\circ}C$ en diciembre y enero. El tipo de clima corresponde al tipo BShwg, seco estepario.

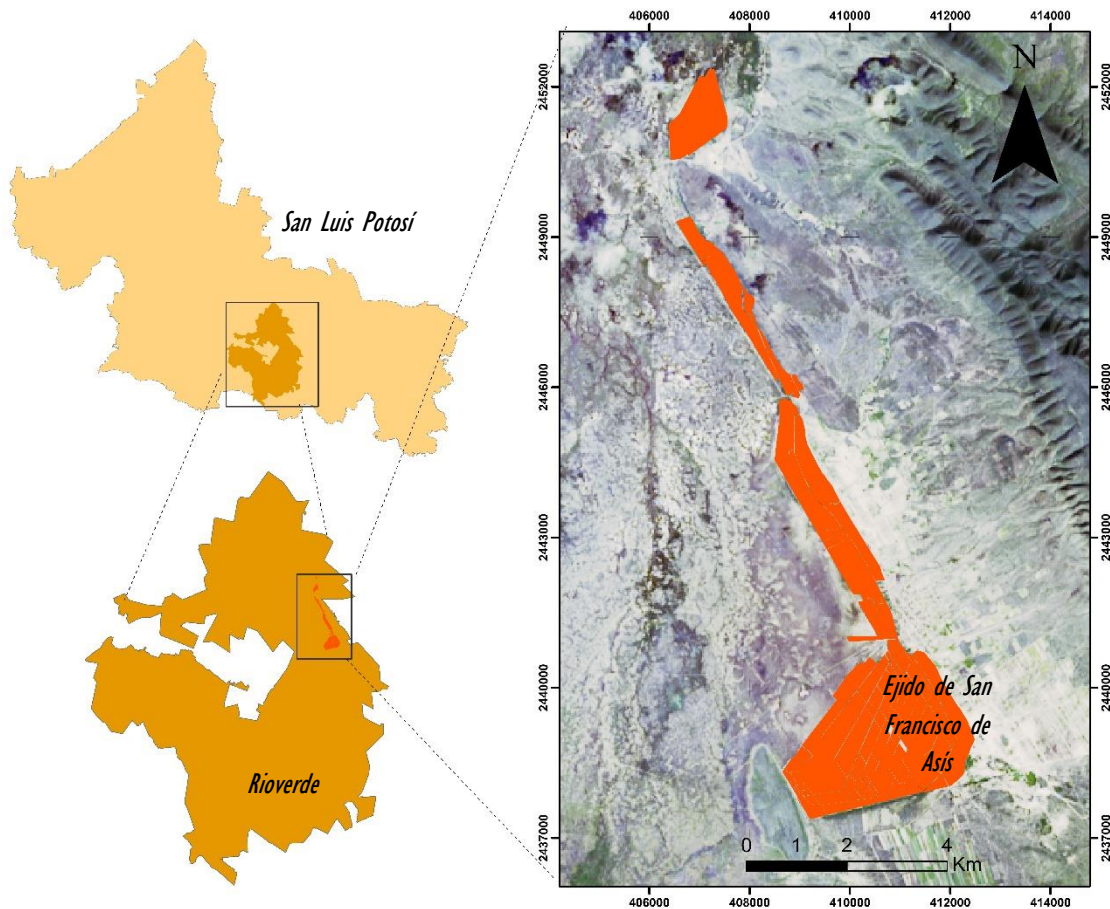


Figura 3. Localización del área de estudio. Elaboración propia.

El área de estudio se caracteriza por la presencia de un manantial de forma circular, con profundidades de hasta 50 m que es la principal fuente de abastecimiento en un canal, con un gasto entre 500 y 800 L s⁻¹, de calidad regular con conductividad eléctrica de 2.1 dS m⁻¹, estas aguas se utiliza para la zona de riego de aproximadamente 800 Ha. Sin embargo, esta fuente de abastecimiento pierde grandes volúmenes de agua por la infiltración del canal y las pérdidas durante su recorrido. La porción sur que comprende el 70% del área regable (460 ha) se le aporta un gasto de 187.73 l s⁻¹(Hernández-Tinajero, 2017), además que la conducción a las parcelas se hace por medio de canales secundarios excavados, disminuyendo el gasto ya reducido aportado. En este sentido entre los agricultores existe un descontrol con respecto a la distribución del agua, aunque existe una Comisión que se encarga de calendarizar la distribución, no se logra abastecer a todas las parcelas, disminuyendo la productividad, aumentando la acumulación de sales en los suelos y agotando los recursos hídricos.

El tipo de vegetación presente en la región de estudio es de tipo halófila, presenta los estratos siguientes: i) arbóreo (6 m), comprende *Prosopis laevigata* (Mezquite) y *Juniperus monosperma* (Táscate, cedro); ii) arbustivo (1.0 a 1.5 m), conformado con *Maytenus phyllanthoides* (Granadillo, mangle dulce), *Prosopis laevigata*, *Celtis pallida* (granjeno), *Koeberlinia spinosa* Zucc. (abrojo, corona de Cristo, junco), *Lycium carolineanum* Walter (Saladilla), *Opuntia imbricata* (Cardón, cardenche), *Opuntia leptocaulis* (Tasajillo), *Atriplex acanthocarpa* (Saladillo); iii) herbáceo (0.30 a 0.60), incluye *Sporobolus airoides* (Zacatón alcalino), *Suaeda* sp. (Jauja), *Spartina spartinae* (Trin.) Hitchc. (Zacate picoso), *Atriplex* sp. (Saladillo), *Borrchia frutescens* (L.) DC., *Opuntia* sp. (Nopal) (Rzedowski, 1965).

Existen especies como *Spartina spartinae* (Trin.) Hitchc. (Zacate picoso), *Borrchia frutescens* (L.) DC., *Maytenus phyllanthoides* (Granadillo, mangle dulce), y *Lycium carolineanum* Walter (Saladilla) son elementos característicos de la vegetación halófila costera, por lo que quizás representan reliquias de la flora de las orillas del antiguo lago (Rzedowski, 1965).

En las corrientes de agua o en lugares con agua estancada, se presenta el tular. Este tipo de vegetación comprende las especies siguientes: *Typha sp.* (Tule), *Scirpus sp.* (Tule), *Juncus sp.* (Junco), *Nymphaea mexicana* (Ninfa). En el cuerpo de agua se consideran dos comunidades vegetales de gran importancia Pradera y Mezquital, el primero se caracteriza por estrato arbóreo, *Taxodium mucronatum* Ten. (Sabino); sotobosque, *Prosopis laevigata* H. & B. Johnst, *Opuntia engelmannii* var. *cuija* Griffiths & Hare (Sin. *Opuntia cuija* Griffiths & Hare), *Spartina spartinae* Trin. (Zacate picoso), *Flaveria brownii* (Sin. F. *oppositifolia* (DC) Rydb), *Verbesina potosina* B. L. Rob., *Eragrostis intermedia* A. S. Hitchc., *Suaeda torreyana* Watson, *Hediotys wrightii* (S. Gray) Fosberg (Sin. *Hediotys cervantesii* Kunth) (Cisneros *et al.*, 2014). Las especies dominantes son el sabino y el zacate picoso; los árboles de sabino tienen una edad que varía de 140 a 1150 años, por lo que son de gran importancia científica, pues a través de su estudio es posible identificar los cambios del clima y del ambiente regional. En la época seca, al inicio de la primavera, la pradera se quema con el propósito de que el ganado aproveche el rebrote del zacate y la hierba; esta práctica causa daños severos, a veces la muerte, a los centenarios árboles de sabino; asimismo, algunos pastores y turistas perturban severamente la vegetación de diversas formas. ii) Mezquital, se distribuye en los desniveles del terreno adyacente a la pradera; conformado de la manera siguiente: estrato arbóreo, *7 Prosopis laevigata*; sotobosque, *Saluzania triloba* Ort., *Suaeda torreyana*, *Opuntia imbricata* (Haw.) DC., *Eragrostis intermedia*, *Euphorbia indivisa* Engelm., *Androsace cinerascens* B. I. Robinson (Cisneros *et al.*, 2014).

La superficie del área de estudio la constituyen suelos calci-yesíferos de textura migajón limosa, pertenecen a Solonchaks ócricos con una profundidad mayor a 100 cm los perfiles son los siguientes: i) Horizonte A Ócrico: sin cementación; reacción al HCl, desde nula a fuerte; textura, media; estructura, bloques subángulares de tamaño fino y desarrollo moderado. ii) Horizonte B Cámbico: acumulación de yeso; reacción al HCl, débil a fuerte; textura, media; estructura, bloques subángulares de tamaño fino y medio y desarrollo débil y moderado; drenaje interno, drenado y muy drenado; fases petrogypsica y sódica (Cisneros *et al.*, 2014).⁸ Los análisis de laboratorio presentan la información siguiente: i) Horizontes A: texturas migajón

arenoso, migajón limoso y migajón arcilloso; colores en seco 10YR5/1, 10YR6/1; colores en húmedo 10YR3/1, 10YR4/1, 10YR4/2; materia orgánica (%), 2.5 a 5.7; Conductividad eléctrica (mmhos/cm) a 25 °C, 7.0 a 21.5; pH, 7.7 a 8.2; % de sodio intercambiable (PSI), < 15.0; CICT (meq/100 g), 9.0 a 43.0; % saturación de bases, 100; Na (meq/100 g), 0.5 a 2.8; K (meq/100 g), 1.0 a 4.4; Ca (meq/100 g, 64.3 a 76.7; Mg (meq/100 g), 7.3 a 24.4; P (ppm), 0.8 a 9.8. ii) Horizontes B: texturas migajón arenoso y migajón arcilloso; colores en seco 10YR6/2 y 10YR8/2; colores en húmedo 10YR5/2 y 10YR7/4; materia orgánica (%), 0.3 a 1.5; Conductividad eléctrica (mmhos/cm) a 25 °C, 15.1 a 17.0; pH, 7.8 a 8.0; % de sodio intercambiable (PSI), > 15.0; CICT (meq/100 g), 14.3 a 23.3; % saturación de bases, 100; Na (meq/100 g), 3.5 a 6.4; K (meq/100 g), 1.8 a 2.4; Ca (meq/100 g, 34.7 a 89.1; Mg (meq/100 g), 4.4 a 4.5; P (ppm), 1.1. iii) Horizontes C: texturas migajón arenoso y migajón limoso; colores en seco 10YR8/1 y 10YR8/2; colores en húmedo 10YR6/2 y 10YR7/3; materia orgánica (%), 0.3 a 1.3; Conductividad eléctrica (mmhos/cm) a 25 °C, 15.0 a 25.4; pH, 8.3 a 8.4; % de sodio intercambiable (PSI), < 40.0; CICT (meq/100 g), 3.5 a 7.0; % saturación de bases, 100; Na (meq/100 g), 1.3 a 2.4; K (meq/100 g), 0.2 a 0.7; Ca (meq/100 g, 75.3 a 87.7; Mg (meq/100 g), 8.9 a 14.4; P (ppm), 3.2 a 5.2 (Cisneros *et al.*, 2014).

La fuente de abastecimiento de agua de la región denominada “Los Peroles” presenta un consumo exagerado de volúmenes, con una mala distribución, poniendo en riesgo la sustentabilidad de los recursos, además de la gran aportación de sales a los suelos por el tipo de agua presente. La baja productividad de los cultivos se debe principalmente a no tener un control de la gestión de agua entre los agricultores y las características desfavorables del agua y suelo, sin embargo, existe también un desconocimiento y desinterés por conocer las características que se cuenta en región y aplicar diferentes técnicas de agricultura.

En este trabajo se presenta una metodología basada en datos de percepción remota que ayude a distribuir de manera uniforme el agua, aportando el volumen necesario para cada parcela, en específico en el cultivo de maíz, se identificaron aproximadamente 100 parcelas con maíz para el año 2015, esta metodología ha

sido ampleamente usada para ayudar a la distribución uniforme de los recursos hídricos, ayudando a la conservación de los mismos y al aumento de la productividad y optimización de gastos en energía para los agricultores.

2.3.2. Imágenes de satélite empleadas

Para este estudio se utilizaron datos del Satelite Landsat 8, sensor OLI con características, este conjunto de datos de libre descarga se obtienen directamente de la Arquitectura de Procesamiento Científico (ESPA, por sus siglas en inglés) del Centro Científico y de Observación de Recursos Terrestre (EROS, por sus siglas en inglés) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) disponible en <https://espa.cr.usgs.gov/>. Los datos de Landsat 8 se conforman en 11 bandas espectrales, abarcando el rojo, azul, verde, infrarrojo cercano, infrarrojo medio 1, infrarrojo medio 2, pancromática, TIR 1, TIR2, y cirrus. Cuenta con una resolución espacial de 30 m, la temporalidad de los datos es de 16 días.

Los datos espectrales empleados abarcaron 7 imágenes Landsat 8 del año 2015, abarcando el área de estudio, proyectadas a un sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator de la zona 14 N.

Las imágenes del satélite Landsat 8 se han empleado para diversos estudios de cobertura vegetal, actualmente se ha aplicado en estudios de riego, aplicando el modelos FAO 56 por medio de percepción remota (Senay *et al.*, 2015; Guermazi *et al.*, 2016). Se han empleado en estudios de requerimientos de riego por ejemplo Plaza Jiménez (2017), utilizó series temporales de Landsat 8 para realizar recomendaciones de riego con una semana de antelación calculando el K_c para cultivos herbáceos, dentro del sistema SPIDERWebGis (Calera *et al.*, 2016), herramienta web utilizada para consulta de datos espectrales históricos en la provincia de Albacete para el seguimiento de las parcelas de riego y de secano.

En este trabajo se calculó el NDVI de cada imagen utilizando las bandas rojo e infrarrojo cercano, y se generó una curva patrón para el cultivo de maíz, con 100 parcelas identificadas de forma manual con el mismo patrón de comportamiento de NDVI, y obteniendo un NDVI promedio para cada imagen (Cuadro 10), para así obtener comportamiento anual de este cultivo y poder hacer el cálculo de los volúmenes de agua aportados a la región y poder obtener un eficiencia de riego utilizando datos de percepción remota. Esta curva se genera a partir de interpolaciones entre cada fecha de imagen (Figura 4) y así obtener una curva

patrón anual. La curva patrón se pronuncia en las fechas después de la siembra, aproximadamente en abril y mayo, en donde se requieren grandes cantidades de agua, y su nivel máximo entre mayo y junio con un NDVI máximo entre los 0.55 y 0.6, un valor bajo con respecto a curvas de patrón presentadas en diversos estudios que como NDVI máximo en maíz alcanzan hasta un 0.9 (Plaza Jiménez, 2017). En este trabajo la curva presentada con un NDVI máximo de 0.55 debe a la baja productividad de los suelos y el deficiente regadío en la región. Sin embargo, es un buen indicador del comportamiento vegetativo del cultivo.

Cuadro 10. Fechas de imágenes Landsat y su NDVI promedio a nivel parcelario.

FECHA DE IMAGEN LANDSAT 8 OLI	NDVI PROMEDIO
26/02/2015	0.28
30/03/2015	0.34
01/05/2015	0.39
17/05/2015	0.52
20/07/2015	0.54
08/10/2015	0.39
11/12/2015	0.35

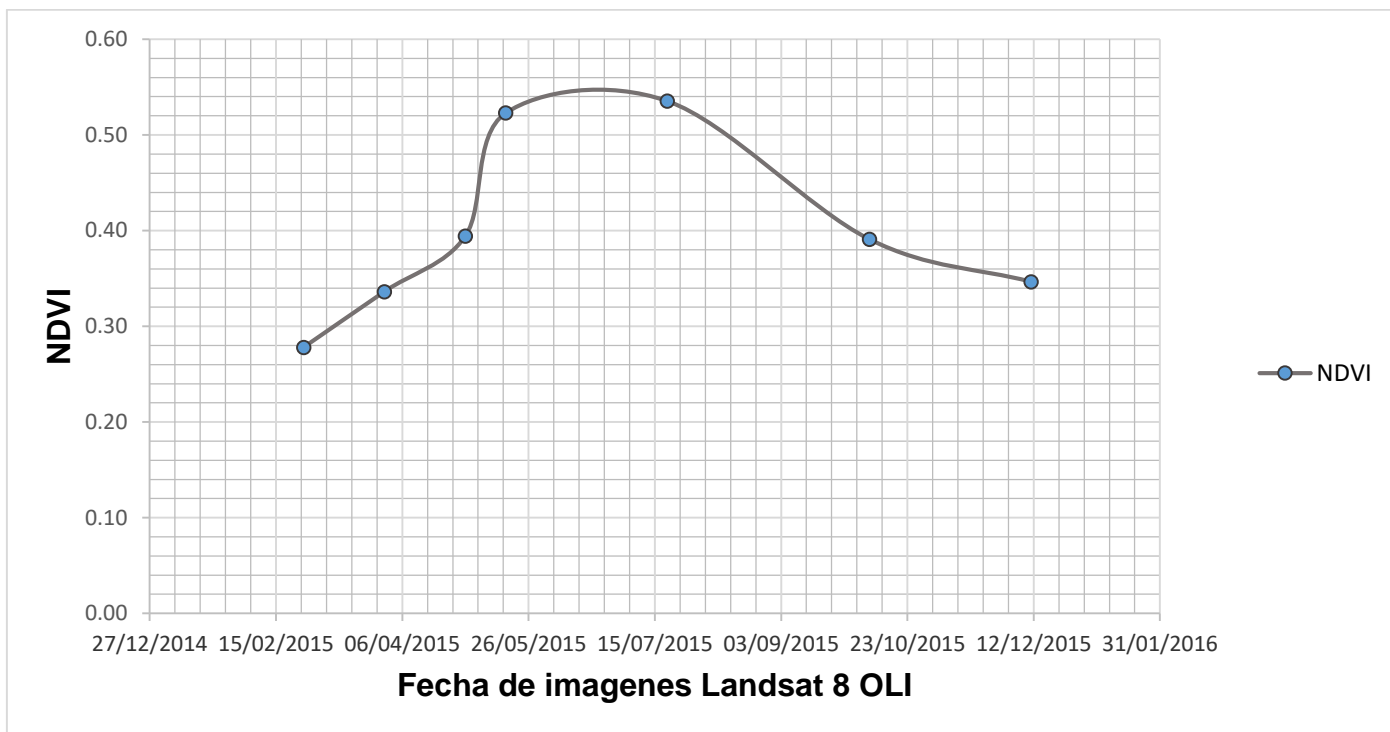


Figura 4. Curva patrón de NDVI para maíz del año 2015. Elaboración propia.

2.3.3. Balance de agua en el suelo por medio de datos de percepción remota

La evapotranspiración es un proceso de la cubierta, en determinado tiempo, en un efecto paralelo entre la evaporación del suelo y la transpiración. Las necesidades de agua de la cubierta son las que se reponen con el agua intercambiada con la atmósfera. El suelo debe mantenerse con la superficie húmeda para las raíces de los cultivos, debido a la pérdida por medio de la transpiración, cuando el contenido de humedad disminuye y pasa por debajo de cierto umbral, el cultivo entra en un estado de estrés hídrico y la transpiración se reduce.

El balance hídrico en el suelo permite estimar el agotamiento de agua disponible en el suelo que es para las raíces. Este agotamiento se calcula por la diferencia entre la diferencia de agua total disponible y contenido de agua actual.

Se realizó el cálculo de balance hídrico de la región con la metodología de coeficiente de cultivo único dual (Wright, 1982) (Ecuación 6), a partir de datos de

NDVI y datos de ET_0 (Figura 5) tomados de la estación Agroclimática manejada por INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), llamada el Naranjal, Ubicada en el municipio de Ciudad Fernández conurbado con el municipio de Rioverde, aproximadamente a 22 km de la zona de estudio (Latitud: 21.95805556 Longitud: -100.0411111)

$$K_c = 1.25 \text{ NDVI} + 0.1 \quad (6)$$

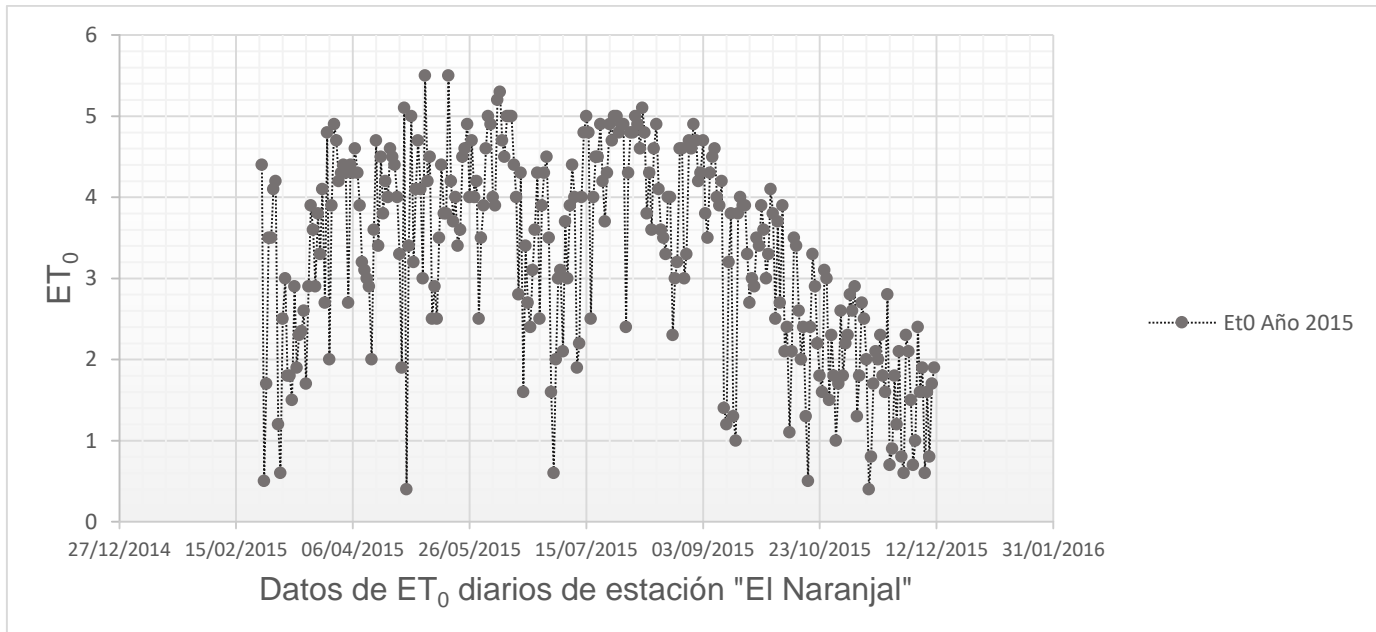


Figura 5. Comportamiento de ET_0 en el año 2015. Elaboración propia.

Se introdujeron los datos al modelo, devolviendo los valores correspondientes a distintos procesos que intervienen en el balance de agua a lo largo del desarrollo de cultivo, derivando así un consumo anual de agua a nivel regional, y a nivel parcelario. La ecuación 7 muestra el cálculo de ET_c que se traduce como las necesidades netas de riego, o el consumo de agua total.

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (7)$$

El modelo de balance de agua en suelo, calculado a partir de datos de NDVI y usando las ecuaciones del modelo FAO 56, a lo largo del ciclo del cultivo maíz, elegido para la zona, se presenta una serie de eventos de excedencias de agua en el cultivo, principalmente por las aportaciones de volumen innecesarias, o eventos de lluvias reportados, sin embargo, el ejido de San Francisco de Asís presenta lluvias escasas, por otro lado el modelo devuelve puntos de estrés hídrico en el cultivo, esto puede ser ocasionado a las diferencias en la distribución del agua de riego. En la figura 6 se presenta el agotamiento permisible y el agua fácilmente aprovechable por las plantas de la zona radicular del suelo, es decir, el contenido de agua en el suelo disponible para las raíces del cultivo maíz, reportadas con una profundidad de 1.6 m (Manual FAO 56). La curva de agotamiento se presenta para cada día, a partir de la obtención de la primera imagen de satélite, hasta la última fecha de imagen de satélite. Las tendencias se observan de forma ascendente conforme va en desarrollo de cultivo, y se va agotando la humedad cuando el cultivo va en media temporada, debido a que necesita más riego, ya sea asistido o por precipitación, sin embargo, este valor disminuye, hasta que alcanza el valor de agua fácilmente disponible, en ese momento es donde se requiere el riego y compensar el agotamiento producido, sin embargo el comportamiento de esta curva es diferente debido a que se presentan valores en estado de estrés hídrico, es decir, se puede observar las deficiencias de riego que se tienen en la región entre las fechas de primavera en donde el cultivo necesita de riego constante, es decir, en estas fechas hubo disminución de riego y baja precipitación que no aportaron humedad al suelo en donde se entro en un estrés hídrico el cual se puede ver reflejado en el bajo rendimiento del cultivo.

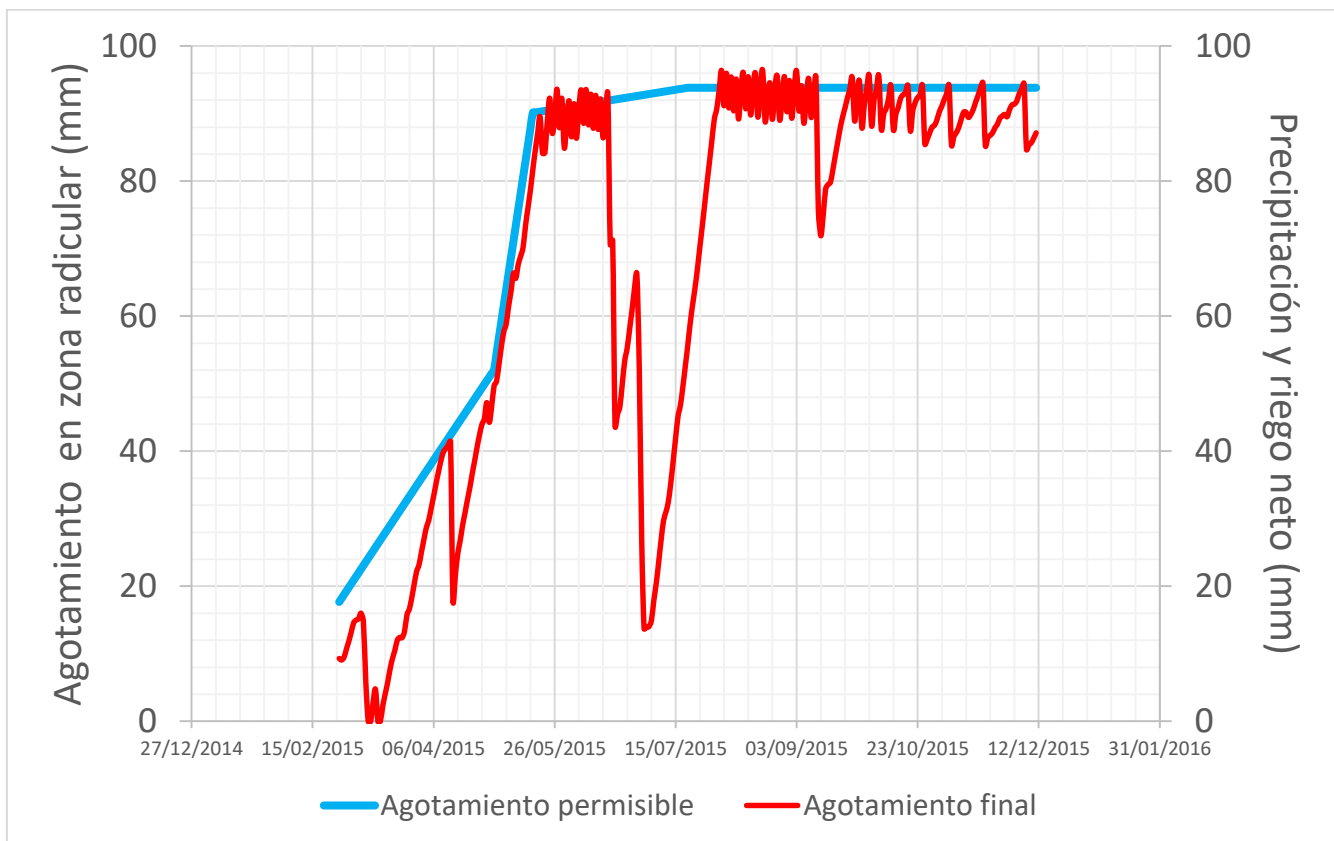


Figura 6. Curva de agotamiento en zona radicular con precipitación (Línea roja) y riego neto (Línea azul). Elaboración propia.

2.3.4. Cálculo de la eficiencia de riego utilizando datos de percepción remota

El cálculo de la eficiencia de riego, se realiza por medio de métodos *in situ*, lo que permite generar cálculos exactos y fiables, sin embargo, sólo se puede abarcar puntos específicos para dichas mediciones, y las áreas extensas no se pueden evaluar por ejemplo Hernández-Tinajero (2017) evaluó la eficiencia de riego en el ejido de San Francisco de Asís, obteniendo un eficiencia de aplicación de riego por debajo del 50%, realizó pruebas de campo, para parcelas con maíz y alfalfa, y utilizó el software CROPWAT y EVAGRAV para la misma evaluación. En este sentido la metodología presentada permite estimar la eficiencia del riego para una región de producción agrícola, utilizando datos de percepción remota. Este método porta el dato de la evapotranspiración total anual a nivel regional (Figura 7), con un total de 312 mm por año solo para el cultivo de maíz, y contando con datos de volumen aportado de la principal fuente de agua, obtenido de los datos de la concesión de

los derechos de agua de la fuente de abastecimiento por parte de la Comisión Estatal de Agua con un volumen aportado de 1,576,800 m³ anuales y datos de la estación meteorológica ubicada en el lugar de estudio, se obtiene la precipitación efectiva de la región con un total de 130.6 mm por año (Hernández-Tinajero).

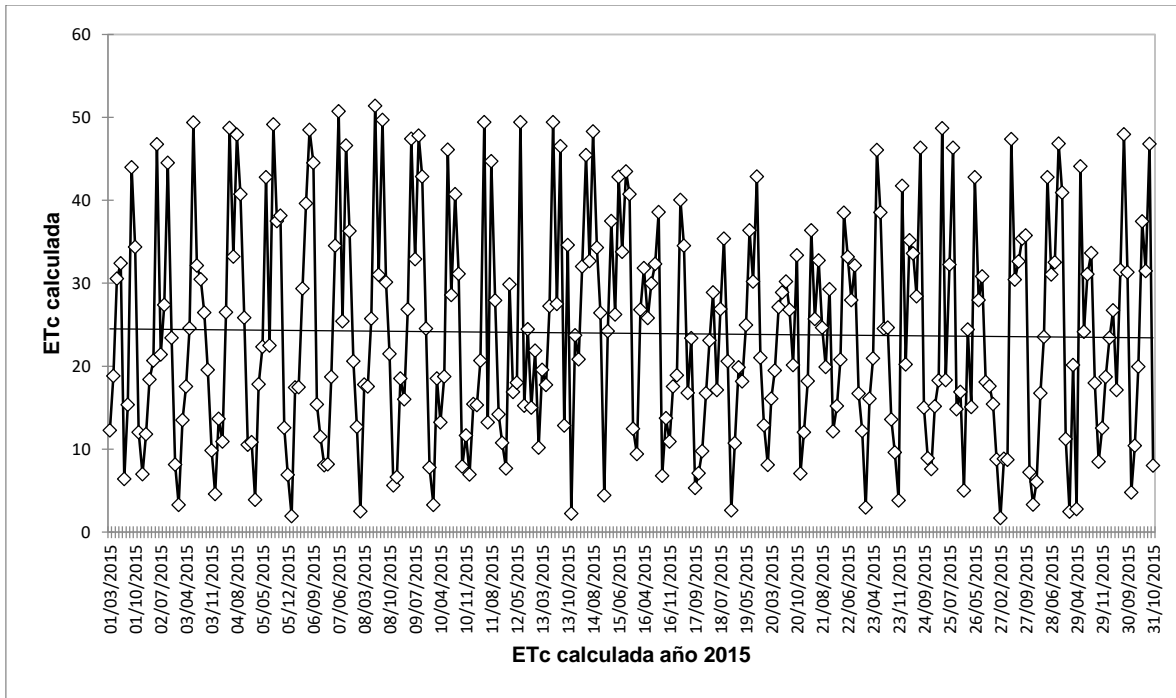


Figura 7. Cálculo de ET_c anual a nivel regional.

Con este conjunto de datos se puede calcular la eficiencia de riego por medio de la fórmula utilizada por Castañeda-Ibáñez (2013), la cual se expresa de la siguiente forma:

$$(7) \text{ Eficiencia de riego (\%)} = \frac{ET_c \text{ (mm)}}{\text{Vol. aportado (mm)} + Pe \text{ (mm)}}$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración de cultivo anual mm

Vol. aportado = Volumen concesionado de agua mm

P_e = Precipitación efectiva anual mm

En este trabajo se utilizó la ecuación (7) para el cálculo de la eficiencia del uso del agua en una región de producción agrícola mediante el uso de sensores remotos.

En la figura 8 se presenta la metodología para el cálculo de la eficiencia de riego utilizando técnicas de percepción remota.

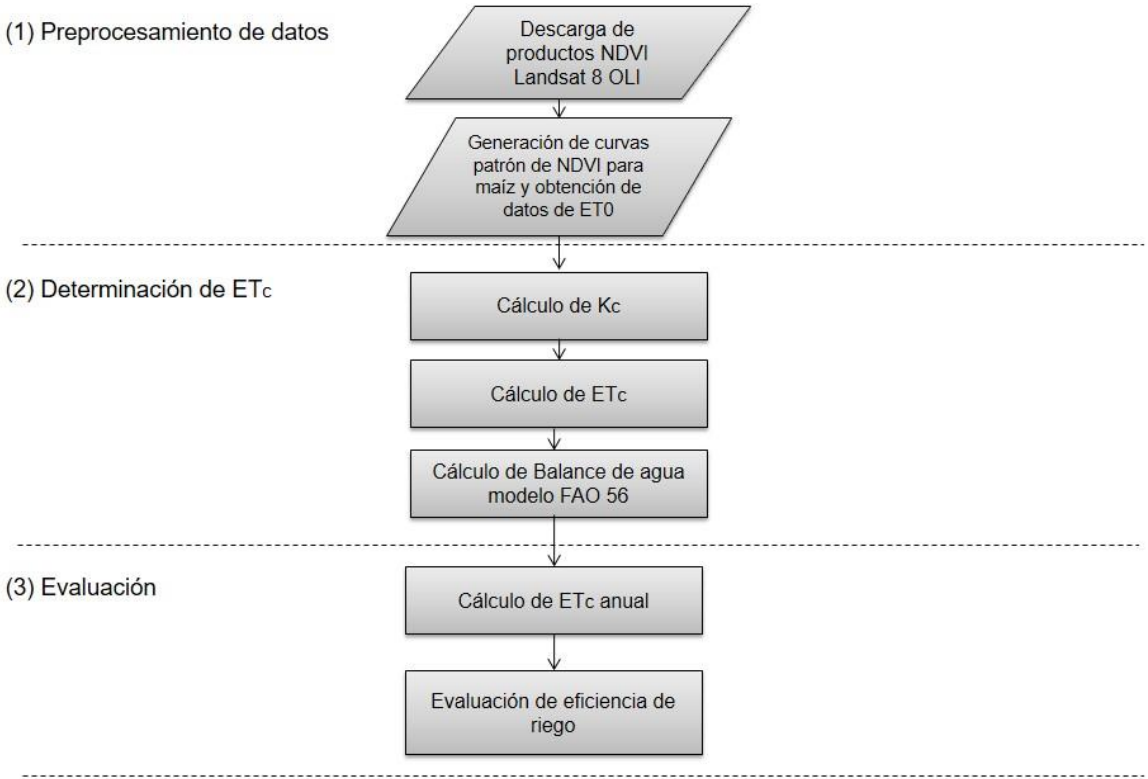


Figura 8. Metodología para el cálculo de la eficiencia de riego utilizando datos satelitales.

2.4. Resultados y discusión

Se obtuvo una eficiencia de riego del 47.5%, comparada con la de Hernández-Tinajero (2017), evaluada por medio de técnicas y mediciones en campo. Este dato obtenido del balance de agua en el suelo FAO 56 con datos de percepción remota, ofrece una forma de hacer cálculo de necesidades netas de riego a nivel regional, además que puede ser utilizado en distintos cultivos como leñosos o de hortalizas, aunque la forma de K_c es diferente para estos, ajustados a la cobertura de suelo que tienen y su transpiración. Existen diversas técnicas para la medición de la eficiencia de riego, sin embargo, se pueden hacer sólo en sitios específicos, es decir, cada sitio tiene condiciones diferentes para cada cultivo. La eficiencia de riego evaluada permite demostrar la mala distribución de los recursos hídricos en la región, evaluando un solo cultivo, en el caso del maíz, existen diversas investigaciones que evalúan el consumo de agua para diferentes cultivos por ejemplo trigo (Castañeda-Ibañez, 2015), y las necesidades de riego en ajo, cebolla, adormidera (Plaza Jiménez, 2017), debido a los grandes aportes de volúmenes de agua en los distritos de riego y la necesidad de la eficiencia en la aplicación del riego. Para la validación de la metodología de la evaluación del riego por medio de percepción remota es necesario hacer un seguimiento a nivel parcelario de los aportes de volúmenes de agua, además las mediciones meteorológicas de la región, a pesar de que existe una estación meteorológica en el ejido, esta, no mide los datos necesarios para la obtención de una medición de ET_0 , por eso fue necesario utilizar los datos de la estación agroclimática “El Naranjal” perteneciente al INIFAP con un monitoreo diario, y datos históricos que permitieron hacer el cálculo de la ET_c anual, sin embargo, si se necesitara evaluar la eficiencia con un error mínimo sería necesario la instalación de una torre de flujo turbulento en la región de riego, como se aplicó en la investigación de Castañeda-Ibañez (2015), en el distrito de riego estudiado, lo cual le permitió obtener datos climáticos precisos para el cálculo de la ET_0 y así poder evaluar los métodos de balance de energía utilizando datos satelitales.

La buena relación entre el K_c y el NDVI permite modelar de manera eficiente la ET_c , por medio del balance de agua, esta misma relación permite conocer el estado vegetativo y permite hacer una aproximación más precisa de los coeficientes, sin embargo, para ajustar los valores se requiere de una serie temporal de imágenes más amplia, debido a que la adquisición de imágenes se dificulta por el estado de las mismas, es decir, las escenas pueden llegar a tener problemas de cobertura de nubes. Por otro lado, se pueden validar los datos espectrales a través de una radiometría de campo, que posibilitaría hacer validaciones del NDVI de la región, así como la evaluación de las curvas patrón de NDVI para cada cultivo. La metodología presentada para estimar la ET_c regional por medio de percepción remota posibilita una herramienta potencial para la evaluación de la distribución de los recursos hídricos a nivel regional, por la gran extensión que abarca una escena del satélite Landsat 8. Sin embargo, la resolución espacial es de 30 m lo que puede provocar diferencias en las reflectividades que se pueden hacer notar al hacer cálculo del NDVI y se puede confundir la respuesta espectral de algún cultivo, ya sea herbáceo, leñoso o de hortaliza. Los valores obtenidos en este estudio dejan en claro las deficiencias de riego, es por eso la importancia de tomar medidas necesarias para las mejoras en la eficiencia, sin embargo, la falta de infraestructura hidráulica disminuye las posibilidades de aumentar la eficiencia en la aplicación del riego a nivel regional. La implementación de las técnicas de percepción remota en agricultura provee de valiosa información que posibilita la toma de decisiones en tiempo y forma y los valores obtenidos en el presente trabajo evidencian la practicidad de utilizar las imágenes satelitales como una herramienta de monitoreo en regiones agrícolas extensas.

2.5. Conclusión

Suministrar las demandas de agua para el cultivo es uno de los objetivos principales de la gestión del riego en extensiones agrícolas, principalmente para el manejo adecuado del cultivo y el cuidado del vital líquido. El ejido de San Francisco de Asís se enfrenta a problemas graves en la distribución del agua de riego, desde hace varias décadas, se han presentado deficiencias en la aplicación de riego y la precipitación escaza, han traído consigo problemas graves de productividad y el aumento del contenido de sales en los suelos. El sistema de riego deficiente se relaciona principalmente al desgaste del canal principal y las pérdidas de agua que tiene por infiltración, sin embargo, la canalización por medio de infraestructura hidráulica no traería una mejora significativa en la eficiencia de riego, si no se aplican las técnicas adecuadas de manejo para los diferentes cultivos y las aportaciones de volúmenes de agua exactos para cada parcela a lo largo de cada ciclo de cultivo.

En este sentido el presente trabajo aporta una técnica para la evaluación de la eficiencia de riego por medio de percepción remota, la secuencia de imágenes permite generar índices de vegetación como el NDVI que posibilita conocer la evolución del coeficiente de cultivo y su comportamiento espacio-temporal. La integración de este coeficiente en el modelo FAO 56 calculado a partir de imágenes satelitales permite estimar la evapotranspiración de forma precisa y en regiones extensas. Las imágenes de resolución espacial media como lo es Landsat 8 son de acceso libre lo cual permite generar series de tiempo para estudios a gran detalle para evaluar el estado vegetativo de las regiones. En las últimas décadas la aportación de diversas investigaciones en el ámbito agrícola ha aumentado, debido a que la resolución espacial mejora, y la precisión consigo. En este estudio, se obtuvo una eficiencia de riego del 47.5% utilizando datos satelitales. Mientras que el trabajo desarrollado por Hernández-Tinajero (2017) obtuvo una eficiencia cercana al 50% realizando mediciones en campo. Se puede concluir que el modelo FAO 56 calculado a partir de datos de percepción remota ofrece una forma fiable de calcular necesidades netas de riego a nivel regional, sin embargo, para que la exactitud de

este modelo aumente es necesario el monitoreo de las parcelas a nivel de campo, así como una disponibilidad de los agricultores a mejorar las técnicas de riego, además de la compra de equipo de medición de gastos y una torre de mediciones de flujo turbulento, la cual aportaría datos climáticos mas fiables.

Aunque existen métodos para evaluar la ET_c , la mayoría de estos métodos ofrecen estimaciones puntuales, es decir, no se puede saber el comportamiento de la ET a nivel regional, debido a que su variación espacial cambia en grandes extensiones. En este sentido, el presente trabajo presenta una herramienta valiosa dentro del proceso de toma de desiciones relacionadas a la gestión de agua de riego. A nivel regional se puede calcular el volumen de agua consumido por el cultivo maíz, aunque puede ser calculado para cualquier tipo de cultivo. Además, se puede conocer a nivel de píxel el volumen necesario en una parcela, lo que permitiría una gestión de agua de riego más eficiente en conjunto con una buena selección de método de conducción para lograr los objetivos planteados

En esta región es claro que se tiene un problema en la distribución de riego, y cada vez este problema se agudiza más, por la falta de organización, poniendo en riesgo la disponibilidad de los recursos naturales como el agua, suelo y vegetación. La tecnificación del riego es necesaria para mejor aprovechamiento de los recursos, además de que los agricultores de la zona deben de estar capacitados para la gestión de agua de riego y su concientización sobre el cuidado del agua.

Capítulo 3

Determinación de la eficiencia de riego mediante datos de alta resolución en el ejido de San Francisco de Asís, Rioverde, San Luis Potosí, México

Resumen

Para aumentar la eficiencia del riego en los cultivos, resulta indispensable una estimación precisa del volumen de agua requerido. En este capítulo se presenta la metodología para el cálculo de la ET que se traduce como las necesidades hídricas de los cultivos, utilizando imágenes de muy alta resolución espacial, obtenidas con un vuelo de VANT's equipado con una cámara RGB, en la región del cultivo (Maíz), alcanzando una altura de vuelo de 80 m y así obtener una resolución espacial de 2 cm. El modelo para el cálculo de ET se integró con datos de las imágenes obtenidas utilizando un índice de vegetación verde y rojo (GRVI) como parámetro para la evaluación del K_c y se obtuvo una regresión lineal simple que demostró la alta correlación entre el NDVI y el GRVI con un coeficiente de $R^2= 0.94$, posteriormente se obtuvieron los volúmenes de agua requeridos a nivel píxel, mostrando así una herramienta operativa para los agricultores que permita la planeación de la distribución de los recursos hídricos.

Palabras clave: VANT's, GRVI, volúmenes de agua, riego agrícola.

Abstract

In order to improve the efficiency of crop irrigation, an accurate estimation of water volume is indispensable. This chapter presents the methodology for estimating evapotranspiration i.e. crop water requirement, using very high spatial resolution remotely sensed data recorded by a camera mounted on a drone. The model for estimating evapotranspiration was employed by using the Green-Red vegetation index, instead of NDVI, for evaluating crop coefficient (K_c). A correlation analysis ($R^2=0.94$) validated the use of GRVI as a proxy of NDVI. Finally, water volume was estimated at pixel level, being an operational tool for farmers when planning crop irrigation.

Keywords: UAV's, GRVI, water volume, crop irrigation.

3.1. Introducción

La agricultura es una de las principales actividades económicas del mundo, la percepción remota, es una herramienta potencial que aporta desarrollo de una agricultura más sustentable y productiva, en este sentido, se busca la optimización de los recursos en los cultivos, así como evaluar el rendimiento de cultivo, y ayuda a la toma de decisiones para el uso eficiente de fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, además de la gestión de los recursos hídricos protegiendo el vital líquido y preservando los suelos, protegiendo a las plantas de riesgos. Los llamados VANT's (Vehículos Áerero No Tripulados) también son conocidos como drones, aunque el término dron se utiliza en cuestiones militares, son plataformas aéreas a las que se les adapta una cámara o sensor y son operadas remotamente o tienen vuelos programados, que permiten la obtención de fotografías y videos, y pueden ser procesados con técnicas geoespaciales a orto mosaicos geo referenciados de los cuales se puede obtener información. Actualmente los VANT's y los sensores, se han convertido en los instrumentos tecnológicos de los de los agricultores, al realizar la observación desde el aire con las cámaras convencionales adaptadas en los VANT's, solo se pueden obtener imágenes del espectro visible, sin embargo, el desarrollo de cámaras multispectrales, que captan las regiones de infrarrojo el infrarrojo térmico, han permitido el desarrollo de técnicas que para poder obtener datos para la caracterización y evaluación de los cultivos, facilitando la observación de los campos agrícolas, y permitiendo obtener información del estado hídrico de los cultivos, monitorear su fenología, así como detectar enfermedades y deficiencias nutricionales.

Los satélites proporcionan información a través de imágenes, de la cobertura terrestre, sin embargo, al procesar este tipo de imágenes se presentan algunos problemas, principalmente la disponibilidad, la complejidad de los algoritmos de procesamiento y la temporalidad de las imágenes, además de la escala de la información. En este sentido los VANT's pueden aportar gran cantidad de información para los controles agrícolas, ya que se pueden programar para realizar vuelos en cualquier momento del día y en cualquier fecha del ciclo fenológico de los

cultivos, proporcionando así un estado en tiempo real de la vegetación, por medio de índices generados a partir del procesamiento de los orto mosaicos, generando índices de vegetación e índices de humedad, detectando el estrés hídrico en la vegetación, estrés nutricional y realizando una detección temprana de las enfermedades y plagas, así como desarrollar cálculos exactos de los rendimientos de cultivos a nivel parcela.

Los VANT's solo servirán como plataforma para las cámaras o sensores con los que se obtienen datos de la cobertura vegetal, estos sensores captan la energía del sol reflejada en los objetos terrestres, esta información dependerá del tamaño, color o textura de los objetos, esto es el fundamento de los índices de vegetación, en los cuales la vegetación sana o vigorosa tendrá una respuesta espectral diferente a la vegetación enferma o con deficiencias nutricionales. Es entonces que se pueden hacer cálculos exactos del rendimiento de cultivo, y así maximizar la producción cuidando la sustentabilidad de los recursos y minimizando la derrama económica. Entre las diversas aplicaciones de los VANT's en la Agricultura se encuentran: monitoreo del vigor del cultivo, planificación agrícola, gestión óptima de recursos hídricos, prevención de riesgos fitosanitarios, mapas de fertilización adecuada, evaluación de estrés nutricional de cultivo, generación de inventarios agrícolas.

Las herramientas tecnológicas sirven de apoyo en la solución a los problemas ambientales actuales, aunque la tendencia de los VANT's está en aumento, se debe dejar en claro que solo es un insumo para poder adaptar diversos instrumentos, por ejemplo entre las diversas aplicaciones de los VANT's se encuentra el monitoreo de la calidad del aire, esto se hace montando algunos sensores e instrumentos que miden la calidad del aire y se realizan vuelos en zonas de alta contaminación atmosférica. En la minería se usan sensores LIDAR adaptados a los VANT's, que generan una nube de millones de puntos, que al procesarla se pueden obtener modelos digitales de terreno en 3D, que sirve para la generación de volúmenes y planeación. En el ámbito de la construcción se utilizan los VANT's para el monitoreo de obra, se planean vuelos semanales para evaluar el avance en la construcción y generación de volúmenes de plataformas de vivienda. En la industria se utilizan los

VANT's para el monitoreo de estructuras que se encuentran a gran altura. Actualmente a escala global se están encontrando un gran número de aplicaciones, sin embargo, hay que tener en cuenta que la regulación del uso de los VANT's aún no está definida, solo las potencias mundiales cuentan con reglamentos aeronáuticos estrictos, pueden ser instrumentos sorprendentes; pero cuando son utilizados indebidamente, pueden poner en peligro el espacio aéreo de un país e invadir la privacidad personal (Freemand and Freenland, 2015).

Las nuevas tecnologías a menudo pasan por un período de exageraciones de parte de sus promotores. Producen la emoción de los consumidores y luego desencanto con la tecnología antes de su aceptación. Existen diversos estudios de la aplicación de los VANT's en la agricultura de precisión. Las imágenes de alta resolución espacial tomadas por los VANT's han demostrado tener el potencial para el seguimiento de las variables agronómicas y ambientales. Sin embargo, es necesario capturar un gran número de imágenes superpuestas que deben ser en mosaico juntos para producir un orto de una sola imagen y precisa. Los VANT's agrícolas pueden realizar tareas sorprendentes, y pueden traer la optimización de costos, además de aportar herramientas útiles para el desarrollo de investigación, es así como los VANT's se convierten en una tecnología en forma ascendente con ramas de la ciencia aun sin explorar. El objetivo de este capítulo es estimar el volumen de agua (l) requerido a nivel pixel utilizando el método dual de FAO 56 y datos de muy alta resolución espacial obtenidos con un VANT's DJI Mavic Air con un sensor CMOS, parcelas determinadas de referencia dentro del área de estudio.

Los VANT's se han convertido en los últimos años en una herramienta útil para los agricultores, debido a la alta resolución espacial de las imágenes y la generación de algoritmos para el cálculo de diferentes índices de vegetación. Los VANT's pueden llegar a ser de muy alto coste así como los sensores, en este sentido, se han desarrollado VANT's de gama media que posibilitan la obtención de información agrícola fiable, sin embargo, los rangos de operación, tiempos de vuelo, carga útil y los diferentes tipo de cámaras utilizadas son limitadas. Por otro lado la información obtenida de los VANT's de gama media se puede utilizar en aplicaciones agrícolas,

siempre y cuando se tenga conocimientos de las diversas técnicas de procesamiento de imágenes y generación de ortomosaicos georreferenciados (Freemant and Freenland, 2015).

El uso de los VANT's como plataformas permiten poner a bordo cualquier tipo de sensor que posibilita el monitoreo en condiciones de campo reales a una resolución espacial muy alta y así poder tomar decisiones al instante, para el manejo adecuado de los diversos cultivos.

En la última década los estudios en el ámbito agrícola utilizando VANT's han aumentado significativamente, la utilización de diversas cámaras convencionales y sensores multiespectrales a bordo de los VANT's permiten generar información del estado de los cultivos, además de tener un monitoreo constante de las regiones de cultivo por ejemplo: Gago *et al.* (2015) utilizaron VANT's para la evaluación de indicadores de estrés hídrico en los cultivos, por medio del cálculo de diferentes índices de vegetación, y la alta resolución espacial obtenida, alcanzando hasta 0.5 m, esto les permitió estimar el grado de estrés hídrico en las parcelas estudiadas, determinaron rasgos importantes de los cultivos, otro de los objetivos del estudio fue encontrar el rendimiento de cultivo y la tolerancia de los cultivos al estrés hídrico sin dejar de lado los fines productivos, demostrando un gran potencial para determinar la heterogeneidad del estrés hídrico en el campo utilizando VANT's.

Peréz-Ortiz *et al.* (2015) utilizaron VANT's para generar un mapeo de malezas en los cultivos en una parcela ubicada al sur de España, en Sevilla llamada "La Monclova" (37°31'05"N – 5°18'52"O). El mapeo de malezas en el ámbito agrícola se basa en el diseño de tratamiento de control para las mismas, los VANT's permitieron encontrar con gran detalle los sitios específicos donde la cobertura de malezas iba en aumento con respecto al cultivo de la parcela. Propusieron un método para el mapeo de malezas utilizando datos espectrales y generando el cálculo de índices de vegetación. Mostraron que la resolución espacial alcanzada en el estudio resulto eficaz para la clasificación de píxeles, diferenciando las firmas espectrales de las malezas con respecto a los cultivos, generando así una herramienta para diseñar estrategias de control de malezas en sitios específicos.

Bendig *et al.* (2015) realizaron experimentación en una parcela agrícola localizada al sur de Colonia Alemania (50°37'N – 6°59'E), utilizaron VANT's equipados con un sensor multiespectral y con una cámara convencional, compararon el comportamiento de diferentes índices de vegetación calculados a partir del espectro visible y el infrarrojo cercano, obtuvieron altas correlaciones al hacer el cálculo de la biomasa. Encontraron que los datos obtenidos con una cámara convencional es una herramienta potencial aplicable para la estimación de biomasa, además combinaron datos de los índices de vegetación y la altura de planta para poder encontrar la correlación del modelo aplicado por medio de una regresión lineal simple, obtuvieron un valor de R^2 entre 0.80 y 0.82 validando así los índices calculados a partir del espectro visible y el infrarrojo cercano. Los resultados indicaron que la altura de planta esta altamente relacionado a los valores encontrados de biomasa, y el los índices de vegetación calculados con el espectro visible como buen estimador de biomasa.

En el presente estudio se busca implementar la metodología del coeficiente de cultivo-*evapotranspiración de referencia* K_c-ET_0 para el cálculo de la *evapotranspiración de cultivo*, para así obtener un volumen de agua necesario a nivel píxel en una porción de la región de riego. Utilizando un VANT's de gama media con una cámara convencional.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Área de estudio

La zona de riego estudiada denominada “Los Peroles” ubicada en el ejido de San Francisco de Asís, municipio de Rioverde, San Luis Potosí, México, Latitud $22^{\circ} 3'8.52''N$ y Longitud $99^{\circ}51'53.03''O$ y una altitud promedio de 1015 m sobre el nivel del mar (Figura 9). El riego en esta porción se distribuye desde el norte, en la regiones denominadas como Chacuaco, Joya y Las Sabanas, hasta el sur en la sierra La Boquilla; en el lado este la sierra el Cordón y al oeste San Marco, Paso Hondo y el Resumidero. La precipitación promedio anual es de 346 mm, pocas lluvias en febrero y el máximo se alcanza en noviembre, de 7 a 9 meses secos. En temperatura se tiene un promedio mensual de $35^{\circ}C$ en mayo y $7^{\circ}C$ en diciembre y enero. El tipo de clima corresponde al tipo BShwg, seco estepario.

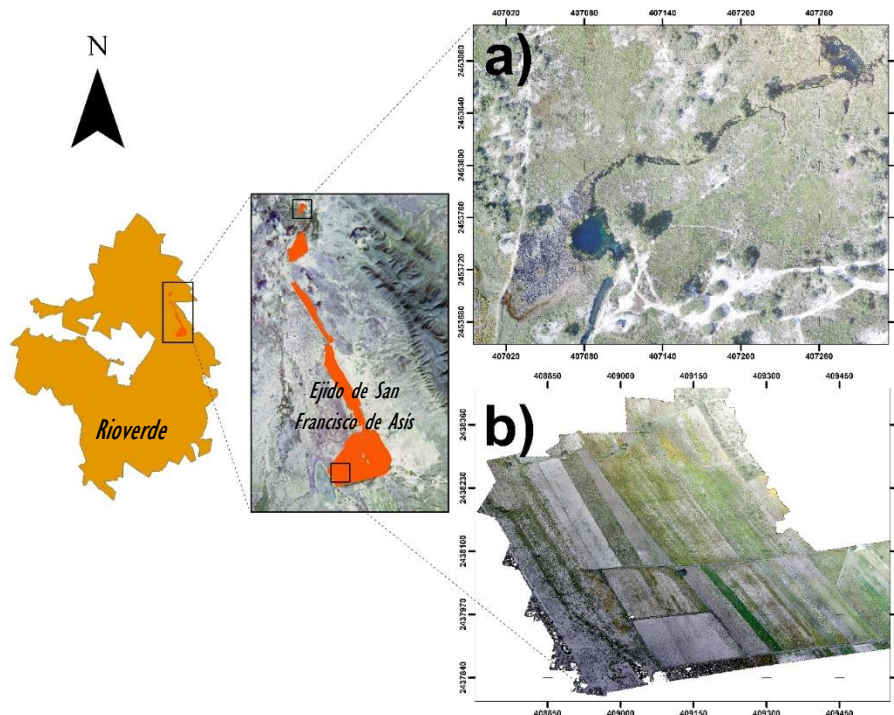


Figura 9. Localización del área de estudio, a) ortomosaico fuente de agua “Los Peroles”, b) ortomosaico zona de cultivo. Elaboración propia.

El área de estudio se caracteriza por la presencia de un manantial de forma circular, con profundidades de hasta 50 m que es la principal fuente de abastecimiento en

un canal, con un gasto entre 500 y 800 L s⁻¹, de calidad regular con conductividad eléctrica de 2.1 dS m⁻¹, estas aguas se utiliza para la zona de riego de aproximadamente 800 Ha. Sin embargo, esta fuente de abastecimiento pierde grandes volúmenes de agua por la infiltración del canal y las pérdidas durante su recorrido. La porción sur que comprende el 70% del área regable (460 ha) se le aporta un gasto de 187.73 l s⁻¹(Hernández-Tinajero, 2017), además que la conducción a las parcelas se hace por medio de canales secundarios excavados, disminuyendo el gasto ya reducido aportado. Este capítulo se centra en la evaluación de una porción de parcelas de la región sur, aproximadamente 32 ha sobrevoladas con cultivos como alfalfa y maíz, y unas parcelas sin cultivo presente. Existen diversos cultivos sembrados en esta región, sin embargo, no se encuentran en parcelas cercanas al vuelo del VANT's lo que limita generar un plan de vuelo para distintas áreas. Las aportaciones del volumen de agua tiene una variación a través del canal, sin embargo, las aportaciones de agua son más considerables en la región sobrevolada, además que son de las pocas parcelas que tienen sembradío en fechas del vuelo, en específico en Octubre de 2017.

En este sentido entre los agricultores existe un descontrol con respecto a la distribución del agua, aunque existe una Comisión que se encarga de calendarizar la distribución, no se logra abastecer a todas las parcelas, disminuyendo la productividad, aumentando la acumulación de sales en los suelos y agotando los recursos hídricos.

3.2.2. VANT´s empleado para obtención de datos de muy alta resolución

En este estudio se utilizó un dron de gama media DJI Mavic Air (Figura 10) equipado con un sensor CMOS de 12MP con un peso aproximado de 430 gr, con características de vuelo de 68.4 km h^{-1} , altura de vuelo hasta 5000 m, y tiempo de vuelo de 21 min. (Cuadro 11). Para la zona de riego se alcanzó una altura de vuelo de 50 m abarcando un área de 32 ha, alcanzando una resolución espacial de 2 cm, con un total de 3 vuelos, con fecha de 22 de octubre de 2017, se obtuvieron un total de 424 imágenes, con las cuales se generó un ortomosaico (Figura 11), el cual fue georreferenciado por medio de procesos de fotogrametría (Cesetti *et al.*, 2011) con puntos de control terrestre medidos con una antena GPS Diferencial ProMark 2 (Figura 12) (Cuadro 12), los cuales fueron corregidos con datos de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) de INEGI y proyectados al sistema de coordenadas UTM 14 N, la corrección diferencial de los datos obtenidos con la antena GPS se hizo específicamente con datos de las estaciones de San Luis Potosí ($22^{\circ} 08' 39.18986'' \text{ N} - 101^{\circ} 00' 55.81688'' \text{ O}$, Altitud de 1910.28 m) y Guanajuato ($21^{\circ} 00' 09.75456'' \text{ N} - 101^{\circ} 16' 17.99246'' \text{ O}$, Altitud de 2062.28 m).



Figura 10. Dron DJI Mavic Air, con sensor CMOS de 12 MP. Tomada de www.dji.com/mavic-air.

Cuadro 11. Características de dron DJI Mavic Air, Elaboración propia.

Características	Descripción
Peso	430 gr
Dimensiones	—
Velocidad máxima	68,4 Km/h en modo Sport
Altura máxima de servicio	5.000 m sobre nivel del mar
Tiempo de vuelo	21 minutos
Conectividad	Alcance máximo de 4 km
Cámara	Sensor 12MP 1/2,3" CMOS
Lente	FOV 81,9° 25mm f/2.6
Vídeo	4K a 30 fps y 1080p a 120 fps
Almacenamiento	8 Gb ampliables por microSD

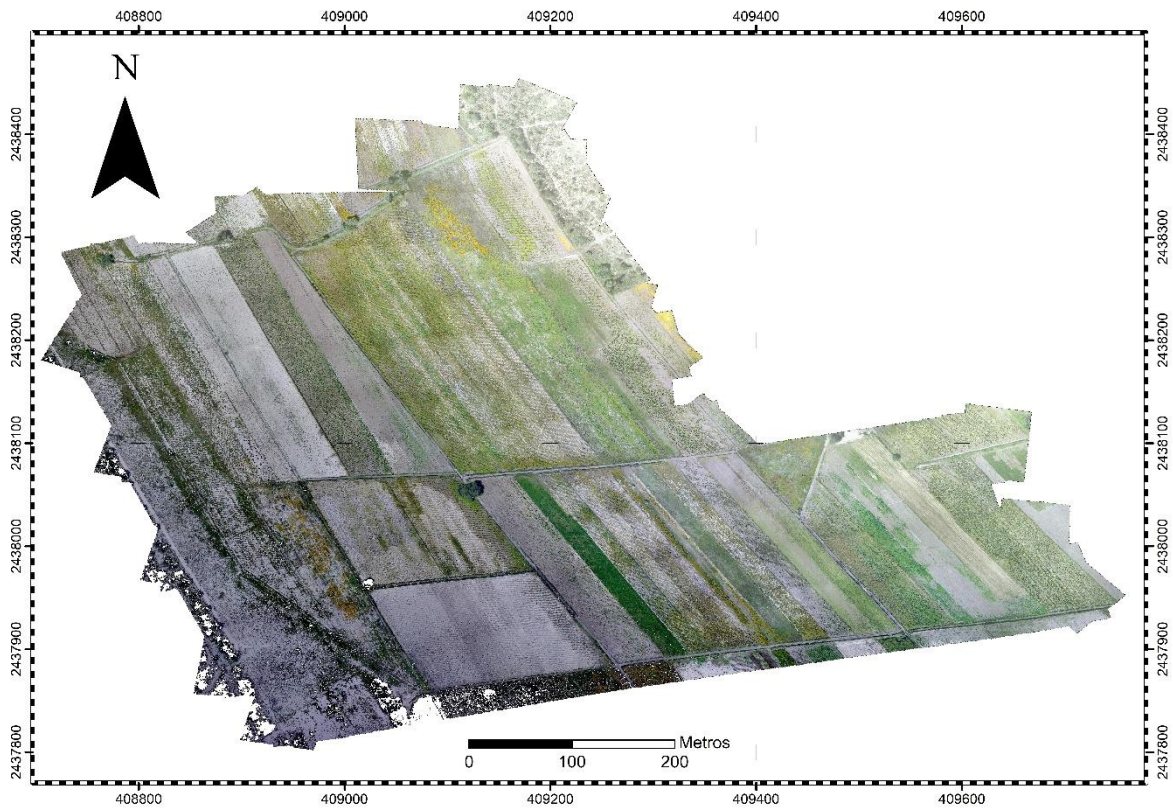


Figura 11. Ortomosaico generado de vuelo de dron DJI Mavic Air, 10 ha.
Elaboración propia.

La alta resolución espacial de 2 cm del ortomosaico permite obtener gran detalle de las parcelas, sin embargo, el ortomosaico al tener una gran cantidad de datos, y la complejidad del procesamiento, se generó el análisis para 6 parcelas de la región sur del mosaico, las cuales abarcan un área aproximada de 10 ha, y así poder evaluar los requerimientos de riego a nivel parcela en el día del vuelo.

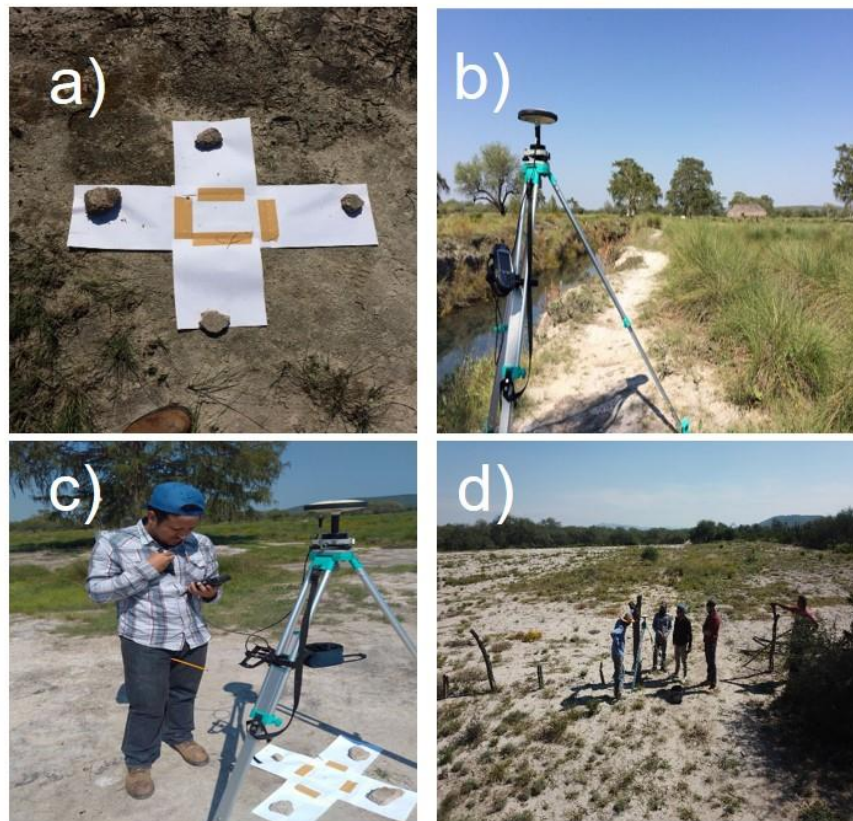


Figura 12. Colocación y medición de puntos de control terrestre. a) Colocación de marcas, b), c), d) medición de puntos de control terrestre. Elaboración propia.

Es importante la georreferencia de las imágenes obtenidas por medio del dron DJI Mavic Air, debido a que los cálculos necesarios para la obtención de índices de vegetación y evaluación de los requerimientos de riego, es necesario tener unidades de medida, además que el VANT's utilizado no cuenta con una posición GPS exacta, como algunos VANT's más sofisticados que no necesitan puntos de control terrestre, aunque para la planeación del vuelo el VANT's se posiciona en un lugar, y las imágenes obtenidas contienen una coordenada geográfica del centro de la imagen, sin embargo, al generar el ortomosaico esta coordenada se pierde al igual que la orientación del mismo, en este sentido es importante la obtención de puntos de control terrestre, para aumentar la precisión del trabajo realizado.

Cuadro 12. Puntos de control terrestre corregidos con datos de Red Geodésica Nacional Activa. Elaboración propia.

Puntos de control	Coordenada UTM Este (m)	Coordenada UTM Norte (m)
Punto de control 1	409058.3	2438446
Punto de control 2	409588.3	2437915
Punto de control 3	409074.7	2437842
Punto de control 4	408788	2438175

3.2.3. Índice de vegetación utilizando imagen RGB

Los índices de vegetación nos permiten conocer el estado actual de los cultivos por medio del cálculo de las reflectividades obtenidas en cada región del espectro electromagnético, las cuales difieren para cada objeto en la superficie terrestre. En este sentido, las reflectividades en la vegetación se pueden diferenciar de acuerdo a su nivel de verdor, es decir su composición en el pigmento de la hoja, el cual tiene un reflejo diferente de acuerdo al aumento o disminución de clorofila, lo que permite reflejar el estado fisiológico de las plantas. Los índices de vegetación se derivan de las bandas de reflectancia basadas en el espectro visible perteneciente al RGB (Rojo, Verde, Azul) y el IR (Infrarrojo), además de otras regiones del espectro electromagnético más estrechas. La obtención de datos de las bandas RGB aportan gran cantidad de información del estado vegetativo y regularmente estas bandas espectrales son captadas por una cámara convencional, sin embargo, para obtener índices de vegetación que puedan captar el cambio de pigmento en las plantas, se utilizan cámaras multispectrales e hiperspectrales de muy alto costo (Gago *et al.*, 2015).

El índice más comúnmente usado es el NDVI (Rouse *et al.*, 1973), este índice es calculado a partir de los espectros rojo e infrarrojo, debido a la elevada reflectividad en el espectro del infrarrojo detecta el contenido de clorofila relacionado directamente al estado vegetativo, además permite evaluar la cobertura vegetal por la sencillez de su obtención y la interpretación. Existen diversos índices que se han probado en diferentes estudios para conocer el estado fisiológico de las plantas, además de proveer de datos para la evaluación de estrés hídrico y el cálculo de

biomasa por ejemplo (Bendig *et al.*, 2015), evaluaron diversos índices de vegetación calculados a partir del espectro visible y el espectro infrarrojo, evaluaron la biomasa y las alturas de planta, donde encontraron una alta relación en la respuesta de los índices de vegetación y la altura de planta, teniendo así una herramienta para la estimación de la biomasa utilizando una cámara RGB y una cámara multiespectral, a bordo de un VANT's.

En este estudio se utilizó el índice GRVI (Tucker *et al.*, 1979) calculado a partir del espectro visible con la banda verde y rojo, Bendig *et al.* (2015) evaluaron este índice y su comportamiento con respecto a las alturas de las plantas y el cálculo de biomasa, mostraron una relación significativa, indicando este índice como una buena herramienta que permite estimar el estado vegetativo, indicador de la fenología y estimador de biomasa. Los altos valores de reflectancia de plantas en el espectro verde y la absorción en el espectro rojo y azul de la clorofila permiten generar índices como el GRVI (ecuación 8), y este se calcula de la siguiente manera:

$$(8) \text{ GRVI} = \frac{RG - RR}{RG + RR}$$

Donde:

RG = Reflectancias en espectro verde

RR = Reflectancias en espectro rojo

Se calculó el GRVI para el ortomosaico obtenido con el sensor CMOS a bordo del VANT's DJI Mavic Air, este sensor es una cámara convencional que abarca el espectro visible, y se utilizó para generar el cálculo de las recomendaciones de riego a nivel píxel por medio de la metodología de cultivo K_c-ET_0 , en las parcelas seleccionadas de la región sur del ortomosaico.

3.2.4. Cálculo de coeficiente de cultivo (K_c) utilizando GRVI

En la metodología del cálculo de los requerimientos de riego el principal objetivo es la evaluación de la evapotranspiración de cultivo (ET_c), que se traduce como una pérdida de agua, por efecto de evaporación de suelo y transpiración de la planta, en forma paralela, es decir cuando ocurre este proceso la planta requiere de aportaciones de volúmenes de agua exactos para compensar la pérdida. En este sentido se han desarrollado técnicas para la evaluación de la ET_c por medio de percepción remota, calculando el coeficiente de cultivo (K_c) utilizando índices de vegetación como el NDVI que permite obtener un valor K_c validado en diversas investigaciones, para cultivos herbáceos (Calera *et al.*, 2005). En este sentido, una ecuación comúnmente (ecuación 9) usada para el cálculo de K_c por medio de percepción remota.

$$(9) \quad K_c = 1.25 \text{ NDVI} + 0.1$$

$$(10) \quad \text{NDVI} = \beta_0 (\text{GRVI}) + \beta_1$$

En este trabajo se propone la modificación de la ecuación 9, ingresando el GRVI por el NDVI, asumiendo el mismo comportamiento de la vegetación (ecuación 10). Para la relación de NDVI-GRVI se utilizó una regresión lineal simple, para encontrar los factores de conversión de GRVI a NDVI, esto utilizando el NDVI de una imagen Landsat 8 OLI para la fecha más cercana al vuelo del VANT's, en este caso la fecha de la imagen fue del 29 de Octubre de 2017, también se utilizaron las reflectancias del rojo y el verde para el cálculo del GRVI de la escena Landsat 8 OLI, y así poder generar la regresión lineal simple. Esta regresión lineal simple arrojó como resultado un valor alto en la correlación de los índices con un $R^2 = 0.94$, esto nos indica que el GRVI puede ser utilizado como como NDVI, debido a que tiene el mismo comportamiento, es decir, puede ser usado en la ecuación 9 para la obtención del K_c , utilizando el ecuación de la recta de tendencia obtenida por medio de la regresión lineal simple.

N

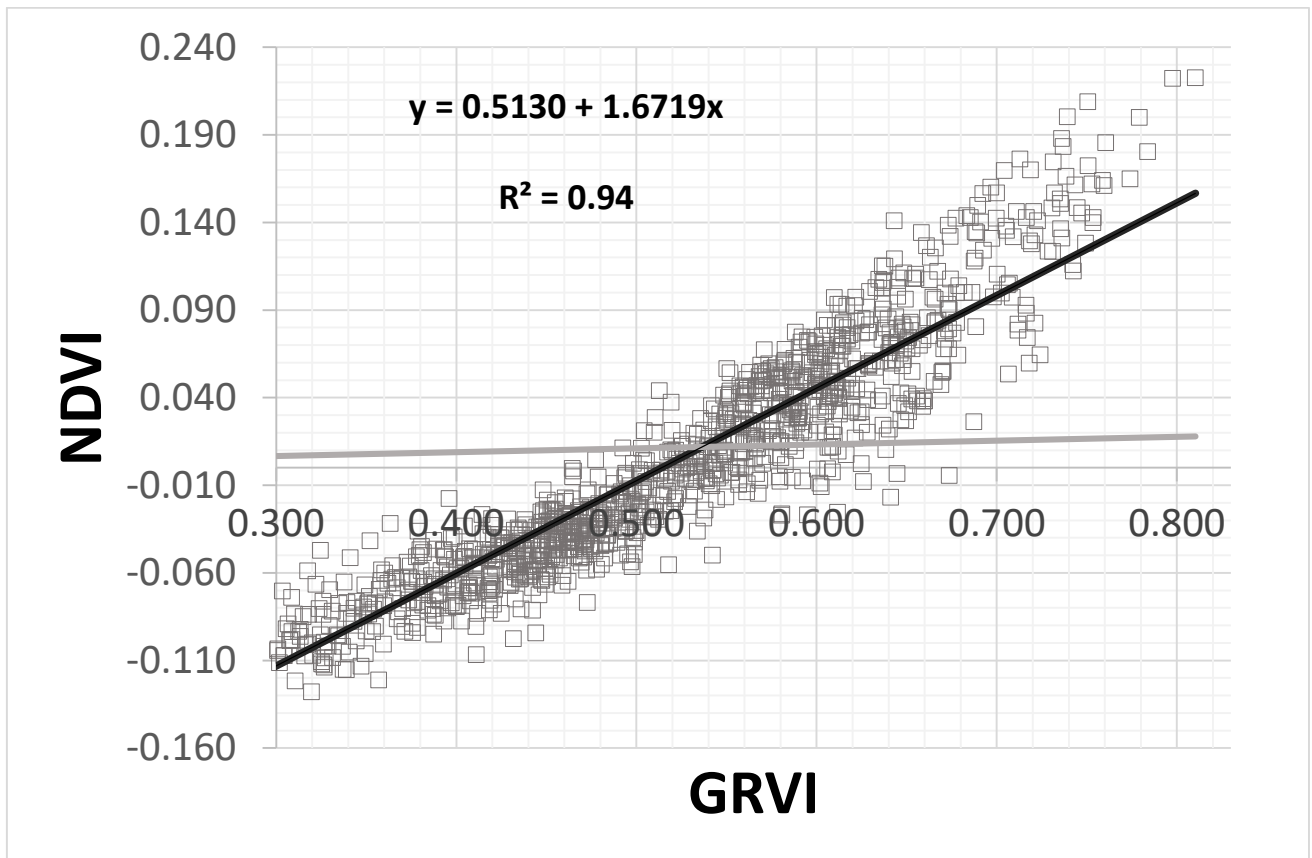


Figura 13. Gráfica de distribución de relación NDVI-GRVI obtenida de Landsat 8 OLI, fecha de 29 de octubre de 2017. Elaboración propia.

Se presenta la gráfica de distribución (Figura 13), de la relación entre el NDVI y el GRVI de la escena Landsat 8 OLI del día 29 de octubre de 2017. Se demostró un comportamiento altamente significativo, es decir la regresión lineal simple mostró una alta correlación entre NDVI-GRVI, lo cual permitió estimar el valor K_c para el ortomosaico obtenido. Sin embargo los valores se pueden sobreestimar, debido a que las escalas espaciales son diferentes, es decir la correlación entre el NDVI y el GRVI es alta con reflectividades de la escena Landsat con una resolución especial de 30 m, y el ortomosaico y sus reflectividades contienen una resolución especial de 2 cm, en este sentido, la mezcla de reflectividades en el ortomosaico puede generar una variación en el cálculo del K_c , es decir, el suelo desnudo presente en la región llega a abarcar la mayoría de píxeles y disminuir el número de píxeles de vegetación.

3.2.4. Recomendación de riego utilizando datos de muy alta resolución

La metodología aplicada para la estimación de las necesidades hídricas se basa en series de tiempo de NDVI y datos agroclimáticos, la metodología más comúnmente usada y validada para estimar requerimientos de riego en los cultivos es la denominada coeficiente de cultivo-*evapotranspiración* de referencia descrita en el manual de FAO (Allen *et al.*, 1998). El procedimiento K_c-ET_0 es el producto de dos factores, el primero engloba los factores de evaporación y transpiración que dependerá el estado fisiológico de la planta así como también de su estado fenológico, y el segundo es la demanda evaporativa de la atmósfera en condiciones óptimas en relación con una superficie o cultivo de referencia (Plaza-Jiménez, 2017). En el marco conceptual de la metodología K_c-ET_0 basada en datos de percepción remota deriva el valor del K_c obtenido de datos espectrales, en este estudio obtenido a partir del cálculo del GRVI. Para la obtención de la ET_0 , se consultaron los datos de la estación agroclimática “El Naranjal” ubicada en el municipio de Ciudad Fernandez, a una distancia aproximada de 22 km de la zona de estudio. En este trabajo se implementa la metodología K_c-ET_0 para el cálculo de las necesidades de riego, utilizando datos RGB, como una herramienta potencial y operativa que permita conocer a nivel píxel los volúmenes de agua requeridos en época de siembra, favoreciendo el cuidado y la distribución de los recursos hídricos en regiones agrícolas. En 2017 Plaza Jiménez realizó investigación para diversos cultivos en la provincia de Albacete, España, tanto en herbáceos como de hortalizas, estimó los requerimiento de riego a nivel parcela utilizando series de tiempo del satélite Landsat 8 OLI y Sentinel, además propone una técnica de recomendación de riego a nivel parcelario con una semana de antelación, utilizando las series de tiempo, predice un valor de NDVI para la siguiente semana, con el cual obtendrá un valor de K_c previsto y apoyado de datos meteorológicos agroclimáticos de la Agencia Estatal Meteorológica (AEMET) y así obtener el valor de ET_c a nivel parcelario. En este trabajo se realizó el cálculo de ET_c a nivel píxel, para el aprovechamiento de la alta resolución espacial alcanzada con el vuelo del VANT's, y se estimó el volumen requerido para cada píxel en 6 parcelas de la región sur del ortomosaico (Figura 14).

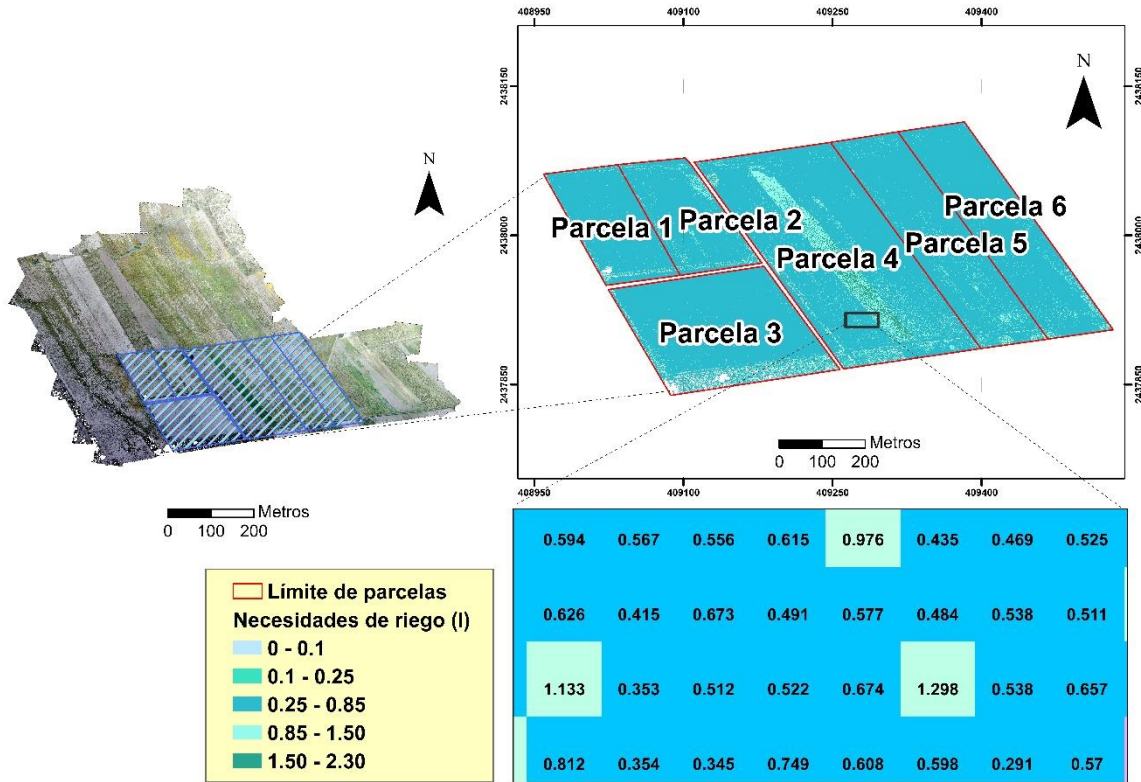


Figura 14. Estimación de volúmenes requeridos de agua a nivel píxel. Elaboración propia.

En la figura 14 se pueden observar los volúmenes de agua requeridos a nivel píxel para cada parcela, en la porción sur del ortomosaico, las variaciones de los volúmenes dependen de la cubierta vegetal presente, la mayor parte de la región se encuentra sembrada con maíz, sin embargo, sólo para parcela 4 presentaba una altura significativa del cultivo, es decir, que había tenido riego para el ciclo de maíz de otoño-invierno. Por otro lado, el resto de las parcelas presentaban una altura de cultivo mínima, lo cual permitiera observar en mayor cantidad el suelo desnudo, en este sentido, el valor de K_c puede estar sobreestimado, y se requieren volúmenes de agua más altos, los que predomina en las parcelas analizadas. Esta herramienta permite conocer con gran detalle la cantidad de agua requerida a nivel parcelario. Sin embargo, se requiere de un monitoreo constante para evaluar el comportamiento vegetativo de la región, así como datos agroclimáticos de la región para disminuir el error en las recomendaciones de riego a nivel parcelario. En la

figura 16 se muestra a nivel parcelario el volumen de agua necesario para la fecha del vuelo del VANT's para cultivos herbáceos. En el cuadro 13 se muestran los volúmenes requeridos a nivel parcela, obtenidos de la sumatoria de los pixeles contenidos en cada parcela, en unidades de medida de litros.

Cuadro 13. Requerimiento de volúmenes de agua a nivel parcelario, y su extensión en hectáreas. Elaboración propia.

Parcela	Volumen de agua (l)	Área (ha)
Parcela 1	20,000	1
Parcela 2	20,600	1
Parcela 3	39,500	1.89
Parcela 4	86,420	3.16
Parcela 5	39,850	1.56
Parcela 6	38,070	1.53

En la Figura 15 se presenta la metodología empleada para el cálculo de los volúmenes de agua necesario a nivel parcelario, utilizando un VANT's de gama media, con un sensor convencional y los procesos cartográficos para georreferenciar ortomosaicos. Además contiene los procesos aplicados para la obtención de la ET_c y volúmenes de riego requeridos a nivel píxel utilizando el GRVI.

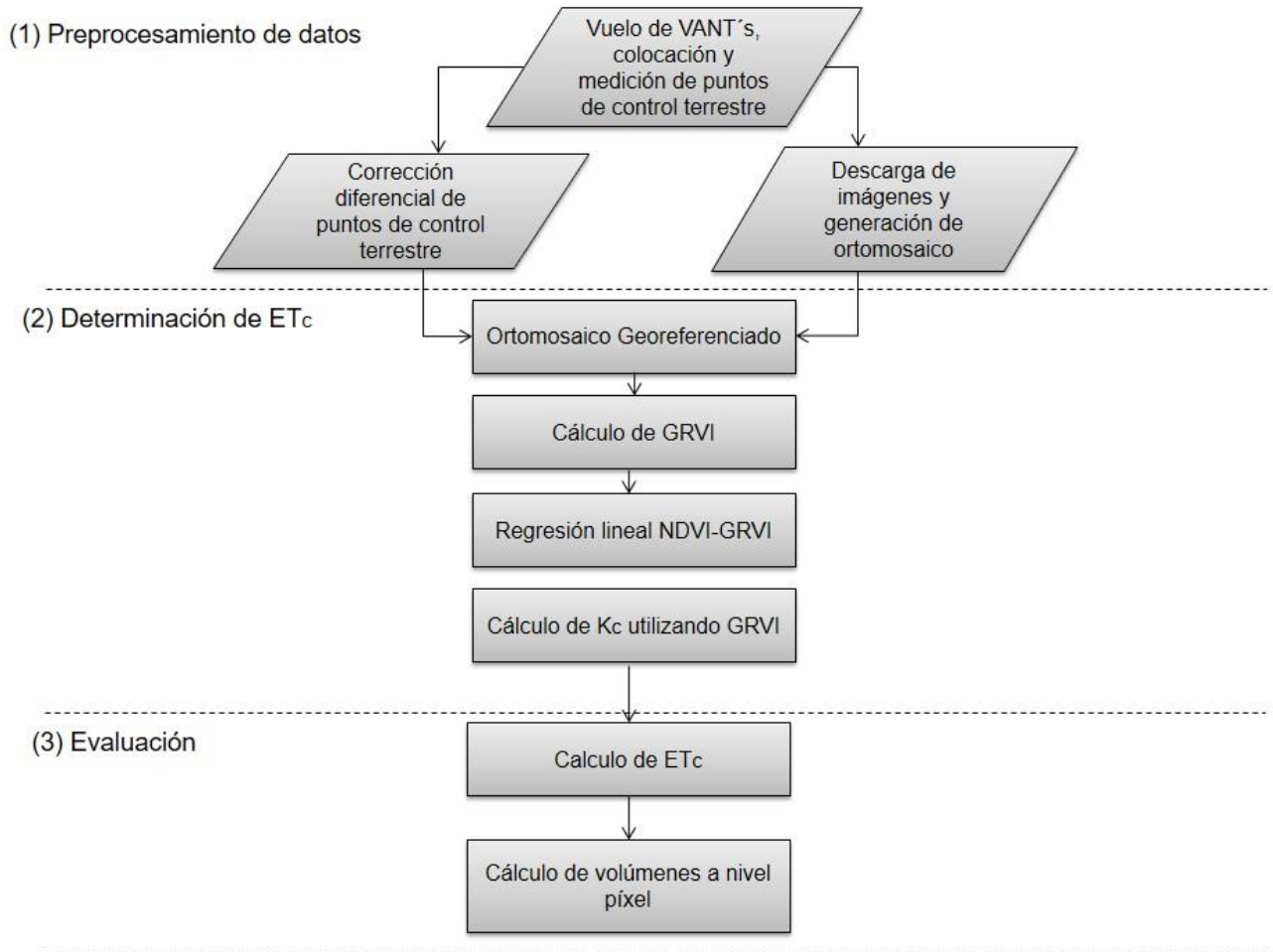


Figura 15. Metodología de capítulo 3, para la obtención de volúmenes de riego requeridos a nivel píxel. Elaboración propia.

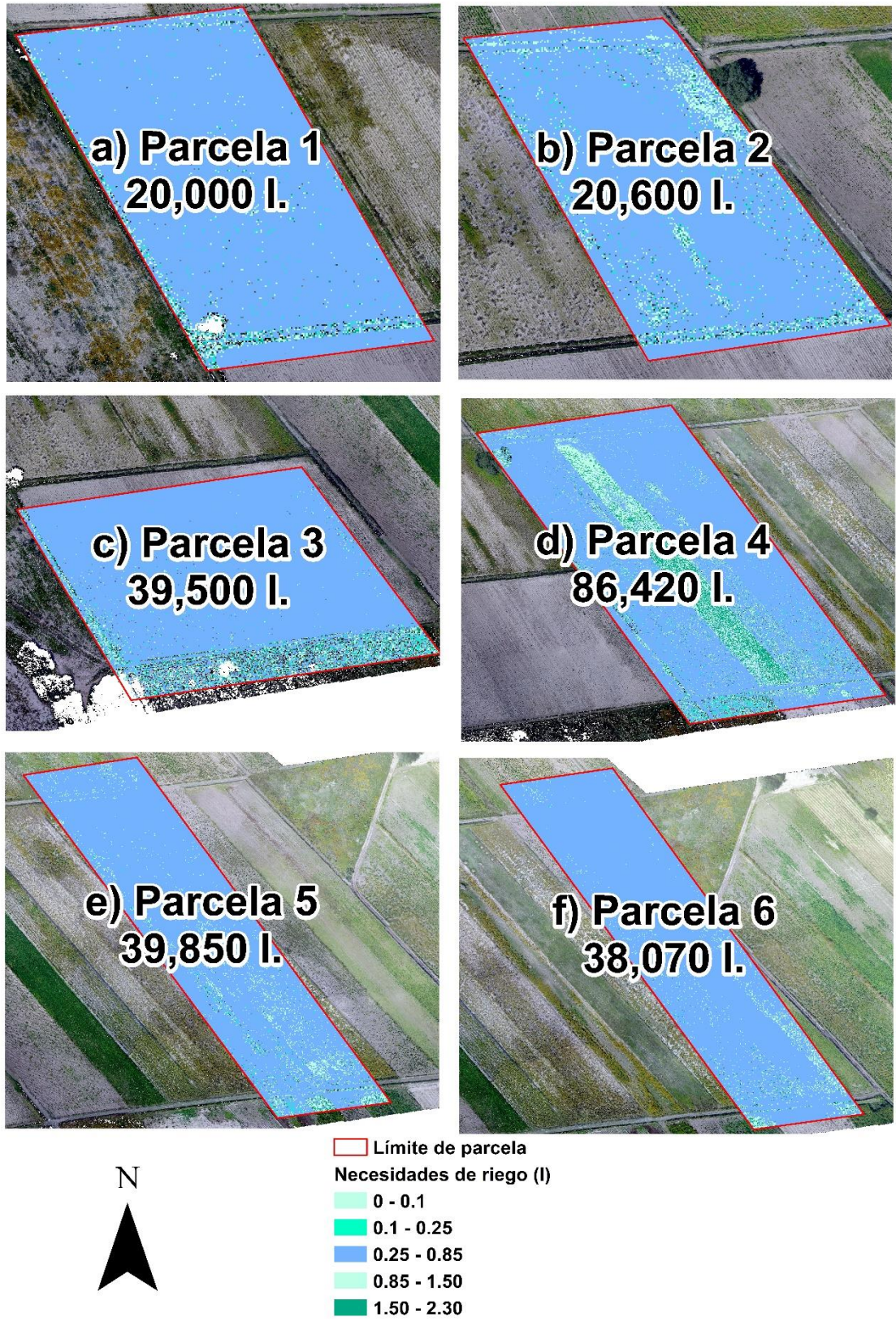


Figura 16. Volúmenes de agua necesaria a nivel parcelario. Elaboración propia.

Los VANT's son una herramienta tecnológica que permiten poner abordo cualquier tipo de sensor que nos permita evaluar cualquier variable climática, sin embargo, existen limitaciones para su uso, principalmente las económicas, así como las operativas, en este trabajo, se utilizó un VANT's de gama media con una cámara convencional, con el cual se obtuvieron datos para el cálculo del GRVI, sin embargo es importante señalar que el proceso fotogramétrico es de suma importancia para el georreferenciamiento del mosaico, que permite hacer cálculos eficientes en un entorno de sistemas de información geográfica.

El GRVI calculado con el ortomosaico, mostró ser un buen indicador del estado vegetativo, tal como lo estudió Bendig *et al.* (2015), encontró una alta relación entre el NDVI y el GRVI con un valor de $R^2 = 0.94$, lo cual permitió ingresarlo a la ecuación 10 para el cálculo del K_c y así poder evaluar la ET_c , traducida como los requerimientos de agua en la planta. En el presente estudio se calcularon los valores de ET_c a nivel píxel, debido al gran detalle obtenido con el mosaico, con una resolución espacial de 2 cm. Además se estimó el volumen requerido a nivel píxel y el total de volúmenes a nivel parcelario en la porción sur del ortomosaico.

El requerimiento de agua necesario calculado a partir de datos espectrales es una herramienta potencial para la planeación de riego y manejo de cultivo, sin embargo, en la región puede llegar a no ser tan aprovechable debido al descontrol existente en la distribución del agua de riego, además que la obtención de imágenes de muy alta resolución por medio de VANT's no es de bajo costo.

La integración del coeficiente de cultivo derivado a partir del GRVI y aplicado al modelo FAO 56 del K_c-ET_0 , permite abordar la estimación de la ET_c de forma precisa y distribuida espacialmente, sin embargo, el presente estudio presenta una resolución temporal baja lo que limita una generación de series de tiempo que permitan evaluar de forma más precisa el área de estudio.

Por otro lado, si se busca disminuir el error en los cálculos de los volúmenes de agua, es necesario contar con datos multiespectrales y validaciones radiométricas en campo, para la identificación espectral de los diversos cultivos, además de la aportación de datos agroclimáticos diarios, para poder determinar un

comportamiento de la ET_0 , sin embargo el cálculo generado para la región en estudio aportó volúmenes considerables, demostrando ser una herramienta que permita suministrar el volumen exacto de agua para cada parcela, aumentando la eficacia en el riego, buscando la protección de la fuente de agua principal, y ayudando al agricultor, aumentando su productividad y disminución en costos operativos.

3.3. Conclusión

La aportación de agua precisa es uno de los principales objetivos de la gestión eficiente del agua de riego. El ejido de San Francisco de Asís, en las últimas décadas ha tenido un problema grave de gestión de agua de riego, suministrando volúmenes exagerados a las parcelas y teniendo pérdidas del gasto a través del canal principal, poniendo en riesgo el agotamiento de la fuente de abastecimiento, llamada "Los Peroles". La infraestructura hidráulica traerá consigo una mejora en las aportaciones de agua, sin embargo, las técnicas de riego, seguirán siendo ineficientes, si no se tiene un plan de manejo y selección de cultivo y una calendarización de riego precisa.

El GRVI mostró ser un buen indicador para el cálculo del K_c , sin embargo, es necesario contar con metodos de validación en campo, como la radiometría o una cámara multiespectral, para así disminuir el error en las estimaciones. Por otro lado puede ser una herramienta fiable para el monitoreo de regiones agrícolas con mayor producción.

El cálculo de los volúmenes de agua a nivel píxel es una herramienta potencial para la planeación de riego del agricultor. La metodología presentada permite estimar volúmenes de agua, sin embargo, los datos pueden ser sobreestimados debido a la falta de cobertura vegetal en la zona, y pueden llegar a ser más precisos generando vuelos semanales, teniendo así series de tiempo que permitan predecir valores de K_c , y predicciones meteorológicas para la ET_0 , teniendo así una herramienta operativa y útil para la planificación del riego.

Conclusiones

La principal problemática presente en la zona de estudio es la baja eficiencia de riego, debido a la falta de organización entre los usuarios. El consumo exagerado de volúmenes y la falta de planeación de riego ponen en riesgo la disponibilidad del agua de la principal fuente de abastecimiento conocida como “Los Peroles”. En este sentido, el estudio realizado en la zona de riego del ejido de San Francisco de Asís, determinó la eficiencia en el riego implementando técnicas de percepción remota con un 47.5%, comparado con investigaciones realizadas en campo donde se obtuvieron eficiencias de riego por debajo del 50%, desde el lanzamiento de los primeros satélites de observación terrestre el uso de los datos espectrales aumentó considerablemente, permitiendo calcular índices de vegetación y monitoreando grandes extensiones de cobertura vegetal, tal es el caso del NDVI, uno de los índices más comúnmente utilizado, en este estudio se utilizó para la evaluación del coeficiente de cultivo, integrándolo en el modelo FAO 56 para el cálculo de evapotranspiración de forma precisa y distribuida espacialmente.

La primera pregunta de investigación planteada en este trabajo fue: ¿Mediante el uso de sensores remotos, es posible estimar la cantidad de agua utilizada en la evapotranspiración y con ellos evaluar la eficiencia de riego? Para responder a esta pregunta se implementó una metodología de cálculo de evapotranspiración por medio del método K_c-ET_0 utilizando datos espectrales Landsat 8 OLI. Se utilizó una serie de tiempo de imágenes Landsat 8 OLI para el año 2015, las imágenes de este satélite se han implementado en estudios de cobertura vegetal y desarrollo fenológico, considerado de resolución espacial media con un píxel de 30 m, permite el monitoreo de grandes extensiones, además son imágenes de acceso libre y sin costo.

La metodología utilizada en el estudio, se fundamenta en el cálculo del coeficiente de cultivo obtenido mediante índices de vegetación, esta metodología ofrece una forma de hacer cálculo de necesidades netas de riego y consumo de agua a nivel regional, sin embargo, se debe considerar que las validaciones en campo son importantes, para la disminución de errores en el cálculo de las necesidades de

riego. Con los resultados encontrados con un 47.5% de eficiencia de riego, comparada con investigaciones enfocadas a la evaluación de riego por medio de técnicas de campo y con la utilización de software de riego, puede ser un buen indicador del consumo de agua por medio de evapotranspiración. Es evidente que el sistema de riego es deficiente, y se requiere de infraestructura hidráulica para aumentar su eficiencia, sin embargo, es recomendable que los agricultores realicen programas de capacitación para las mejoras en las técnicas de riego, así como una selección de cultivos adaptables a los suelos y calidades de agua de la región.

La segunda pregunta de investigación planteada en este trabajo fue: ¿Es posible estimar volúmenes de agua requerido por los cultivos a nivel píxel con el uso de imágenes de muy alta resolución espacial obtenidas mediante un dron equipado con un sensor RGB? Para responder a esta pregunta se realizó un vuelo de un VANT's equipado con un sensor RGB (CMOS), se colectaron 424 imágenes con una resolución espacial de 2 cm y se implementaron técnicas de fotogrametría para el georeferenciamiento del ortomosaico, utilizando una antena GPS ProMark 2 para la medición de puntos de control terrestre. Posteriormente se obtuvo el cálculo de un índice de vegetación por medio de las bandas espectrales RGB, utilizando la banda del verde y la banda del rojo conocido como el GRVI. El GRVI obtenido por medio de datos de muy alta resolución demostró ser un buen indicador de estado vegetativo, por su valor alto de correlación con el NDVI con un $R^2 = 0.94$. Este índice se adaptó a la fórmula para la obtención del coeficiente de cultivo, para después obtener la evapotranspiración de cultivo, convertidos a necesidades netas de riego, aprovechando el gran detalle de resolución espacial alcanzado con el vuelo del VANT's (2 cm) se obtuvieron los volúmenes necesarios a nivel parcelario en la porción sur del ortomosaico, con un total de 244,440 l sólo para la fecha del vuelo, y para las parcelas seleccionadas, este estudio puede ser un buen indicador para la estimación de las cantidades agua necesarias, sin embargo, se debe considerar la obtención de series de tiempo GRVI para conocer con más exactitud su comportamiento y en fechas de inicios de siembra, además los estudios de campo son de importancia para la calibración de los datos espectrales, por ejemplo, la radiometría en campo, para la discriminación de diversos cultivos, y evitar mezclas

espectrales que pueden aumentar el error en la estimación de las necesidades de riego. Este trabajo presenta una herramienta valiosa y operativa dentro del proceso de toma de decisiones relacionadas a la gestión de agua de riego a nivel píxel en una parcela agrícola, donde la selección de un método de conducción eficiente será indispensable para lograr los objetivos planteados.

Los resultados muestran ser una herramienta funcional para los agricultores, principalmente para calendarización y planeación del riego, beneficiando la productividad y optimizando los recursos económicos y principalmente la disminución del consumo de agua de “Los Peroles”.

En este sentido, los habitantes del ejido de San Francisco de Asís son conscientes de los recursos naturales que se tienen en la zona, el apoyo de instancias gubernamentales es de importancia, desarrollando proyectos enfocados a la gestión adecuada de riego, selección de cultivos y protección de los recursos hídricos; de continuar con el consumo de agua, se pone en riesgo la disponibilidad y la sustentabilidad de los recursos.

Dentro de las preguntas de investigación pendientes que pueden motivar a la realización de trabajos a futuro y que se desprenden de la realización de este trabajo, se encuentran la obtención de una serie de tiempo de imágenes de satélite de una resolución espacial mayor, e implementarlas en el modelo de cálculo de evapotranspiración, radiometría de campo para la discriminación de los diferentes cultivos de la zona y para la calibración de los datos obtenidos por medio de imágenes de VANT's. Aumentar el número de vuelos de VANT's para abarcar el total de las hectáreas de cultivo y conocer el comportamiento a nivel regional de las necesidades de riego con datos de muy alta resolución espacial. Por otro lado las imágenes de VANT's se pueden utilizar como herramienta para la identificación de especies vegetales e inventarios forestales, además de servir para la generación de un plan de conservación y cuidado de los recursos naturales, como apoyo para la declaración de zona protegida.

Referencias

- Abdul Karim, S. N. A., Ahmed, S. A., Nischitha, V., Bhatt, S., Raj, S. K. and Chandrashekarappa, K. N. 2013. FAO 56 Model and Remote Sensing for estimation of crop-water requirement in Main Branch Canal of the Bhadra Command area, Karnataka state. *Journal Indian Society of Remote Sensing*. 41:883-894.
- Abuzar, M., Whitfield, D., McAllister, A., Lamb, G., Sheffield, K. and O'Connell, M. 2013. Satellite Remote Sensing of crop water use in an irrigation area of south-east Australia. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS*. pp. 3269-3272.
- Acutis, M., Rinaldi, M., Mattia, F., and Perego, A. 2009. Integration of a crop simulation model and remote sensing information. In *Crop Modeling and Decision Support*. pp. 307-316.
- Ahmed, I. and Andrianasolo, H. H. 1997. Comparative assessment of multisensor data for suitability in study of the soil salinity using Remote Sensing and GIS in the Fordwah irrigation division, Pakistan. *Geoscience and Remote Sensing*. 4:1627-1629.
- Alexandridis, T. K., Panagopoulos, A., Galanis, G., Alexiou, I., Chemin, Y., Stavrinos, E., Bilas, G. and Zalidis, G. C. 2014. Combining remotely sensed surface energy fluxes and GIS analysis of groundwater parameters for irrigation system assessment. *Irrigation Science*. 32:127-140.
- Allen, R. G.: Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study, *J. Hydrol.*, 229, 27–41, 2000.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A. and Jensen, M.E., 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98: 899–920.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration*: The FAO-56 method.
- Al-Najar, H. 2011. The integration of FAO-CropWat model and GIS techniques for estimating irrigation water requirement and its application in the Gaza Strip. *Natural Resources*. 2:146-154.
- Amri, R., Zribi, M., Lili-Chabaane, Z., Szczypta, C., Calvet, J. C. and Boulet, G. 2014. Using the dual approach of FAO-56 combined with multi-sensor remote sensing for estimating the regional evapotranspiration. *International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing – ATSIP'2014*. pp 373-378.

- Bajocco, S., Rosati L. and Ricotta, C. 2010. Knowing fire incident through fuel phenology: a remotely sensed approach. *Ecological Modelling*. 221:59-66.
- Bashir, M. A., Hata, T., Tanakamaru, H., Abdelhadi, A. W. and Tada, A. 2007. Remote Sensing derived crop coefficient for estimating crop water requirements for irrigated sorghum in the Gezria Scheme, Sudan. *Journal of Environmental Informatics*. 10:47-54.
- Bastawesy, M. E. and Ali, R. R. 2013. The use of GIS and Remote Sensing for the assessment of waterlogging in the dryland irrigated catchments of Frafra Oasis, Egypt. *Hydrological Processes*. 27:206-216.
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Gnyp, M. L. and Bareth, G. 2015. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 39:79-87.
- Benhadj, I., Duchemin, B., Simonneaux, V., Maisongrande, P., Khabba, S. and Chehbouni, AG. 2007. Combined use of NDVI time courses at low and high spatial resolution to estimate land cover and crop evapotranspiration in semi-arid areas. *Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*. pp. 1-6.
- Bharathkumar, L. and Mohamed-Aslam, M. A. 2015. Crop pattern mapping of Tumkur Taluk using NDVI technique: A Remote Sensing and GIS approach. *Aquatic Procedia*. 4:1397-1404.
- Bhojaraja, B. E., Hegde, G., Pruthviraj, U., Shetty, A. and Nagaraj, M. K. 2015. Mapping agewise discrimination of arecanut crop water requirement using hyperspectral remote sensing. *Aquatic Procedia*. 4:1437-1444.
- Blaes, X., Vanhalle, L. and Defourny, P. 2005. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series. *Remote Sensing of Environment*. 96:352-365.
- Boken, V. K., Hoogenboom, G., Hook, J. E., Thomas, D. L., Guerra, L. C. and Harrison. 2004. Agricultural water use estimation using geospatial modeling and a geographic information system. *Agricultural Water Management*. 67:185-199.
- Bolashvili, N., Karalashvili, T., Geladze, V., Machavariani, N., Chikhradze, N. and Kartvelishvili, D. 2015. Efficient use of water resources in agricultura. *Procedia Environmental Sciences*. 29:107-108.
- Bradley, B.A., Jacob, R.W., Hermance, J.F. and Mustard, J.F. 2007. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment*. 106:137-145.

- Brown, M.E. and De Beurs, K.M. 2008. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. *Remote Sensing of Environment*. 112:2261-2271.
- Calcagno, G., Mendicino, G., Monacelli, G., Senatore, A. and Versace, P. 2007. Distributed estimation of actual evapotranspiration through remote sensing techniques. *Methods and tools for drought analysis and management*. 62:125-147.
- Calera, A., Campos, I. and Garrido, J. 2016. Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. *Jornada técnica de innovación en gestión del regadío mediante redes agroclimáticas, teledetección y sistemas de información*. pp. 18.
- Calera, A., Cuesta, A., Jochum, A., González, J., Montoso, A., 2005. Irrigation management from space: Towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*. 19:337-353.
- Calzadilla, A., Rehdanz, K. and Tol, R. S. J. 2011. Water scarcity and the impact of improved irrigation management: a computable general equilibrium analysis. *Agricultural Economics*. 42:305-323.
- Campos, I., 2012. Evapotranspiración y balance de agua del viñedo mediante teledetección en el acuífero Mancha Oriental Tesis de Doctorado). Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete. pp 223.
- Campos, I., González-Piqueras, J., Carrara, A., Villodre, J. and Calera, A. 2016. Estimation of total available water in the soil layer by integrating actual evapotranspiration data in a remote sensing-driven soil water balance. *Journal of Hydrology*. 534:427-439.
- Campos, I., Neale, C.M.U., Calera, A., Balbontin, C. and González-Piqueras, J., 2010c. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*. 98: 45-54.
- Casa, R., Rossi, M., Sappa, G. and Trotta, A. 2009. Assessing crop water demand by Remote Sensing and GIS for the Pontina Plain, Central Italy. *Water Resources Management*. 23:1685-1712.
- Castañeda-Ibáñez, C. R., Martínez-Menes, M., Pascual-Ramírez, F., Flores-Magdaleno, H., Fernández-Reynoso, D. S. y Esparza-Govea, S. 2015. Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego Río Yaqui, Sonora, México. *Agrociencia*. 49:221-232.
- Cesetti, A., Frontoni, E., Mancini, A., Ascani, A., Zingaretti, P. and Longhi. 2011. A visual Global Positioning System for Unmanned Aerial vehicle used in photogrammetric applications. *Journal Intell Robot System*. 61:157-168.

- Chen, Z., Li, S., Ren, J., Gong, P., Zhang, M., Wang, L., Xiao, S. and Jiang, D. 2008. Monitoring and mangement of agricultura with Remote Sensing. *Advances in Land Remote Sensing*. pp. 397-421.
- Choudhury, B. U., Sood, A., Ray, S. S., Sharma, P. K. and Panigrahy, S. 2013. Agricultural area diversification and crop water demand analysis: a Remote Sensing and GIS approach. *Jouernal Indian Society of Remote Sensing*. 41:71-82.
- Chung, D. M., Trong, B. D. and Lan Anh, V. T. 2003. Passive microwave remote sensing for estimation of rice water content in Vietnam. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2:905-907.
- Cisneros A., R., Charcas S., H., Rodríguez C., C., y Cárdenas T., A. (2014). Diagnóstico y análisis de la zona de riego Los Peroles del ejido San Francisco, Rioverde, San Luis Potosí. UASLP.
- Conrad, C., Dech, S. W., Hafeez, M., Lamers, J., Martius, C. and Strunz, G. 2007. Mapping and assessng water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS Remote Sensing products. *Irrigation Drainage System*. 21:197-218.
- Consoli, S. and Vanella, D. 2014. Mapping crop evapotranspiration by integrating vegetation indices into a soil water balance model. *Agricultural Water Management*. 143:71-81.
- Dandois, J. P. and Elis, E.C. 2013. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*. 136:259-276.
- De Paz, J. M., Visconti, F., Zapata, R. and Sánchez, J. 2004. Integration of two simple models in a geographical information system to evaluate salinization risk in irrigated land of the Valencian Community, Spain. *Soil Use and Management*. 20:333-342.
- Depeweg, H. and Urquieta, E. R. 2004. GIS tolos and the design of irrigation canals. *Irrigation and drainage*. 53:301-314.
- Dong, J., Nai-bin, W., Xiao-huan, Y. and Ji-hua, W. 2003. Study on the interaction between NDVI profile and the growing status of crops. *Chinese Geographical Science*. 13:62-65.
- Durga Rao, K. H. V., Krishna Kumar, C. S. and Hari Prasad, V. 2001. Irrigation water requerimients and supply analysis in Dehradun Region - an integrated Remote Sensing and GIS approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 29:59-67.

- El Hajj, M., Baghdadi, N., Cheviron, B., Belaud, G. and Zribi, M. 2016. Integration of remote sensing derived parameters in crops models: Application to the PILOTE model for hay production. *Agricultural Water Management*. 176:67-79.
- El Nahry, E., Ali, R. R. and Baroudy, A. A. 2011. An approach for precision farming under pivot irrigation system using Remote Sensing and GIS techniques. *Agrocultural Water Management*. 98:517-531.
- Elazab, A., Ordóñez, R. A., Savin, R. and Slafer, G. A. 2016. Detecting interactive effects of N fertilization and heat stress on maize productivity by Remote Sensing techniques. *European Journal of Agronomy*. 73:11-24.
- El-Shirbeny, M. A., Alsersy, M. A. M., Saleh, N. H. and Abu-Taleb, K. A. 2015. Changes in irrigation water consumption in the Nile Delta of Egypt assessed by Remote Sensing. *Arabian Journal of Geosciences*. 8:10509-10519.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Guemouria, N., Duchemin, B., Ezzahar, J. and Hadria, R. 2007. Combining FAO-56 model and ground-based Remote Sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management*. 87:41-54.
- Evsahíbioglu, A. N. and Özdíkílier, E. 2015. Integration of Remote Sensing technology to Geographic Information System for sustainable planning of water resources. *Agro-Geoinformatics*. 143-148.
- Falahah and Ayuningtias, D. K. 2014. Visualization of condition irrigation building and canal usin web GIS application. *International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering*. pp. 309-314.
- FAO. 1998. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agricultural Organisation of the United Nation, Rome.
- Farg, E., Arafat, S. M., El-Wahed, M. S. A. and EL-Gindy, A. M. 2012. Estimation of Evapotranspiration ET_c and crop coefficient K_c of wheat, in south Nile Delta of Egypt using integrated FAO-56 approach and Remote Sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 15:83-89.
- Freeman, P. K. and Freeland, R.S. 2015. Agricultural UAVs in the U.S: potential, policy, and hype. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2:35-43.
- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J. and Medrano, H. 2015. UAVs challenge to asses water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*. 153:9-19.

- Garatuza-Payan, J. and Watts, C. J. 2005. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*. 19:301-320.
- Garcia, L. A., Elhaddad, A., Altenhofen, J., & Hattendorf, M. 2013. Developing Corn Regional Crop Coefficients Using a Satellite-Based Energy Balance Model (ReSET-Raster) in the South Platte River Basin of Colorado. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 139:821-832.
- Glenn, E. P., Nagler, P. L. and Huete, A. R. 2010. Vegetation index methods for estimating evapotranspiration by Remote Sensing. *Surv Geophys*. 31:531-555.
- Glenn, E. P., Neale, C. M. U., Hunsaker, D. J. and Nagler, P. L. 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by Remote Sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrological Processes*. 25:3977-4158.
- Gómez-Candón, D., De Castro, A. I. and López-Granados, F. 2014. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*. 15:44-56.
- Gontia, N. K. and Tiwari, K. N. 2010. Estimation of crop coefficient and evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using Remote Sensing and GIS. *Water Resource Management*. 24:1399-1414.
- Gontia, N. K. and Tiwari, K. N. 2010. Estimation of crop coefficient and Evapotranspiration of wheat (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS. *Water Resource Management*. 24:1399-1414.
- Gontia, N. K. and Tiwari, K. N. 2011. Yield estimation model and water productivity of wheat crops (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using Remote Sensing and GIS. *Journal Indian Society of Remote Sensing*. 39:27-37.
- González-Dugo, M. P., Escuin, S., Cano, F., Cifuentes, V., Padilla, F. L. M., Tirado, J. L., Oyonarte, N., Fernández, P. and Mateos, L. 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agricultural Water Management*. 125:92-104.
- González-Piqueras, J., 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental, Universidad de Valencia
- Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A. and Tolk, J. A. 2008. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Sciences*. 26:223-237.

- Guermazi, E., Bouaziz, M. and Zairi, M. 2016. Water irrigation management using remote sensing techniques: a case study in Central Tunisia. *Environmental Earth Sciences*. 75:202.
- Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy
- Ha, W., Gowda, P. H. and Howell, T. A. 2013. A review of downscaling methods for Remote Sensing-based irrigation management: part I. *Irrigation Science*. 31:831-850.
- Halper, E. B., Scott, C. A. and Yool, S. R. 2012. Correlating vegetation, water use, and surface temperatura in a semiarid city: a multiscale analysis of the impacts of irrigation by single-family residences. *Geographical Analysis*. 44:235-257.
- Hass, E.M., Bartholomé, E. and Combal, B. 2009. Time series analysis of optical remote sensing data for the mapping of temporary surface water bodies in sub-Saharan western Africa. *Journal of Hydrology*. 370:52-63.
- Hassan-Esfahani, L., Torres-Rua, A. and McKee, M. 2015. Assessment of optimal irrigation water allocation for pressurized irrigation system using water balance approach, learning machines, and remotly sensed data. *Agiricultural Water Management*. 153:42-50.
- Heege, H. J. and Thiessen, E. 2013. Sensing of crop properties. Precision in crop farming: site specific concepts and sensing methods:applications and results. pp. 103-141.
- Henry, P. 1999. The VEGETATION system: a global monitoring system onboard SPOT4. In 13 ESA (ed.), Euro-Asia space week on cooperation in space, Vol. ESA-SP 430, pp. 233-14 239.
- Huesca, M., Litago, J., Palacios-Orueta, A., Montes, F., Sebastián-Lopez, A. and Escribano, P. 2009. Assessment of forest fire seasonality using MODIS fire potential: a time series approach. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149:1946-1955.
- Hernández-Tinajero, G. 2017, Evaluación y propuesta de mejora en la eficiencia del uso del agua en la zona de riego Los Peroles, Rioverde, S.L.P. (Tesis de Maestría). pp. 113.
- Hillel, D. and Vlek, P. 2005. The sustainability of irrigation. *Advances in Agronomy*. 87:55-84.
- Howell, T. A., Evett, S. R., Tolk, J. A., Copeland, K. S. and Marek, T. H. 2015. Evapotranspiration, water productivity and crop coefficients for irrigated sunflower in the U.S. Southern High Plains. *Agricultural Water Management*. 162:33-46.

- Hunsaker, D. J., Pinter Jr, P. J., Barnes, E. M. and Kimball, B. A. 2003. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. *Irrigation Science*. 22:95-104.
- Inman, D., Khosla, R., Reich, R. M. and Westfall, D. G. 2007. Active remote sensing and grain yield in irrigated maize. *Precision Agriculture*. 8:241-252.
- Jarlan, L., Mangiarotti, S., Mougin, E., Mazzega, P., Hiernaux, p. and Le Dantec, V. 2008. Assimilation of SPOT/VEGETATION NDVI data into a sahelian vegetation dynamics model. *Remote Sensing of Environment*. 112:1381-
- Kadam, S. A., Gorantiwar, S. D., Das, S. N. and Joshi, A. K. 2016. Crop evapotranspiration estimation for wheat (*Triticum aestivum* L.) using Remote Sensing data in semi-arid region of Maharashtra. *Journal Indian Society of Remote Sensing*. pp. 1-9.
- Kalma, J. D., McVicar, T. R. and McCabe, M. F. 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperatura data. *Surv Geophys*. 29:421-469.
- Kamble, B., Kilic, A. and Hubbard, K. 2013. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*. 5:1588-1602.
- Karlsen, S.R., Elvebakk, A., Høgda, K.A. and Grydeland, T. 2014. Spatial and temporal variability in the onset of the growing season on Svalbard, Artic Norway – Measured by MODIS-NDVI satellite data. *Remote Sensing*. 6:8088-8106
- Ke, Y., Im, J., Lee, J., Gong, H. and Ryu, Y. 2015. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparision with mutliple satellite sensors and in-situ observations. *Remote Sensing of Environment*. 164:298-313.
- Kharrou, M. H., Le Page, M., Chehbouni, A., Simonneaux, V., Er-Raki, S., Jarlan, L., Ouzine, L., Khabba, S. and Chehbouni, G. 2013. Assessment of equity and adequacy of water delivery in irrigation system using Remote Sensing-based indicators in semi-arid Region, Morocco. *Water Resource Management*. 27:4697-4714.
- Kim, D. and Kaluarachchi, J. 2015. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agricultural Water Management*. 149:143-155.
- Kumar, S., Dhaimodkar, S. B. and Pande, L. M. 2002. The assessment of potential land use in the proposed irrigation command using remote sensing and GIS. *Jouernal of the Indian Society of Remote Sensing*. 30:157-166.
- Kumbhar, V., Choudhury, S., Sen, A. and Singh, T. P. 2014. Assessment of irrigation and agricultura potential using geospatial techniques: a case study of “Bhima-Ukkani” project. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 157:277-284.

- Kyratzis, A., Skarlatos, D., Fotopoulos, V., Vamvakousis, V. and Katsiotis. 2015. Investigating correlation among NDVI index derived by unmanned aerial vehicle photography and grain yield under late drought stress conditions. *Procedia Environmental Sciences*. 29:225-226.
- Liang, X. and Wu, J. 2012. The application of GIS in the field of irrigation water management. *International Conference on Computer Science and Network Technology*. pp. 1497-1500.
- Lijuan, H., Pengxin, W., Hua, Y., Shaomin, L. and Jindi, W. 2006. Study on NDVI-Ts space by combining LAI and evapotranspiration. *Science in China: Series D Earth Sciences*. 49:747-754.
- Li-jun, Z., Xiao, W., Fang, L. and Ling, Y. 2013. Spatial exploration of multiple cropping efficiency in China based on time series remote sensing data and econometric model. *Journal of Integrative Agriculture*. 12:903-913.
- Liu, X., Wang, S., Huo, Z., Li, F. and Hao, X. 2015. Optimizing layout of pumping well in irrigation district for groundwater sustainable use in northwest China. *Hydrological Processes*. 29:4188-4198.
- Mahmoud, A., Shendi, M. M., Pradhan, B. and Attia, F. 2009. Utilization of remote sensing data and GIS tools for land use sustainability analysis: case study in El-Hammam area, Egypt. *Central European Journal of Geosciences*. 1:347-367.
- Maina, M. M., Amin, M. S. M. and Yazid, M. A. 2014. Web geographic information system decision support system for irrigation water management: a review. *Soil and Plant Science*. 64:283-293.
- Mas, J. F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*.
- Melton, F. S., Johnson, L. F., Lund, C. P., Pierce, L. L., Michaelis, A. R., Hiatt, S. H., Guzman, A., Adhikari, D. D., Purdy, A. J., Rosevelt, C., Votova, P., Trout, T. J., Temesgen, B., Frame, K., Sheffner, E. J. and Nemani, R. R. 2012. Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: a framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 5:1709-1720. México, ISBN, 978-607.
- Mkhabela, M. S., Bullock, P., Raj, S., Wang, S. and Yang, Y. 2011. Crop yield forecasting on the Canadian prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151:385-393.
- Molina, J.L., Rodriguez-Gonzalvez, P., Carmen Molina, M., Gonzalez-Aguilera, D., Espejo, F., 2014. Geomatic methods at the service of water resources modelling. *J. Hydrol.* 509, 150–162.

- More, R. S., Manjunath, K. R., Jain, N. K., Panigrahy, S. and Parihar, J. S. 2016. Derivation of rice crop calendar and evaluation of crop phenometrics and latitudinal relationship for major south and south-east Asian countries: a remote sensing approach. *Computers and Electronics in Agriculture*. 127:336-350.
- Neale, C. M. U., Jayanthi, H. and Wright, J. L. 2005. Irrigation water management using high resolution airborne remote sensing. *Irrigation and Drainage System*. 19:321-336.
- Neale, C.M.U., Bausch, W.C. and Heerman, D.F., 1989. Development of reflectancebased crop coefficients for corn. *Transactions of the ASAE*, 32: 1891-1899
- Ojeda-Bustamante, W., González-Camacho, J. M., Sifuentes-Ibarra, E., Isidro, E. and Rendón-Pimentel, L. 2007. Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agricultural Water Management*. 89:81-88.
- Ore, J. P., Elbaum, S., Burgin, A. and Detweiler, C. 2015. Autonomus aerial water sampling. *Journal of Field Robotics*. 32:1095-1113.
- Paço, T. A., Pôças, I., Cunha, M. Silvestre, J. C., Santos, F. L., Paredes, P. and Pereira, L. S. 2014. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *Journal of Hydrology*. 519:2067-2080.
- Peña-Arancibia, J. L., Mainuddin, M., Kirby, J. M., Chiew, F. H. S., McVicar, T. R. and Vaze, J. 2016. Assessing irrigated agriculture's surface water and groundwater consumption by combining satellite remote sensing and hydrologic modelling. *Science of the Total Environment*. 542:372-382.
- Peragón, J. M., Delgado, A. and Pérez-Latorre, F. J. 2015. A GIS-based quality assessment model for olive tree irrigation water in southern Spain. *Agricultural Water Management*. 148:232-240.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M. and Raes, D. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. *Agricultural Water Management*. 147:4-20.
- Pimpale, A. R., Rajankar, P. B., Wadatkar, S. B., Wanjari, S. S. and Ramteke, I. K. 2015. Estimation of water requirement of wheat using multispectral vegetation indices. *Journal of Agrometeorology*. 17:208-212.
- Pineda-Morín, J. 2013. Estimación de la eficiencia de aplicación del riego mediante imágenes satelitales, primera unidad, distrito de riego 026 bajo Río San Juan, Tamaulipas, México (Tesis de Maestría). Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México. pp. 76.

- Plaza Jiménez, C. 2017. Predicción de las necesidades netas de agua de los cultivos trigo, maíz, ajo, cebolla y adormidera con una semana de antelación a lo largo de todo el ciclo de cultivo mediante herramientas de teledetección en la provincia de Albacete (Tesis de Maestría). Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete. pp 133.
- Ponvert-Delisle, D. y Lau-Quan, A. 2013. Uso de las imágenes de satélites y los SIG en el campo de la Ingeniería Agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 22:75-80.
- Priyadharshini, S. and Canessane, R. A. 2015. Evaluation of evapotranspiration for agricultural crops. *International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*. pp. 1-5.
- Raut, S., Sarma, K. S. S. and Das, D. K. 2009. Studies on irrigation distribution equity and crop growth performance in a canal command using remote sensing. *Journal Indian Society of Remote Sensing*. 38:55-65.
- Raut, S., Sarma, K. S. S. and Das, D. K. 2010. Study of irrigation and crop water requirements and growth of two Rabi crops grown in a semi arid region using Agrometeorology and Remote Sensing. *Journal Indian Society of Remote Sensing*. 38:321-331.
- Ribbes, F. and Le Toan, T. 1998. Mapping and monitoring rice crop with RADARSAT Data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*. 5:2749-2751.
- Roldán-Cañas, J., Pérez-Arellano, R., Díaz-Jiménez, M. y Moreno-Pérez, M. F. 2010. Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*. 42:107-124.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Goddard Space Flight Center, MD, 10–14 December, pp. 309-317, NASA SP-351 (Washington, DC: NASA Science and Technical Information Office)
- Rowshon, M. K and Amin, M. S. M. 2010. GIS-based irrigation water management for precision farming of rice. *Int J Agric and Biol Eng*. 3:27-35.
- Rzedowski, J. 1966. Vegetación del Estado de San Luis Potosí. *Acta Científica Potosina*. Instituto de Investigaciones de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. pp.291.
- Saadi, S., Simonneaux, V., Boulet, G., Raimbault, B., Mougnot, B., Fanise, P., Ayari, H. and Lili-Chabaane, Z. 2015. Monitoring irrigation consumption using high resolution NDVI image time series: calibration and validation in the Kairouan plain (Tunisia). *Remote Sensing*. 7:13005-13028.

- Samani, Z., Bawazir, A. S., Bleiweiss, M., Skaggs, R., Longworth, J., Tran, V. D. and Pinon, A. 2009. Using remote sensing to evaluate the spatial variability of evapotranspiration and crop coefficient in the lower Rio Grande Valley, New Mexico. *Irrigation Science*. 28:93-100.
- Seevers, P. M., Sadowski, F. C. and Lauer, D. T. 1990. As influenced by irrigation and evapotranspiration volumen estimation in western Nebraska. *Climatic Change*. 17:265-285.
- Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K. and Velpuri N. M. 2015. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*. xxx:xxx-xxx.
- Shuhua, Q., Changyao, W., Zheng, N. and Chunyan, Y. 2003. Retrieving the crop coefficient spatial distribution for cotton under different growth status with Landsat ETM+ image. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 4:2212-2214.
- Singh, A. K., Dubey, O. P. and Ghosh, S. K. 2016. Irrigation scheduling using intervention of Geomatics tools- a case study of Khedli minor. *Agricultural Water Management*. 177:454-470.
- Singh, R. K. and Irmak, A. 2009. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. pp. 597-607.
- Singh, R. K. and Irmak, A. 2009. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 135:597-608.
- Srdjevic, Z., Srdjevic, B., Blagojevic, B. and Bajcetic, R. 2010. Combining GIS and Analytic hierarchy process for evaluating land suitability for irrigation: a case study from Serbia. *International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering*. pp. 247-250.
- Tasumi, M. and Allen, R. G. 2007. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural Water Management*. 88:54-62.
- Thorp, K. R., Hunsaker, D. J., French, A. N., Bautista, E. and Bronson, K. F. 2015. Integration geospatial data and cropping system simulation within a geographic information system to analyze spatial seed cotton yield, water use, and irrigation requirements. *Precision Agriculture*. 16:532-557.
- Tian, H., Wen, J., Wang, C., Liu, R. and Lu, Deng-rong. 2012. Effect of pixel scale on evapotranspiration estimation by remote sensing over oasis areas in north-western China. *Environment Earth Sciences*. 67:2301-2313.
- Todorovic, M. and Steduto, P. 2003. A GIS for irrigation management. *Physics and Chemistry of the Earth*. 28:163-174.

- Triana, E. and Labadie, J. W. GIS-based decision support system for improved operations and efficiency conservation in large-scale irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138:857-867.
- Tromboni, F., Bortolini, L. and Martello, M. 2014. The use of water in the agricultural sector: a procedure for the assessment of large-scale irrigation efficiency with GIS. *Irrigation and Drainage*. 63:440-450.
- Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8:127-150.
- Usman, M., Liedl, R. and Shahid, M. A. 2014. Managing irrigation water by yield and water productivity assessment of a rice-wheat system using remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 140:04014022.
- Vanino, S., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S. F. and Pulighe, G. 2015. Earth observation for improving irrigation water management: a case-study from Aoulia Region in Italy. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 4:99-107.
- Vanino, S., Pulighe, G., Nino, P., De Michele, C., Bolognesi, S. F. and D'Urso, G. 2015. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of tendone vineyards using multi-sensor remote sensing data in a Mediterranean environment. *Remote Sensing*. 7:14708-14730.
- Vicente-Serrano, S. M., Lanjeri, S. and López-Moreno, J. I. 2007. Comparison of different procedures to map reference evapotranspiration using geographical information systems and regresión-based techniques. *International Journal of Climatology*. 27:1103-1118.
- Vuolo, F., D'Urso, G., De Michele, C., Bianche, B. and Cutting, M. 2015. Satellite-based irrigation advisory services: a common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agricultural Water Management*. 147:82-95.
- Vuolo, F., D'Urso, G., Richter, K., Prueger, J. and Kustas, W. 2008. Physically-based methods for the estimation of crop water requirements from E.O. Optical data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 4:IV-275.
- Wang, J., Sammis, T. W., Andales, A. A., Simmons, L. J., Gutschick, V. P. and Miller, D. R. 2007. Crop coefficients of open-canopy pecan orchards. *Agricultural Water Management*. 88:253-262.
- Wright, J.L., 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108: 57-74
- Wu, B., Gao, W., Wang, Q., Li, Z., Sun, X. and Du, J. 2010. Research on information management system of agricultural irrigation based on WebGIS. In *World Automation Congress*. pp. 39-43).

- Yang, Y., Shang, S. and Jiang, L. 2012. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 164:112-122.
- Zhang, H., Anderson, R. G. and Wang, D. 2015. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. *Field Crops Research*. 180:143-154.