



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y TURISMO**

TRABAJO FINAL INTEGRADO

**TECNICATURA EN CARTOGRAFIA,
TELEDETECCION Y SIG**

**Análisis funcional de cultivos en regiones
templadas mediante la estimación de
riesgo de stress hídrico y térmico a partir
de información multiespectral. Caso
arroyo Corto y arroyo Pescado.**

Joaquín Agüero

Director/a: Alejandra M. Gernaldi

BAHÍA BLANCA

AÑO 2018

A mi familia, amigos y a mi directora
la Dra. Alejandra Geraldi

Índice temático

1.	INTRODUCCION	1
1.1	Plan de Trabajo	3
2	MARCO CONCEPTUAL.....	4
2.1	Teledetección: características e importancia	4
2.2	Comportamiento espectral de la vegetación en el espectro óptico	4
2.3	Características de la radiación energética en el infrarrojo térmico	5
2.4	Cocientes e índices de vegetación	5
2.5	Métodos de Estimación	5
2.5.1	Métodos Teóricos	6
2.5.2	Métodos Semi-empíricos	6
2.5.3	Métodos Combinados	7
3	MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1	Conversión de niveles digitales a radiancia.....	10
3.2	Conversión a reflectancia	10
3.3	Conversión a temperatura de brillo	11
3.4	Conversión a temperatura de superficie	11
3.5	NDVI.....	12
3.6	NDWI	13
3.7	Índice de estrés vegetal o TVDI	13
4.	RESULTADOS	17
5.	CONCLUSIONES	30
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	31

Índice de figuras

Figura 1: Localización área de estudio	2
Figura 2: Esquemas de la distribución de los valores de NDVI y Temperatura de superficie para el cálculo del TVDI	14
Figura 3: Esquema para cálculo del TVDI.....	16
Figura 4: Temperatura de superficie de la subcuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 del sensor TIRS. A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera	18
Figura 5: Comparación de valores de la imagen y de la estación meteorológica.....	19
Figura 6: Calendario agrícola de la región pampeana	20
Figura 7: Índice de vegetación normalizado del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 del sensor OLI. A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera	21
Figura 8: Índice de diferencia normalizada de agua del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 del sensor TIRS. A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera	23
Figura 9: Gráficos de dispersión del límite seco para cada imagen A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera	24
Figura 10: Índice de estrés vegetal del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 de los sensores OLI y TIRS A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera	26
Figura 11: Datos meteorológicos de temperatura y precipitación por mes.....	27
Figura 12: Ubicación de las muestras de valores obtenidas de los distintitos índices calculados	28
Figura 13: Comparación de valores de la muestra 1 de la cuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado.....	29
Figura 14: Comparación de valores de la muestra 2 de la cuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado.....	29
Figura 15: Comparación de valores de distintos índices de la muestra 3 de la cuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado	30

Índice de tablas

Tabla I: Bandas espectrales del sensor OLI	8
Tabla II: Bandas espectrales del sensor TIRS	9
Tabla III: Comparación de valores de temperatura de la estación meteorológica y de la imagen	19
Tabla IV: Valores mínimos y máximos de la imagen del área de estudio	20
Tabla V: Valor del límite húmedo	24
Tabla VI: Ecuación del límite seco	25

RESUMEN

La teledetección y los SIG son tecnologías capaces de proporcionar las medidas necesarias para el cálculo global y económicamente factible del riesgo de estrés térmico e hídrico. La teledetección representa una útil herramienta para el cálculo del riesgo de estrés a zonas amplias, donde no se dispone siquiera de datos meteorológicos.

Los cultivos en las zonas templadas son afectados por los factores térmico e hídrico. A partir de la información multispectral que nos brinda el Landsat 8 nos permite analizar y comparar el funcionamiento biofísico de los cultivos de la región que posee limitaciones hídricas y térmicas.

El objetivo principal fue estimar las condiciones de estrés hídrico a partir de indicadores agroclimáticos. Esto fue determinado mediante la variación estacional del NDVI mediante el procesamiento digital y la conversión a temperatura de superficie a partir de información multispectral. Estos cálculos permiten calcular el TDVI (Temperature Dryness Vegetation Index) que es un índice de estrés hídrico que combina la temperatura de superficie e índice de vegetación. Los valores de temperatura de superficie obtenidos a partir de imágenes de satélite fueron validados con una estación meteorológica del área. El cálculo del índice fue realizado para el 15 de enero, 21 de abril, 26 de julio y 15 de noviembre del año 2014.

ABSTRACT

The remote sensing and the GIS are technology that are capable of providing the necessary measures for the global and economically feasible calculation of the risk of thermal and water stress. The remote sensing represents a useful tool for calculating the risk of stress to large areas, where meteorological data aren't available.

The crops in temperate zones are affected by thermal and water factors. Based on the multispectral information provided by the Landsat 8, it allows us to analyze and compare the biophysical behavior of the crops in the region that has water and thermal limitations.

The main objective was to estimate water stress conditions from agroclimatic indicators. This was determined by seasonal variation of NDVI through digital processing and conversion to surface temperature from multispectral information. These calculations allow us to calculate the TDVI (Temperature Dryness Vegetation Index), which is an index of water stress that combines the surface temperature and a vegetation index. The surface temperature values obtained from satellite images were validated with a weather station in the area. The calculation of the index was made for January 15, April 21, July 26 and November 15 from 2014.

1. INTRODUCCION

El clima juega un rol fundamental en el ámbito agrario dado que está relacionado con las lluvias, las cuales al llegar al suelo determinan la impregnación de los nutrientes diluidos en el agua por parte de las plantas, dando como consecuencia el buen desarrollo de la producción agrícola. La oferta de agua para los ecosistemas agrícolas, forestales e incluso acuáticos en la Argentina, muchas veces es incierta, de manera particular hacia el comienzo del ciclo anual de lluvias. El NDVI (Índice De Vegetación De La Diferencia Normalizada) (Rouse et al. 1974) es el índice de vegetación más utilizado en estudios con Teledetección. El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como, la evolución de su estado a lo largo del tiempo (Aguilar 2014). Donde las condiciones climáticas son estacionales, la evolución temporal del NDVI acompaña de manera estrecha la variación interanual del crecimiento de la vegetación en respuesta a los factores térmico e hídrico (Rivas, 2014).

La Región Pampeana Argentina manifiesta una tendencia a la expansión agrícola que aumenta los riesgos económicos por su elevada dependencia de las condiciones meteorológicas. A fin de mejorar las predicciones sobre el comportamiento de los cultivos, en este trabajo se estudia la sensibilidad de diferentes índices de estrés hídrico a la disponibilidad de agua en el suelo.

Gran parte del agua que llega a la tierra regresa a la atmósfera en forma de vapor directamente por evaporación o a través de las plantas por transpiración. Esta fracción de agua no aprovechable por el hombre es una variable importante dentro del ciclo hidrológico ya que, según las cuencas, puede alcanzar entre un 50% y un 90% de la precipitación (López, 2011).

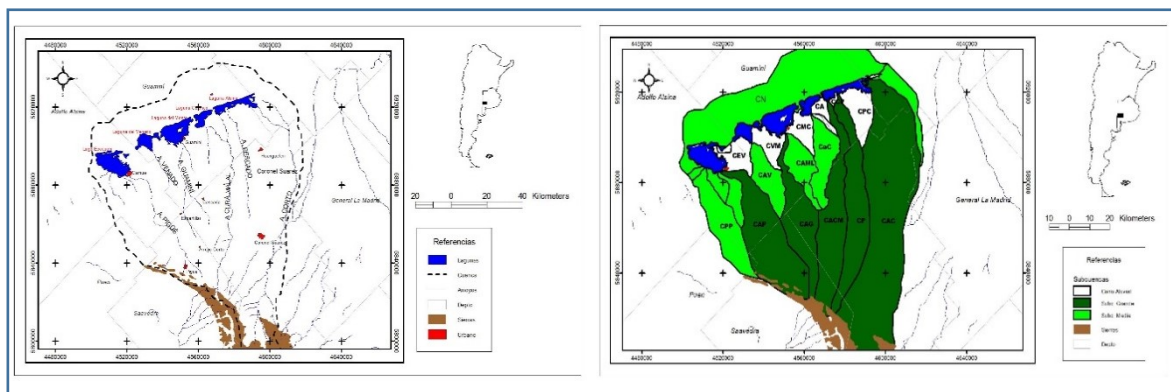
La Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son tecnologías capaces de proporcionar las medidas necesarias para el cálculo global y económicamente factible del riesgo de estrés térmico e hídrico. La teledetección representa una útil herramienta para detectar los cambios o anomalías regionales o también a nivel de parcelas. Así, estas herramientas permiten extender los modelos de cálculo del riesgo de estrés a zonas amplias, donde no se dispone siquiera de datos meteorológicos. La temperatura del aire y la precipitación son los parámetros meteorológicos más solicitados, dado que son variables básicas en multitud de estudios medioambientales.

Actualmente se cuenta con una gran cantidad de datos provenientes de diferentes sensores; unos de los más conocidos son OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor) que se encuentran en la misión del Landsat 8. Esta misión posee una base de datos histórica de datos térmicos, con resolución espacial media, de gran utilidad en distintos estudios medioambientales, como, por ejemplo, la gestión de los recursos hídricos mediante la estimación de flujos de energía. El estudio integrado de los intercambios de energía entre el suelo, la vegetación y los primeros estratos de la atmósfera, supone el punto de partida para un correcto balance hidrológico y de esto una adecuada planificación de los recursos hídricos.

Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca del arroyo Corto y Pescado. Esta área se localiza dentro del sudoeste bonaerense y abarca los partidos de Coronel Suarez, Saavedra, Tornquist, General Lamadrid, Daireaux y Guaminí. Los dos arroyos son subcuencas pertenecientes a la cuenca de las Encadenadas del Oeste (Geraldí, 2009). Son subcuencas fluvioacústres elongadas cuyos arroyos nacen en la zona de las Sierras de la Ventana y desembocan en la laguna Alsina. Ocupan una región en la que se presenta un relieve abrupto como las sierras (cuenca alta 1015 msnm.), en el sector medio los arroyos atraviesan la llanura donde la elevación media del área es 400 msnm, en la parte baja de la cuenca la altura media llega hasta los 110 msnm la cual es una zona deprimida representada por la laguna Alsina. Esta laguna es de tipo endorreica. Se caracteriza por ser una región muy productiva con distintos tipos de cultivo, trigo, maíz, sorgo entre otros. La variación de periodos secos y húmedos con temperaturas variables en esta zona determinan que los cultivos sufran de estrés térmico e hídrico llevando a la necesidad de riego o cambios en la siembra de cultivos por estrés.

Figura 1: Localización área de estudio



Fuente: Geraldí, 2009

1.1 Plan de Trabajo

Problema:

¿De qué manera las variaciones del crecimiento interanual de cultivos de zonas templadas son afectados por los factores térmico e hídrico?

Hipótesis:

La estimación de riesgo de estrés hidrotérmico con información multiespectral permite avanzar en el conocimiento del funcionamiento biofísico de los cultivos lo que resulta fundamental en ecosistemas con limitaciones hídricas y térmicas

Objetivo General

Estimar las condiciones de estrés hídrico a partir de indicadores agroclimáticos en la cuenca arroyo Corto y arroyo Pescado

Objetivos específicos

1. Establecer la variación estacional del NDVI mediante el procesamiento digital.
2. Determinar la temperatura superficie a partir de información multiespectral en las diferentes estaciones del año.
3. Identificar espacial y temporalmente la eficiencia en el uso de la precipitación y la respuesta de los distintos tipos de cultivos.
4. Validar los datos obtenidos de temperatura a partir de imágenes de satélite con las estaciones meteorológicas del área.
5. Determinar el comportamiento del TVDI sobre el estrés medioambiental que afecta a los ecosistemas agrícolas.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Teledetección: características e importancia

La teledetección es una técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. Entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética debido a la reflexión de la energía solar o de un haz emitido por el sensor (Chuvieco, Fundamentos de teledetección espacial, 1995).

Un sistema de teledetección espacial posee los siguientes elementos:

- a) Fuente de energía: supone al origen del flujo energético detectado por el sensor. Este puede ser externo (teledetección pasiva) o un haz energético emitido (teledetección activa).
- b) Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas que reciben el flujo energético y luego estas la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
- c) Sistema sensor, compuesto por el sensor y la plataforma que lo sustenta. Su principal función es captar la energía procedente de la cubierta terrestre.
- d) Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma

La importancia de la teledetección radica en que posee una cobertura global y periódica de la superficie terrestre, visión panorámica que permite capturar grandes espacios geográficos, homogeneidad en la toma de datos, información sobre regiones no visibles del espectro proporcionando información sobre el medio ambiente y el formato digital de las imágenes agiliza su tratamiento (Chuvieco, Fundamentos de teledetección espacial, 1995)

2.2 Comportamiento espectral de la vegetación en el espectro óptico

Se denomina dominio óptico del espectro al grupo de longitudes de onda dependientes de la energía solar (Perez Gutierrez, Carlos; Muñoz Nieto, Angel L., 2006). También se han incluido las correspondientes al infrarrojo medio dado que mantienen una importante relación con esta fuente de energía (Chuvieco, Fundamentos de teledetección espacial, 1995).

La vegetación en el espectro visible posee una baja reflectividad que se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofila y caroteno. Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los 0,445 μm , mientras que la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los 0,645 μm . Entre estas porciones del espectro alrededor de los 0,55 μm aparece un pico de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible. (Chuvieco, Teledetección ambiental, 2008)

La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano se debe a la baja reflectividad de las clorofilas y a la estructura celular interna de la hoja. Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en esta banda. (Chuvieco, Teledetección ambiental, 2008)

A partir de 1,4 μm el efecto absorbente del agua es muy claro por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el SWIR. En esta región del espectro se sitúan dos picos relativos de reflectividad en torno a 1,6 μm y 2,2 μm indicando el estado hídrico de la hoja. (Chuvieco, Teledetección ambiental, 2008)

2.3 Características de la radiación energética en el infrarrojo térmico

La parte del espectro correspondiente al infrarrojo térmico está situada entre 8 y 14 μm , de acuerdo a las leyes de Planck y Wien, en donde se manifiesta con mayor claridad la emitancia espectral de la superficie terrestre. En esta región del espectro es posible detectar el calor que procede de las distintas cubiertas (Chuvieco, Fundamentos de teledetección espacial, 1995)

2.4 Cocientes e índices de vegetación

Un cociente implica efectuar una división píxel a píxel entre los valores digitales almacenados en dos o más bandas de la misma imagen. Estos se utilizan principalmente para mejorar la discriminación entre dos cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto en esas bandas y para reducir el efecto del relieve en la caracterización espectral de distintas cubiertas. (Chuvieco, Teledetección ambiental, 2008)

Por otro lado, los cocientes de bandas son también utilizados para la discriminación de cubiertas del suelo, en virtud de los distintos comportamientos espectrales de aquellas. (Pinilla, 1995)

2.5 Métodos de Estimación

En la última década la disponibilidad de información procedente de sensores satelitales ha aumentado significativamente, lo cual determinó un avance considerable en el uso de estos para obtener información de los ecosistemas. Existen actualmente diferentes alternativas para el uso más eficiente de dicha información y lograr una descripción más precisa de los procesos biofísicos que ocurren en los ecosistemas.

El funcionamiento ecosistémico se refiere al intercambio de materia y energía entre la comunidad biótica y la atmósfera (Virginia y Wall 2001: en Paruelo, 2008). Su caracterización involucra entonces la medición de flujos (Paruelo J. , 2008). Estos incluyen, entre otros, la evapotranspiración. Este proceso puede ser estimado a partir de los índices espectrales o de variables. Debido a la gran dificultad que existe en la medición directa de la evapotranspiración los científicos han desarrollado modelos para su estimación con datos medidos en campo.

Sin embargo, ningún sistema satelital mide flujos directamente desde el espacio. Diferentes autores realizaron aproximaciones mediante modelos con datos satelitales (Li, 2004) (Allen, R. G., L. S. Pereira, T. A. Howell, y M. E. Jensen, 2011), entre otros. Los modelos pueden ser clasificados en función de parámetros que se pueden obtener con imágenes satelitales como, temperatura de superficie, índices de vegetación o combinación de temperatura de superficie e índices de vegetación.

2.5.1 Métodos Teóricos

Los modelos teóricos pretenden establecer relaciones de validez general, lo más independiente posible a unas determinadas condiciones de observación (Chuvieco, Teledetección ambiental, 2008). Estos se fundamentan en los principios de conservación de la materia y la energía (López, 2011). En el caso particular de cálculo de evapotranspiración en este tipo de modelos la información satelital es ingresada directamente, por diferencia de la temperatura superficial del suelo y la temperatura del aire. La base de este modelo es el balance de energía. Se utiliza la información satelital para la obtención de la temperatura superficial y la información de estaciones meteorológicas para estimar la radiación neta y la temperatura del aire.

2.5.2 Métodos Semi-empíricos

Los métodos semi-empíricos en donde se asume un previo modelado de la variable a estimar, aunque el ajuste se realice por ecuaciones empíricas. Los métodos empíricos son los más sencillos de utilizar, pero a su vez los menos precisos y solo pueden aplicarse en la zona en que fueron generados (Paruelo J. , 2008).

Este método combina relaciones empíricas como modelos físicos para el cálculo de los diferentes parámetros (Paruelo J. , 2008).

2.5.3 Métodos Combinados

Involucran elementos de los métodos de balance energético y transferencia de masa (López, 2011). Describen el intercambio entre el suelo, la planta y la atmósfera mediante el modelado de procesos físicos que ocurren en cada paso a alta resolución espacial. La información espacial se utiliza como variables de entrada del modelo. Los modelos más difundidos con esta metodología son los Soil Vegetation Atmosphere Transfer Model (SVAT). La información satelital que se utilizan son el Índice de área foliar, el albedo, y la emisividad (Paruelo J. M., 2008).

En el presente trabajo se utiliza el método semiempírico, llegando al cálculo de TVDI. Este método se basa en parametrizar empíricamente la relación entre la temperatura superficial y los valores de NDVI.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

La misión Landsat 8 fue lanzada al espacio el 11 de febrero de 2013, la administración del satélite es conjunta entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y USGS (United States Geological Survey). El objetivo de la misión es proveer a tiempo imágenes de alta calidad del espectro visible e infrarrojo cercano de las zonas terrestres y cercanas a la costa del planeta Tierra. El satélite tiene un periodo de revisita de 16 días y una órbita heliosincrónica a 705 kilómetros de altura. (Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2016)

El satélite Landsat 8 está compuesto por dos sensores:

- OLI (Operational Land Imager): recoge datos de imagen para nueve bandas espectrales de onda corta (Tabla 1) con un “swath” de 190 kilómetros, con una resolución espacial de 30 metros para todas las bandas menos la banda pancromática que posee 15 metros. Además, agrega en comparación al ETM+ dos bandas; la banda 1 principalmente utilizada para el estudio del océano y zonas aledañas al mismo y la banda 9 para la detección de nubes cirrus.
- TIRS (Thermal Infrared Sensor): colecta datos de imagen para dos bandas termales con una resolución espacial de 100 metros (Tabla II) con un “swath” de 190 kilómetros. Las dos bandas infrarrojas térmicas representan un gran avance sobre los datos térmicos de una banda única como es en el caso del ETM+ y TM.

Tabla I: **Bandas espectrales del sensor OLI**

Bandas OLI	Longitud de onda	Resolución espacial
Banda 1 Costero/Aerosol	0.435 – 0.451 μm	30 metros
Banda 2 Azul	0.452 – 0.512 μm	30 metros
Banda 3 Verde	0.533 – 0.590 μm	30 metros
Banda 4 Rojo	0.636 – 0.673 μm	30 metros
Banda 5 Infrarrojo cercano	0.851 – 0879 μm	30 metros
Banda 6 Infrarrojo de onda corta – 1	1.566 – 1.651 μm	30 metros
Banda 7 Infrarrojo de onda corta – 2	2.107 – 2.294 μm	30 metros
Banda 8 Pancromática	0.503 – 0.676 μm	15 metros
Banda 9 Cirrus	1.363 – 1.384 μm	30 metros

Fuente: (Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2016)

Tabla II: **Bandas espectrales del sensor TIRS**

Bandas TIRS	Longitud de onda	Resolución espacial
Banda 11 TIR-1	10.60 – 11.19 μm	100 metros
Banda 12 TIR-2	11.50 – 12.51 μm	100 metros

Fuente: (Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2016)

Para el presente estudio se trabajaron imágenes de la misión Landsat 8 descargadas de la página “Earth Explorer” del USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Se utilizaron cuatro imágenes Landsat 8 del área de estudio (Path:227 y Row: 86) una para cada estación del año 2014. En la búsqueda de las imágenes se seleccionaron las que tengan una cobertura de nubes menor al 10%, debido a que si se encuentra presente una gran cantidad de nubes se pierde información de la superficie que se encuentra debajo de estas. Las fechas de las imágenes son del 15 de enero, 21 de abril, 26 de julio y 15 de noviembre, pertenecientes al 2014

Una vez descargadas se descomprimió el archivo que las contenía y se hizo un “layer stacking” de las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Se corrigieron a reflectividad TOA y luego a reflectividad superficie las bandas 2, 3, 4, 5. Luego se hizo el recorte del área de estudio para realizar un análisis más profundo de las imágenes. El mismo se realizó utilizando datos vectoriales de la subcuenca arroyo Corto y arroyo Pescado. Se calculó la temperatura de brillo y luego la temperatura de superficie con la banda 10.

Se realizó el cálculo de TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index). Este índice combina la temperatura de superficie con el NDVI. De esta manera, se determina el estado de la humedad del suelo (Rivas, 2014).

Como se expresó anteriormente las bandas de cada fecha se encuentran en niveles digitales (DN) con una resolución radiométrica de 16 bits. Estos valores se pueden convertir a valores de radiancia y a reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA) con factores de escalas provenientes del metadato.

3.1 Conversión de niveles digitales a radiancia

Los valores digitales están en 16 bits y pueden ser convertidos a radiancia espectral usando los factores de escala de radiancia provenientes del metadato.

Ecuación 1

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L$$

Donde:

- L_{λ} : radiancia espectral
- M_L : factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato
- A_L : factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato
- Q_{cal} : valor del pixel en valores digitales (DN)

3.2 Conversión a reflectancia

Los datos del sensor OLI pueden ser convertidos a valores de reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) utilizando los coeficientes de reflectancia provenientes del metadato.

La siguiente ecuación es utilizada para convertir los valores digitales a TOA reflectancia:

Ecuación 2

$$\rho_{\lambda'} = M_p * Q_{cal} + A_p$$

Donde:

- $\rho_{\lambda'}$: valor de reflectancia TOA planetaria, sin corrección por ángulo solar
- M_p : factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato
- A_p : factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato
- Q_{cal} : valor del pixel en valores digitales (DN)

La reflectancia TOA con la corrección por el ángulo de elevación solar es:

Ecuación 3

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda'}}{\sin(\theta)}$$

Donde:

- ρ_{λ} : valor reflectancia TOA con corrección ángulo solar
- θ : ángulo de elevación solar obtenido del metadato

3.3 Conversión a temperatura de brillo

La información obtenida por el sensor TIRS puede ser convertida de radiancia espectral a temperatura de brillo en grados Kelvin (°K). La fórmula de conversión es:

Ecuación 4

$$T_L = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)}$$

Donde:

- T_L : temperatura de brillo en grados Kelvin
- L_λ : radiancia espectral TOA
- $K1$: constante térmica de conversión específica por banda obtenida del metadato
- $K2$: constante térmica de conversión específica por banda obtenida del metadato

3.4 Conversión a temperatura de superficie

La Ecuación 5 propuesta por (Weng, Lu, & Schubring, 2004) para convertir la temperatura de brillo a temperatura de superficie.

Ecuación 5

$$T_S = \frac{T_L}{1} + \left(\lambda \cdot \frac{T_L}{\rho}\right) * \ln \varepsilon$$

Donde:

- T_S : temperatura de superficie corregida con la emisividad
- T_L : temperatura de brillo del satélite
- λ : longitud de onda media de la banda termal considerada
- $\rho = h * c / \sigma$ ($1,438 * 10^{-2}$ mK) donde:

h : constante de Planck ($6,626 * 10^{-34}$ Js)

c : velocidad de la luz ($2,998 * 10^8$ m/s)

σ : constante de Boltzman ($1,38 * 10^{-23}$ J/K)

- ε : emisividad de la superficie

Para el cálculo de la emisividad de la superficie se utilizó la ecuación 6 propuesta por (Li, 2004)

Ecuación 6

$$\varepsilon = P_V \varepsilon_V + (1 - P_V) \varepsilon_S$$

Donde:

- ε_V y ε_S : emisividades de las cubiertas de vegetación y de suelo, de acuerdo a (Rodríguez, 2010) asumió que los valores fueron de 0,985 y 0,978
- P_V : proporción de vegetación que es obtenida a través de la Ecuación 7.

Para el cálculo de la proporción de vegetación propuesta por (Carlson, 1997)

Ecuación 7

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right)^2$$

Donde:

- NDVI: índice normalizado de vegetación del área
- $NDVI_{MIN}$: valor mínimo que se encuentra en el área de estudio
- $NDVI_{MAX}$: valor máximo que se encuentra en el área de estudio

3.5 NDVI

El índice de vegetación normalizada es uno de los más utilizados para determinar el estado de la vegetación. En este índice se utilizan las bandas correspondientes al rojo y al infrarrojo cercano, en el caso de Landsat 8 las bandas 4 y 5 respectivamente. A continuación, se especifica la fórmula con las bandas que posee Landsat 8:

Ecuación 8

$$NDVI = \frac{BANDA\ 5 - BANDA\ 4}{BANDA\ 5 + BANDA\ 4}$$

Los valores que arroja este cociente son entre -1 y 1. Los resultados expresan que valores mayores a 0.1 indican presencia de vegetación y cuanto mayor sea el valor existirá vegetación más vigorosa.

3.6 NDWI

El índice de diferencia normalizada de agua permite estimar el contenido de agua en la vegetación (Chen, 2006). Este índice emplea las bandas 5 y 6 del Landsat 8 y al igual que el NDVI el índice varía entre -1 a 1, los valores mayores indican alto contenido de agua en la vegetación.

Ecuación 9

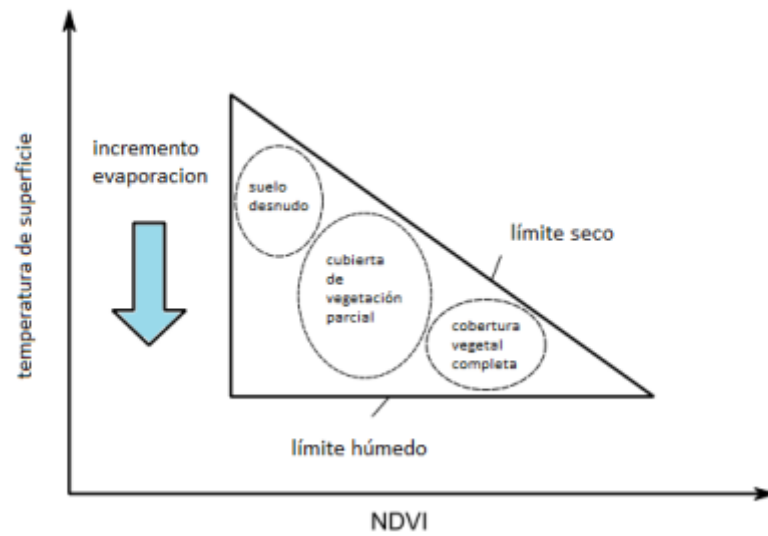
$$NDWI = \frac{BANDA\ 5 - BANDA\ 6}{BANDA\ 5 + BANDA\ 6}$$

3.7 Índice de estrés vegetal o TVDI

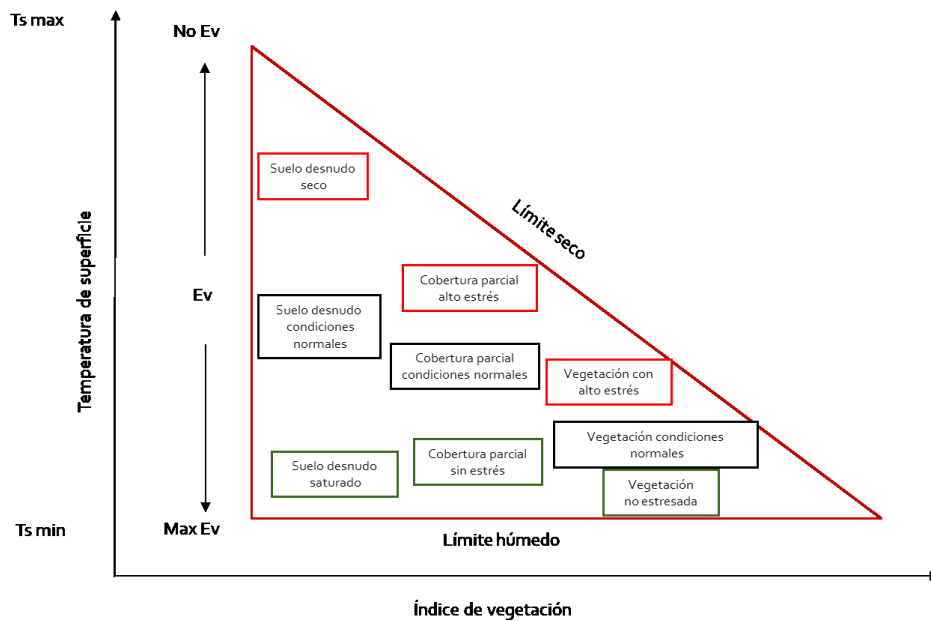
El TVDI fue desarrollado para establecer el estado de la humedad (sequedad) del sistema suelo planta (Fig. 3). El índice toma valores entre 0 y 1, donde 0 indica máxima humedad y 1 alude a máxima sequedad. En la cartografía se representan sólo las categorías de TVDI superiores a 0,4. Dentro de este intervalo se señalan los píxeles con déficit leve (TVDI entre 0,4 y 0,6), déficit moderado (TVDI ente 0,6 y 0,8) y déficit alto (TVDI entre 0,8 y 1) (Rivas, 2014).

El índice no permite distinguir entre diferentes coberturas vegetales (cultivos, pasturas, monte, etc.) sino que representa el estado de déficit hídrico de la cobertura vegetal existente. (Rivas, 2016).

Figura 2: Esquemas de la distribución de los valores de NDVI y Temperatura de superficie para el cálculo del TVDI



Fuente: Esquema de la distribución de los valores de NDVI y Temperatura de superficie para la obtención de la fórmula de TVDI basado en Moran *et al.*, 1994: en (Iglesias, 2016)



Fuente: Esquema simplificado de la relación entre T_s e índice de vegetación (adaptado de Sandholt et al. 2002)) en (Holzman, 2012)

Para calcular el índice se utiliza la relación entre la temperatura superficial y el NDVI, se realizó un gráfico de dispersión de la imagen que contenga a los dos y se procede a identificar el límite húmedo y seco. Para el límite húmedo se utilizó el valor de la temperatura mínima de superficie que se registró en el área de estudio. Para el cálculo de la ecuación del límite seco se determinó un área donde se encontraron los valores de NDVI cercanos a 0,8 y los valores de temperatura superficial correspondientes a los percentiles mayores de 0,90. Luego se realizó el gráfico de dispersión de esa zona de la imagen y se estableció la respectiva ecuación del límite seco. A continuación, se detalla la fórmula del índice:

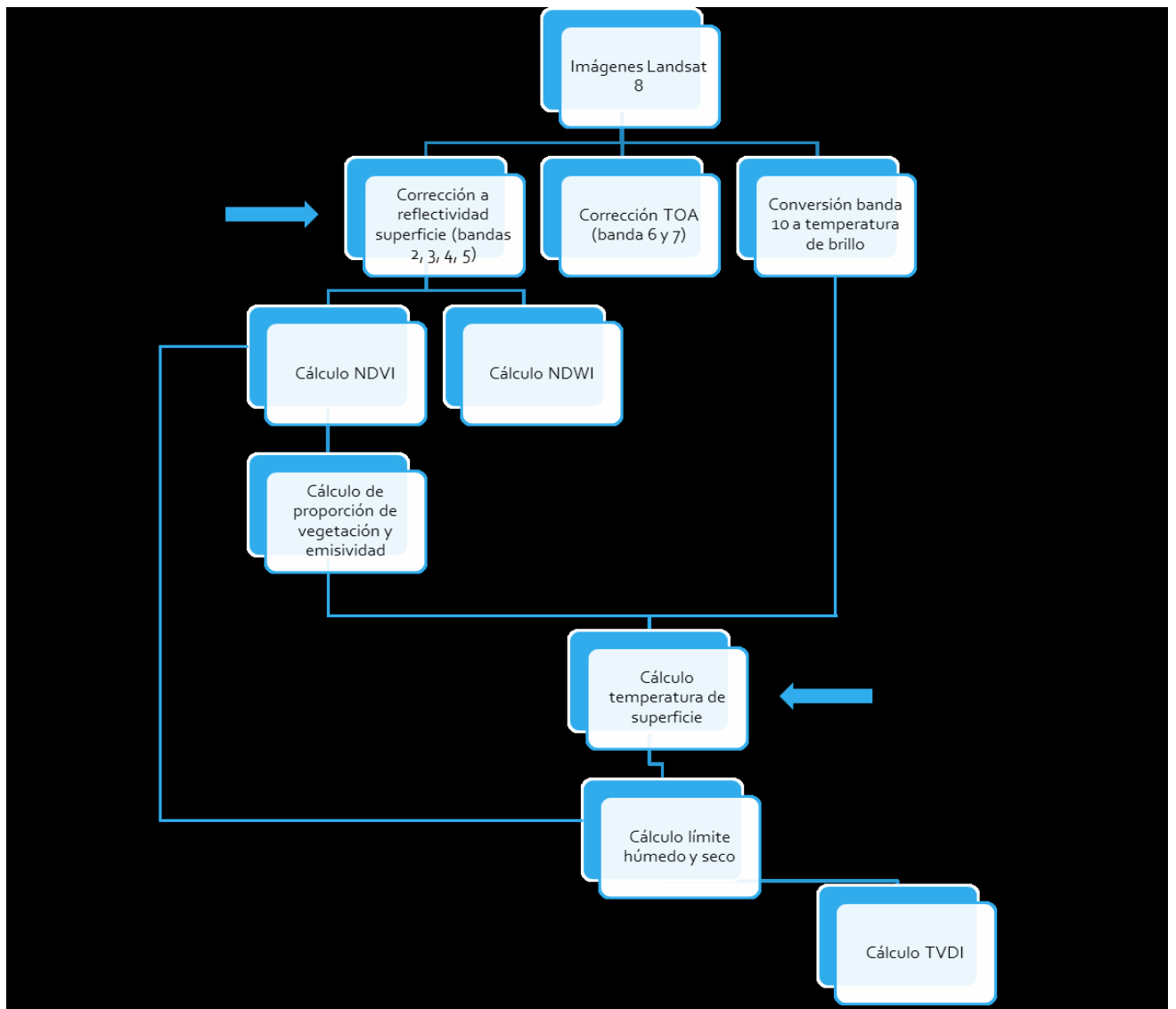
Ecuación 10

$$TVDI = \frac{Ts - Ts\ min}{Tsm\max - Tsm\min}$$

Donde T_s es la temperatura superficial del pixel en °K, T_{smin} es el valor mínimo de temperatura superficial en el área de estudio y $T_{smax}=a*NDVI+b$ (siendo a =pendiente y b =ordenada al origen).

Se realizó la validación de los datos de temperatura superficial obtenidas con las imágenes. Para ello se adquirieron datos del Servicio Meteorológico Nacional de la estación que se encuentra en el aeródromo de Coronel Suárez, con los cuales se realizó la comparación entre los datos medidos y calculados.

Figura 3: Esquema para cálculo del TVDI



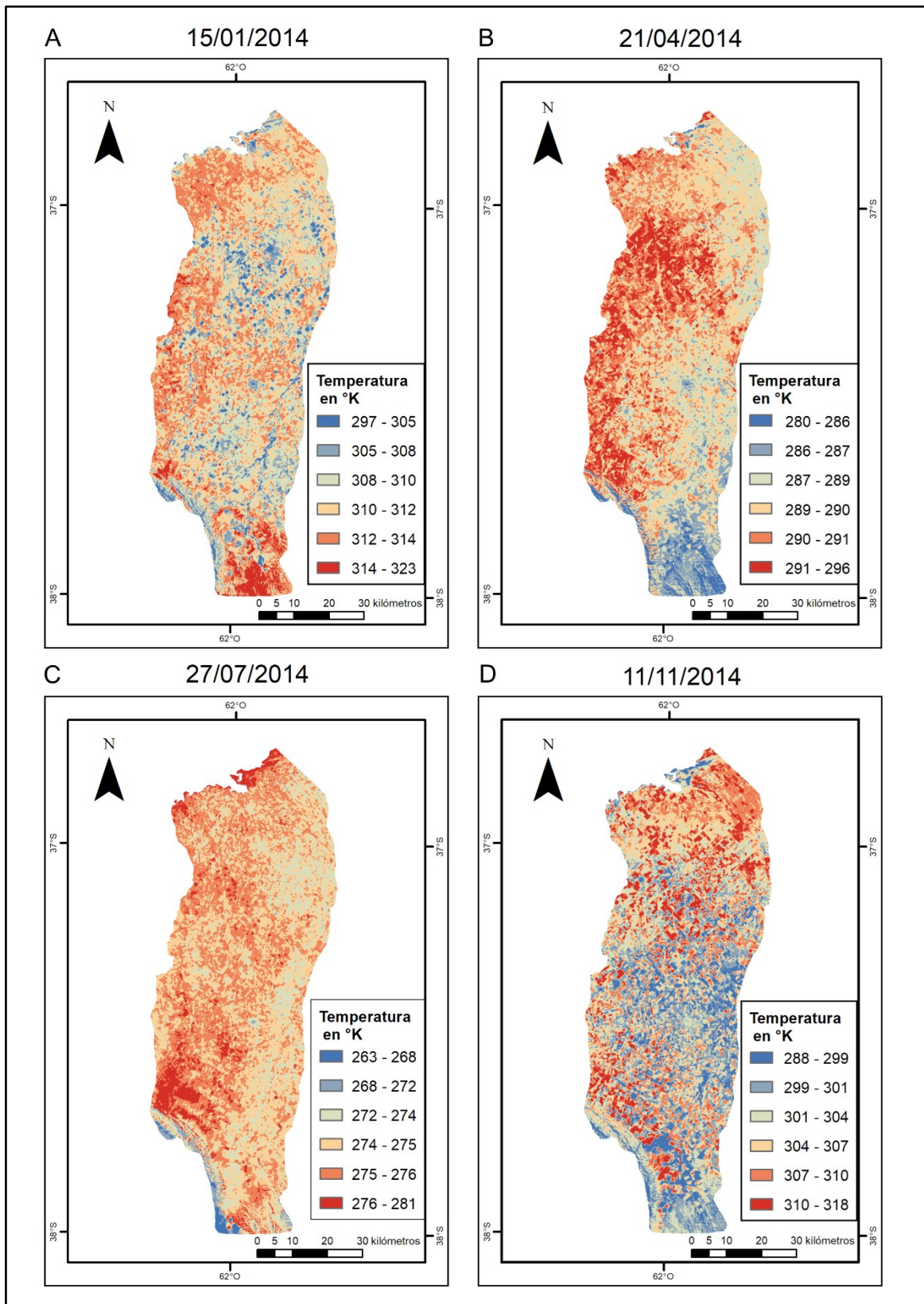
Fuente: Elaboración propia

4. RESULTADOS

Las imágenes provenientes del sensor TIRS de la misión Landsat 8 fueron convertidas a temperatura superficial utilizando la Ecuación 5 detallada anteriormente. Como es de esperar los registros más altos de temperatura se observan en la figura 4 A. La temperatura máxima en esta imagen alcanza los 323 °K en la zona sur de la cuenca donde se localizan las sierras. En el año 2014, en ese sector, se registró un incendio forestal muy grande que afectó una buena parte de la reserva provincial Ernesto Tornquist.

En las distintas imágenes (Fig. 4) se observa que en las zonas de suelo descubierto se registra una mayor temperatura que donde existe la vegetación, este fenómeno es claro y observable es en la Figura 4-D. En esta última, se observa que las temperaturas más bajas se localizan el sector sur y en la cuenca media.

Figura 4: Temperatura de superficie de la subcuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 del sensor TIRS. A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera



Fuente: Elaboración propia

En relación a la validación de los datos de temperatura obtenidos con las imágenes, en la Tabla III se presentan los valores de temperatura que se obtuvieron de la estación meteorológica y los valores de la imagen para cada fecha. En la misma se observa que el valor de la estación meteorológica se encuentra en el rango registrado por la misma a excepción del 11 de noviembre que supera la máxima registrada.

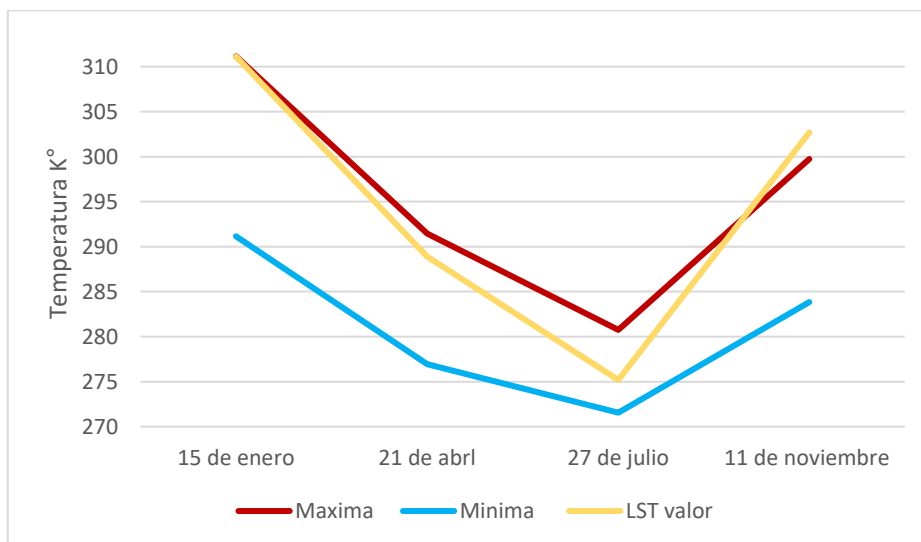
Tabla III: Comparación de valores de temperatura de la estación meteorológica y de la imagen

	Máxima (en °K)	Mínima (en °K)	LST imagen (en °K)
15 de Enero	311,15	291,15	311,118011
21 de Abril	291,45	276,95	288,874939
27 de Julio	280,75	271,55	275,184418
11 de Noviembre	299,75	283,85	302,693726

Fuente: Datos meteorológicos de la estación de Coronel Suárez (SMN)

En la figura 5 se presentan las curvas de temperaturas máximas y mínimas medidas por la estación meteorológica de Coronel Suárez y las medidas con las imágenes. En la misma se observa que los datos calculados a partir de las imágenes de satélite coinciden con los valores de la estación meteorológica y solo se presenta una sobreestimación en el verano (diciembre/enero).

Figura 5: Comparación de valores de la imagen y de la estación meteorológica



Fuente: Datos meteorológicos de la estación de Coronel Suárez provistos por el Servicio Meteorológico Nacional y valores obtenidos del cálculo de la imagen

Tabla IV: Valores mínimos y máximos de la imagen del área de estudio

°K	Mínima	Máxima
Verano	297	323
Otoño	280	296
Invierno	263	281
Primavera	288	318

Fuente: Valores obtenidos de las imágenes analizadas

Los índices de vegetación representan mediciones empíricas de la vigorosidad de la vegetación, son adimensionales. Se construyen a partir del comportamiento espectral de la vegetación en el espectro electromagnético. El mismo estima el vigor de la vegetación y el grado de cobertura.

En la figura 6 se presenta el calendario agrícola de la región pampeana con los principales cultivos. Cabe destacar que en el área de estudio los cultivos predominantes son el trigo el maíz y hacia el este de la cuenca soja.

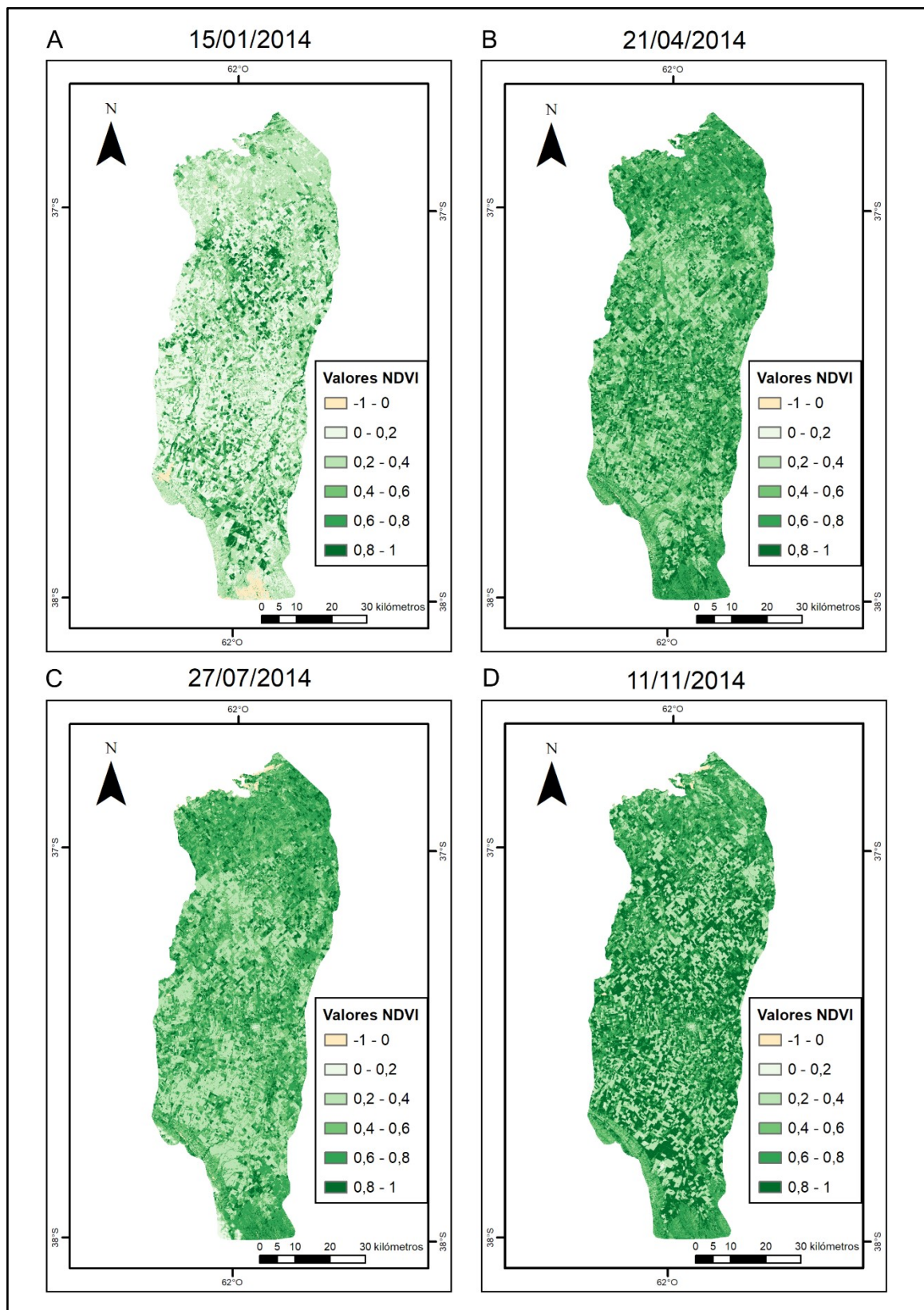
En el NDVI realizado (Fig. 7) se observa el ciclo fenológico de los cultivos de la región pampeana. En este sentido se observa en la imagen del 15/01/14 que los valores son bajos, entre 0.2 y 0.4, y corresponderían a zonas donde se cosechó el trigo (Fig. 7). Los valores más altos corresponden en general, a zonas con pasturas. En la imagen correspondiente al 11/11/2014 se observan altos valores de NDVI, en algunos casos superan los 0.6, que coinciden con la vigorosidad del trigo sobre todo en el sector sur de la cuenca y el desarrollo del maíz y la soja.

Figura 6: Calendario agrícola de la región pampeana

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY
TRIGO		S				F			C					
CEREALES		S				F			C					
MAIZ						S				F		C		
SOJA 1°							S			F			C	
SOJA 2°									S		F			C
GIRASOL						S				F		C		

Fuente: Según UNLU, Proditel, 2004 en (Geraldí, 2009). S: siembra, F: floración y C: cosecha.

Figura 7: Índice de vegetación normalizado del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 del sensor OLI. A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera



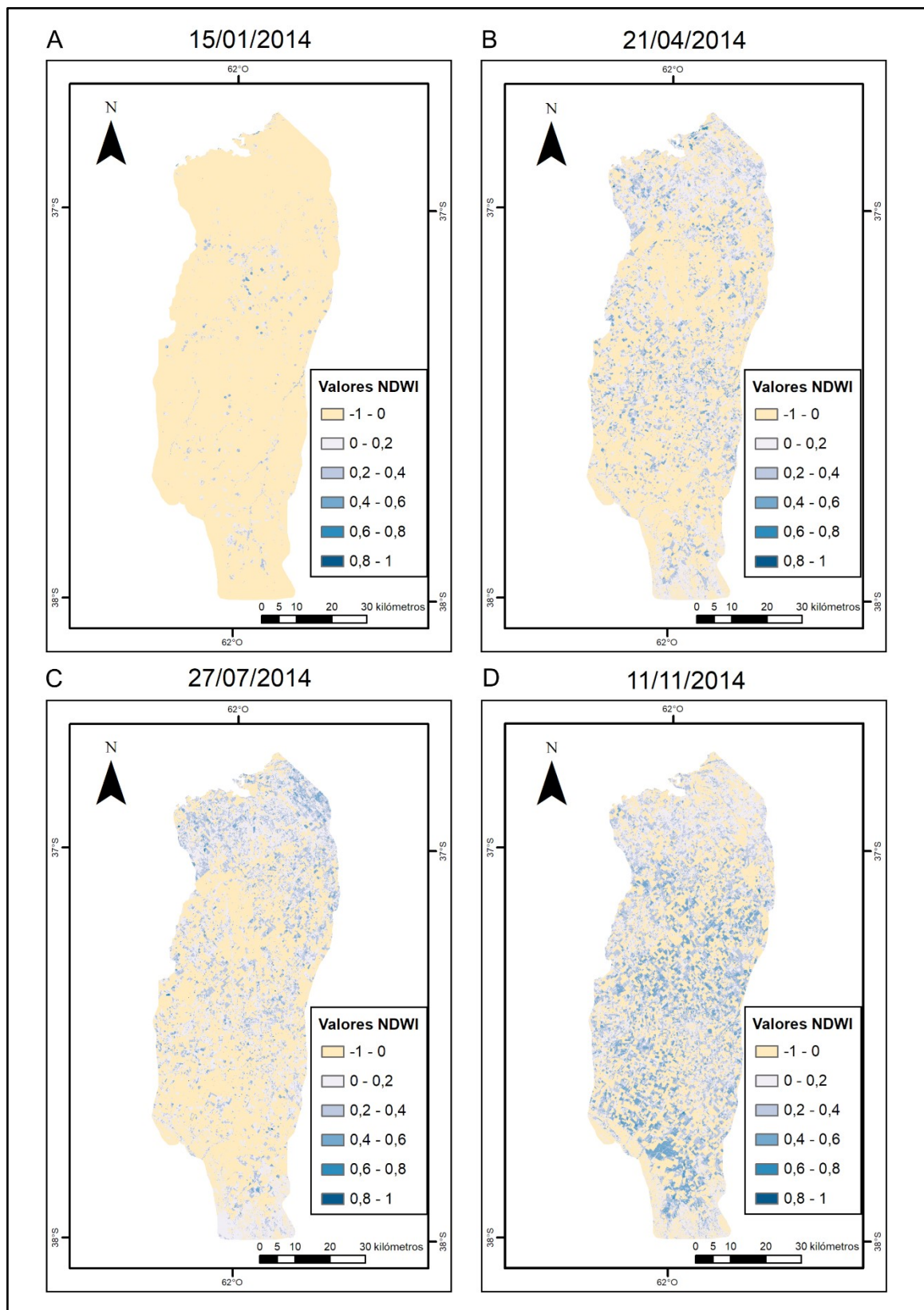
Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 se presentan el índice de diferencia normalizada de agua para el área de estudio. Se observa un alto contenido de humedad en las figuras en abril y noviembre. Además, se observa su evolución a lo largo del año exponiendo variaciones en la cantidad de agua que contiene los distintos cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo.

Como es de esperarse durante el verano los valores de humedad del suelo fueron muy bajos (0). Este comportamiento se debe a las altas temperaturas, los suelos descubiertos de vegetación y la alta evaporación.

En la figura 8-C al noreste de la misma se observa un alto contenido de humedad en el suelo esto se debería a que son zonas bajas inundadas donde se desarrolla la vegetación hidrófila entre ellos juncales, caña (familia Poaceae), scirpus, etc. Los pivots de riego se pueden identificar si están siendo utilizados o no.

Figura 8: Índice de diferencia normalizada de agua del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 del sensor TIRS. A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera



Fuente: Elaboración propia

Limite seco y húmedo

La variable T_s min o límite húmedo de la Ecuación 10 perteneciente al TVDI fue estimada a partir de los valores mínimos registrados en cada una de las imágenes analizadas. En la Tabla V se observa los valores de T_s min observados para cada imagen. Como es de esperar la imagen de enero fue la que presentó los valores más altos de temperatura. El valor mínimo de temperatura para la imagen de verano quedó definido en 297.53 °K (24.38 °C) lo cual definió el límite húmedo para dicha imagen. En el invierno la temperatura mínima fue 263.63 °K (-9.52 °C) quedando definida así el límite húmedo para dicha estación del año. Para las estaciones intermedias se establecieron los límites de 280 °K (7 °C) y 288 °K (15.21 °C).

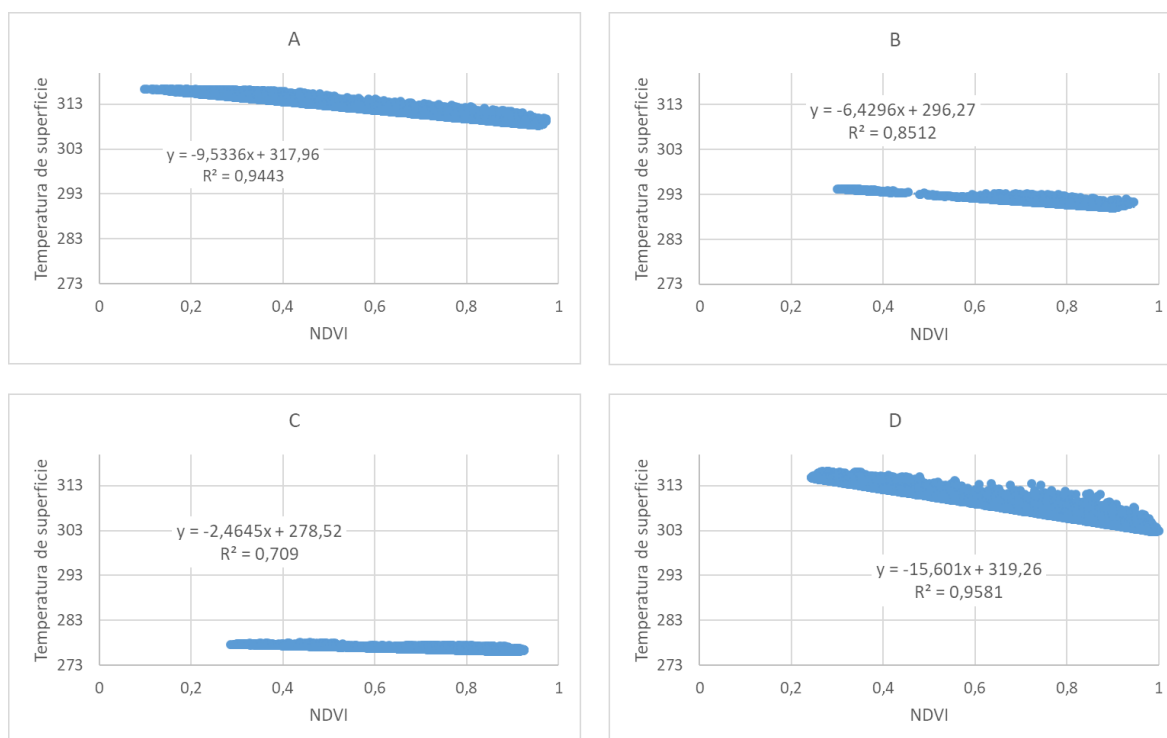
Tabla V: Valor del límite húmedo

Fecha	Valor del límite húmedo en °K
2014-01-15	297,530853
2014-04-21	280,158539
2014-07-27	263,634979
2014-11-15	288,365601

Fuente: Valores obtenidos a partir de las imágenes analizadas

En la figura 9 se presentan los gráficos de dispersión realizados para estimar la ecuación del límite seco.

Figura 9: Gráficos de dispersión del límite seco para cada imagen A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera



Fuente: Valores extraídos de las imágenes

Luego de obtener el cálculo del límite húmedo se procedió a calcular la ecuación del límite seco y se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

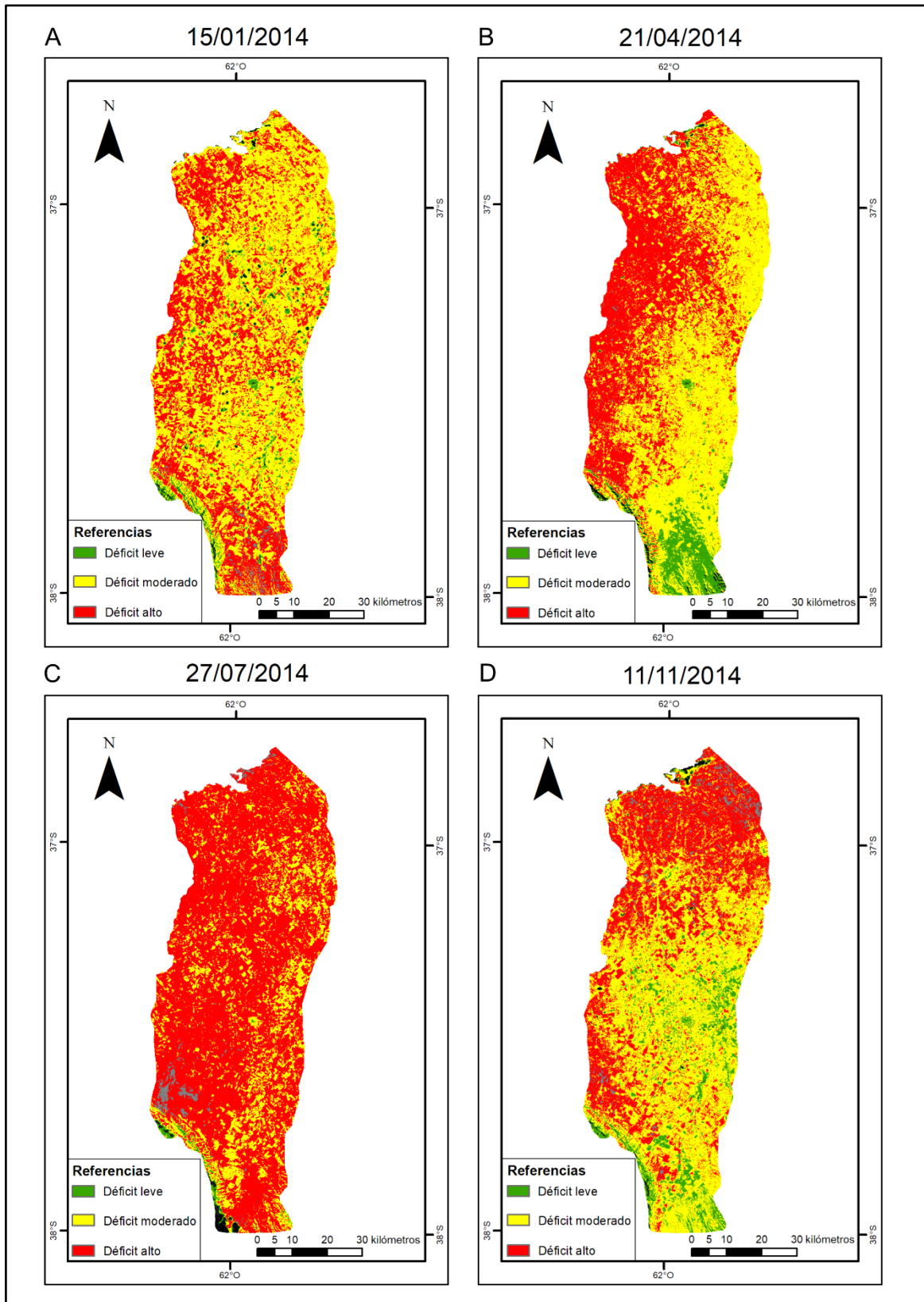
Tabla VI: Ecuación del límite seco

Fecha	Ecuación del límite seco	r ²
2014-01-15	-9,5336 * NDVI + 317,96	0,9443
2014-04-21	-6,4296 * NDVI + 296,27	0,8512
2014-07-27	-2,4645 * NDVI + 278,52	0,709
2014-11-15	-15,601 * NDVI + 319,26	0,9581

Fuente: Valores obtenidos a partir de las imágenes analizadas

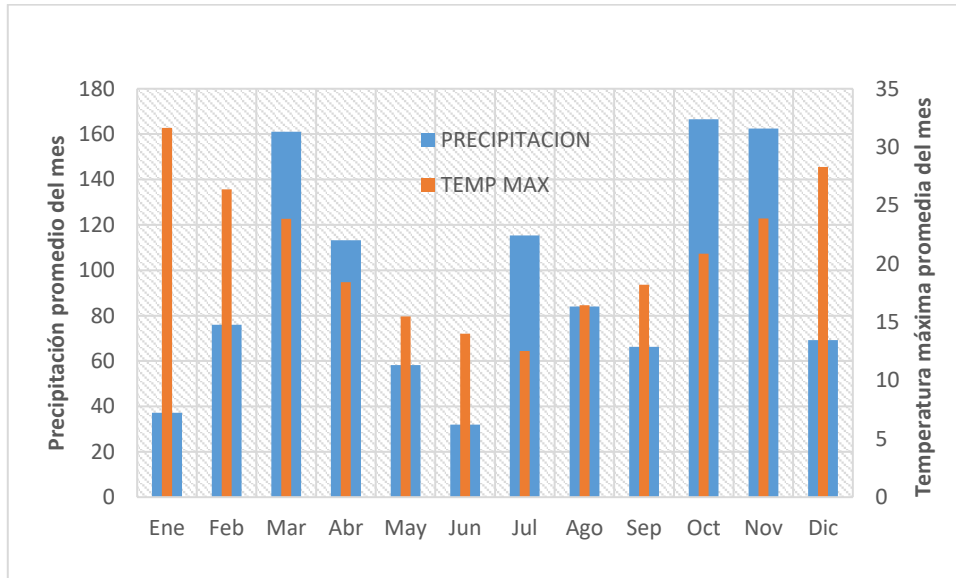
En el análisis del TVDI (Fig. 10) se observa que existe un déficit alto y moderado en la gran mayoría de los cultivos, a pesar de que fue un año en donde hubo lluvias mayores al promedio anual (1141 mm). Por otro lado, el promedio de las temperaturas máximas para el mes de enero fue de 31 °C con temperaturas extremas de 40 °C. Esto probablemente se debe a la desigual distribución de las precipitaciones ocurridas en este año.

Figura 10: Índice de estrés vegetal del arroyo Corto y arroyo Pescado calculado a partir de imágenes Landsat 8 de los sensores OLI y TIRS A-Verano B-Otoño C-Invierno D-Primavera



Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Datos meteorológicos de temperatura y precipitación por mes



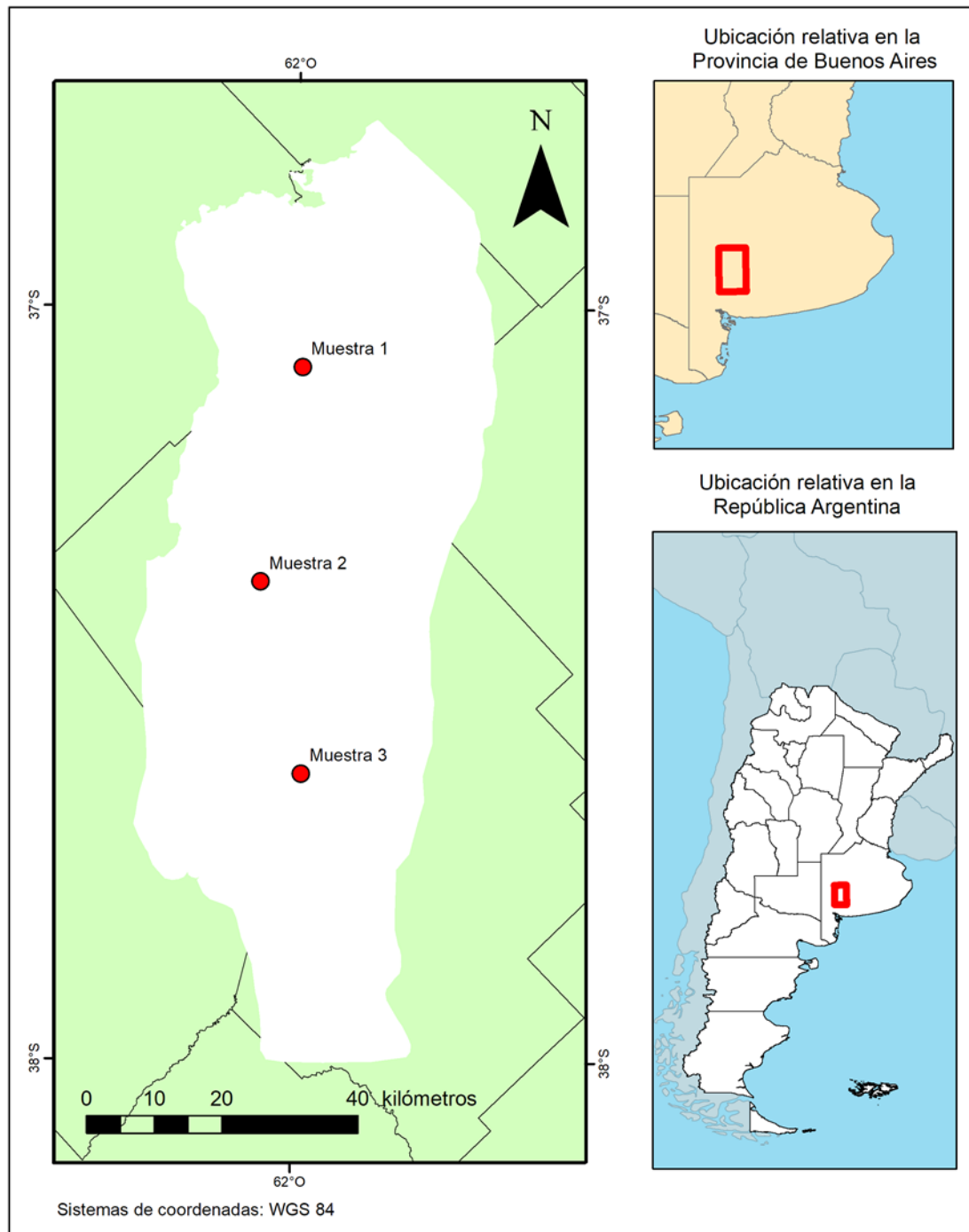
Fuente: Estación meteorológica de Coronel Suárez (SMN)

Entre la toma de cada imagen del año 2014 se registraron concentraciones diferentes en la precipitación. Entre la imagen de verano y otoño se registraron 378 mm de precipitación; entre la de otoño e invierno la concentración de precipitación fue de 206 mm y entre invierno y primavera de 383 mm. En la figura 10 C se evidencia la respuesta del sistema suelo vegetación con las precipitaciones, dando como resultado que el índice de estrés hídrico sea alto en la mayor parte del área de estudio.

En el análisis de la figura 10 A, B y C se observa que la zona donde más déficit es hacia el oeste del área de estudio. Según Geraldí (2009) la isohieta de 800 mm divide la cuenca en un sector Este que se definiría como húmedo y el sector Oeste como seco. Las lagunas Cochicó y Alsina quedan ubicadas en el primer sector. En el sector seco quedan incluidas las lagunas Epecuén, Venado y Del Monte.

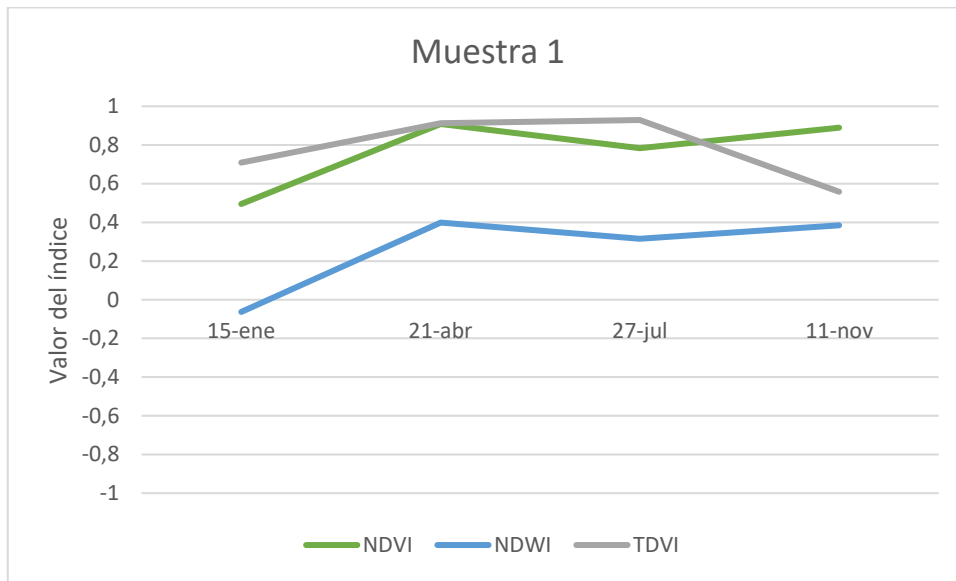
El déficit bajo de acuerdo al índice se observa a principio y fin de año; induciendo que pertenecen a distintos tipos de cultivo entre trigo (Figura 10 D) y maíz (Figura 10 A). Otro lugar donde se encuentra un déficit bajo es el cauce de los arroyos cercanos al sistema de ventania.

Figura 12: Ubicación de las muestras de valores obtenidas de los distintos índices calculados



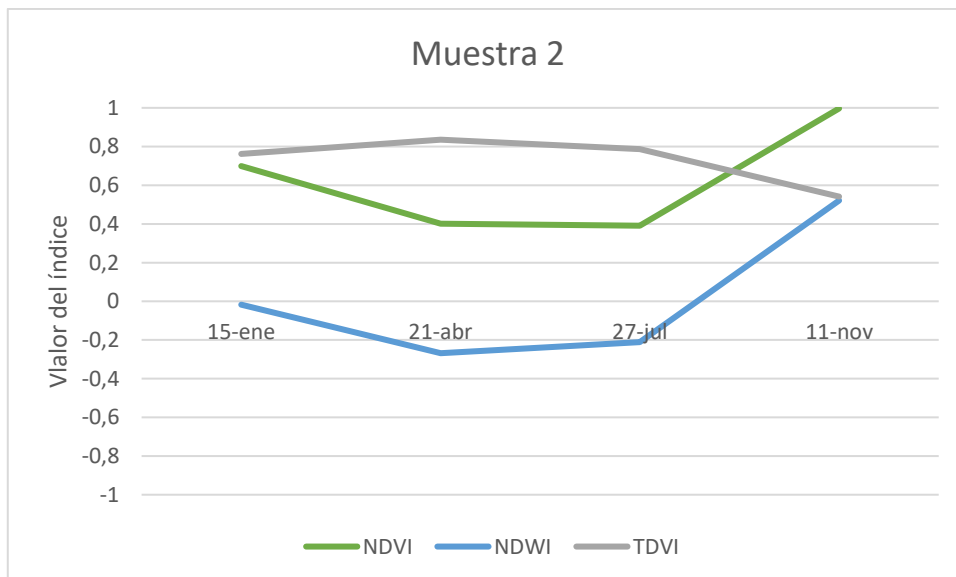
Fuente: Elaboración propia e información de la cuenca por (Geraldí, 2009)

Figura 13: Comparación de valores de la muestra 1 de la cuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado



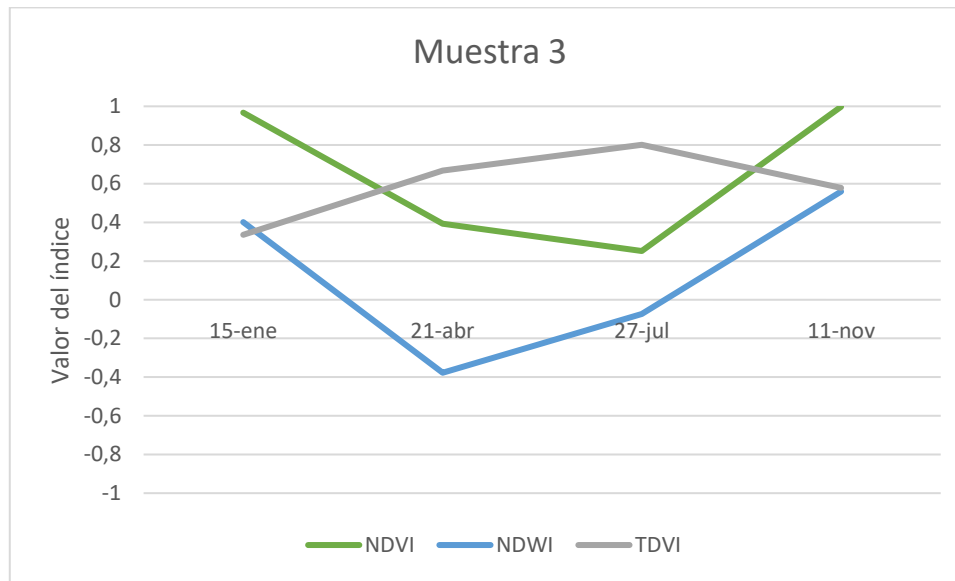
Fuente: Elaboración propia

Figura 14: Comparación de valores de la muestra 2 de la cuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado



Fuente: Elaboración propia

Figura 15: **Comparación de valores de distintos índices de la muestra 3 de la cuenca del arroyo Corto y arroyo Pescado**



Fuente: Elaboración propia

Al observar las rectas del NDWI y TDVI se puede deducir que hay una relación directa entre ambos. Al aumentar el contenido de humedad como nos indica el NDWI, el TDVI disminuye su valor. Otra observación que se puede obtener es de la relación entre el TVDI y el NDVI, al aumentar el NDVI disminuye el índice de estrés vegetal.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo al TDVI la cuenca presenta un déficit alto en las cuatro estaciones, sobre todo en el otoño, invierno y primavera. Y en donde se ve que tiene una mejora en cuanto al déficit es en la primavera en el sector central del área de estudio.

El TDVI sirve como otra herramienta de análisis adicional a las ya más conocidas como el NDVI. Además, esta herramienta incorpora la variante de la temperatura logrando un estudio más amplio del mismo. Una gran utilidad del mismo puede ser la de determinar nuevas áreas de riego o relocalizar las áreas ya regadas.

Otro aspecto a destacar del TDVI es de fácil obtención, y de bajo costo al utilizar las imágenes del Landsat 8 provistas por el USGS. También hay que destacar que la resolución espacial del Landsat 8 son las ideales para un estudio de una cuenca y su cobertura permite analizar lugares poco accesibles

6. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, T. A. Howell, y M. E. Jensen. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manag.*,(98 (6)), 899-920.
- Carlson, T. N. (1997). On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote sensing environment*.
- Casa, & Ovando. (2006). RELACIÓN ENTRE LA PRECIPITACIÓN E ÍNDICES DE VEGETACIÓN DURANTE EL COMIENZO DEL CICLO ANUAL DE LLUVIAS EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA. *RIA*, 67-85.
- Chen, X.-L. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 133–146.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental*.
- Contreras, S., Jobbágy, E. G., Villagra, P. E., Noretto, M. D., & Puigdefábregas, J. (2011). Remote sensing estimates of supplementary water consumption by arid. *Journal of Hydrology*, 10–22.
- Department of the Interior U.S. Geological Survey. (2016). *Landsat 8 Data Users Handbook*. Obtenido de <https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- De la Casa y Ovando, 2006. Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *RIA*, 35 (1): 67-85
- Geraldi, A. M. (2009). *Estudio geoambiental de la cuenca lagunar las encadenadas del oeste*.
- Iglesias, M. d. (2016). *Estimación de evapotranspiración real en trigo con distintas*.
- Jiménez-Muñoz, J. C. (2006). Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI.
- Li, F. (2004). Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX. *Remote Sensing of Environment*, 521–534.
- López, M. L. (2011). *Análisis de los métodos de estimación de evaporación y evapotranspiración a las condiciones locales de la ciudad de Córdoba*.
- Paruelo, J. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 4-22.
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas*, 17, 4-22.

- Perez Gutierrez, Carlos; Muñoz Nieto, Angel L. (2006). *Teledeteccion Nociones y Aplicaciones*. Salamanca, Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Petropoulos, G., Carlson, T., Wooster, M., & Islam, S. (2009). A review of Ts/VI remote sensing based methods for the retrieval of land surface energy fluxes and soil surface moisture. *Progress in Physical Geography*.
- Pinilla, C. (1995). *Elementos de teledetección*.
- Rivas, R. (2014). *ÍNDICE SATELITAL DE DÉFICIT HÍDRICO*.
- Rodríguez, L. M. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 77-95.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 213 – 224.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). *Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5*.
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 467–483.