



Trabajo Final de Licenciatura en Diagnóstico y Gestión Ambiental

## **Facultad de Ciencias Humanas**

# **CÁLCULO DE AGUA VERDE Y GRIS EN CULTIVO DE SOJA DE SECANO EN EL PARTIDO DE TANDIL, DURANTE LA CAMPAÑA 2014/2015**

Paula Olivera Rodríguez

Director: Dr. Raúl Rivas

Co-Director: Dr. Mauro Holzman

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias a la beca de entrenamiento otorgada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC).

En primer lugar quiero agradecer a mi Director de Tesis Dr. Raúl Rivas por guiarme, por su dedicación y por compartir conmigo su vasto conocimiento en la disciplina.

A mi Co-director Dr. Mauro Holzman por su paciencia y su predisposición.

Al Instituto de Hidrología de Llanura y a todo el Grupo de Teledetección quienes me abrieron las puertas para llevar a cabo este trabajo y en especial a Facundo Carmona y Martin Bayala quienes colaboraron conmigo siempre que necesite.

A Dora Ocampo por su apoyo en la etapa preliminar e introductoria de la investigación, confiando en la temática abordada.

A Daniela Ibarlucia por sus mates y su compañía.

A la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y a la Facultad de Ciencias Humanas a quienes les agradezco mi formación académica y humana.

A todos los profesores de la carrera de Licenciatura en Diagnóstico y Gestión Ambiental a quienes les guardo un profundo cariño y respeto, muchos de los cuales me hicieron sentir orgullosa de haber elegido esta carrera. A Mariana Nuñez, Silvina Echeverría y Roxana Banda Noriega que respondieron siempre en los momentos de dudas.

A Sebastián Goñiz, Francisco Davidos, Gabriela Stoco, Iván Peñalba y a todos los productores agropecuarios y comerciantes que aceptaron gentilmente participar en las encuestas facilitando información necesaria para la realización de este trabajo.

A mis amigos que me han acompañado durante todo el proceso.

A mi hermano Eugenio por sus consejos y por confiar en mí, a Vero por alentarme y a Javier por estar.

Finalmente a mis padres Sara y Oscar por su esfuerzo, por enseñarme a seguir siempre, a ellos que le debo todo, gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	1
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	2
RESUMEN.....	4
1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. OBJETIVOS .....	8
2.1 Objetivo general: .....	8
2.2 Objetivos específicos: .....	8
3. ANTECEDENTES.....	9
4. MARCO TEÓRICO.....	12
4.1 Consideraciones generales sobre la sustentabilidad .....	12
4.2 Explosión demográfica, planificación del desarrollo y Revolución verde.....	13
4.3 Agriculturización y monocultivo de soja.....	15
4.4 Gestión Integrada de Recursos Hídricos .....	16
4.5 La Huella Hídrica.....	17
4.6 Componentes de la Huella Hídrica.....	18
4.7 Agua Gris y Agua Verde.....	19
4.8 Análisis de la Huella Hídrica y sus componentes en el cultivo de soja.....	22
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
5.1 Descripción del área de estudio .....	24
5.1.1 Características generales.....	24
5.1.2 Ubicación geográfica .....	25
5.2 Datos e instrumentos utilizados.....	26
5.3 Cálculos a nivel de parcela.....	28
5.3.1 Cálculo de HHv .....	30
5.3.1.1 Cálculo de ETr .....	30
5.3.1.2 Cálculo del Y del cultivo de soja .....	31
5.3.2 Cálculo de HHg a nivel de parcela .....	32
5.4 Cálculo a escala de partido de Tandil .....	32
5.4.1. Identificación de parcelas de soja.....	33
5.4.2 Cálculo de HHv .....	34

5.4.2.1 Estimación de ETr .....	34
5.4.2.2 Cálculo de Y .....	38
5.4.3 Cálculo de HHg a escala de partido .....	39
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
6.1 Cálculos a nivel de parcela.....	40
6.1.1 Resultados de las encuestas.....	40
6.1.2 Cálculo de HHv .....	41
6.1.2.1 Cálculo de ETr .....	41
6.1.2.2 Cálculo de Y.....	44
6.1.2.3 Cálculo de HHv a nivel de parcela .....	44
6.1.3 Cálculo de HHg .....	45
6.2 Cálculos a nivel de partido.....	46
6.2.1 Identificación de parcelas con cultivo de soja.....	46
6.2.2 Cálculo de HHv .....	49
6.2.2.1 Cálculo de ETr .....	49
6.2.2.2 Cálculo de Y .....	54
6.2.2.3 Cálculo de HHv.....	55
8. REFERENCIAS.....	60
9. REFERENCIAS WEB.....	67
10. ANEXOS .....	68
Anexo I. Cuestionario para productores agropecuarios.....	68
Anexo II. Cuestionario para comerciantes agropecuarios .....	70
Anexo III. Datos diarios obtenidos en la estación de balance de energía. ....	71
Anexo IV. Cálculos diarios de los componentes de la ecuación 2 y obtención de ETr. ....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la estación de balance de energía en el establecimiento La Campana, situado en el partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina , adaptado de <i>Bayala et al., (2013)</i> . En la foto de la estación se puede observar la ubicación de los sensores ambientales.....	26
<b>Figura 2.</b> Sensores usados para la medición de variables ambientales en las estaciones EBEs instaladas en la parcela de soja. ....	27
<b>Figura 3.</b> Relación $T_s/NDVI$ y parámetros del índice TVDI. Ev: evaporación, T: transpiración. Tomado de <i>Holzman et al., (2014)</i> .....	36
<b>Figura 4.</b> Gráfico de dispersión entre rendimiento de soja y TVDI acumulado del período crítico y ecuación utilizada para el cálculo espacial de Y a nivel de partido. Valores de rendimiento más elevados se corresponden con valores bajos de TDVI, es decir, alta disponibilidad de humedad de suelo. Tomado de <i>Holzman et al., (2014)</i> .....	38
<b>Figura 5.</b> Gráfico de variación diaria de Tamax y Patm durante el período analizado. ...	42
<b>Figura 6.</b> Comparación de la evolución de FE y Rnd durante la campaña. ....	43
<b>Figura 7.</b> Variación temporal de la ETr diaria durante el ciclo de cultivo de soja. ....	44
<b>Figura 8.</b> Recorte del partido de Tandil. Imagen Landsat 8, 15/01/2015. Composición RGB 543: color rojo zonas con cobertura vegetal, color celeste zonas de suelo desnudo-roca o urbano, color verde zonas de suelo descubierto o arado. ....	47
<b>Figura 9.</b> Clasificación no supervisada a escala de partido. En amarillo se distinguen las parcelas cultivadas con soja, en celeste zonas destinadas a otros usos de suelo y en azul cuerpos de agua o suelo con alto contenido de humedad.....	48
<b>Figura 10.</b> Máscara binaria. En color blanco se observan las parcelas con cultivo de soja a nivel de partido, mientras que el color negro representa otros usos de suelo. ....	49
<b>Figura 11.</b> Imágenes mensuales de TVDI.....	51
<b>Figura 12.</b> Imágenes mensuales FE.....	52
<b>Figura 13.</b> Imágenes mensuales de ETr para parcelas de soja. ....	53
<b>Figura 14.</b> Imagen de rendimiento de soja en el partido de Tandil, durante la campaña 2014/2015. Las parcelas con rendimientos menores a 1600 kg/ha figuran en color celeste, en verde parcelas con rendimientos no superiores a 2100kg/ha, en una tonalidad amarillo-anaranjado rendimientos cercanos a los 2800 kg/ha, por último, en rojo se observan parcelas con rendimientos cercanos a los 3000 kg/ha. ....	55
<b>Figura 15.</b> Imagen de HHv consumida por parcela de soja, en el partido de Tandil, durante la campaña 2014-2015. Blanco corresponde a parcelas sin soja.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

$C_{nat}$  : Concentración natural de nitratos en acuífero

$C_{max}$  : Concentración máxima de nitratos admitida por normativa

CAA: Código Alimentario Argentino

$C_p$ : Calor específico del aire

EBE: Estación de balance de energía

ENVI: Environment for Visualizing Images

ET: Evapotranspiración

ETo: Evapotranspiración de referencia

ETp: Evapotranspiración Potencial

ETpt: Evapotranspiración Priestley y Taylor

ETpt<sub>d</sub>: Evapotranspiración Priestley y Taylor diaria

ETr: Evapotranspiración real

ETr<sub>d</sub> : Evapotranspiración real diaria

Ev : Evaporación

fc : Factor de conversión

FE: Fracción evaporativa

FE<sub>d</sub>: Fracción evaporativa diaria

FE<sub>lp</sub>: Fracción evaporativa con lisímetro de pesada

Gd: Flujo de calor en el suelo

HH: Huella Hídrica

HHa: Agua Azul

HHg: Agua Gris

HHv: Agua Verde

**HR:** Humedad relativa del aire

**Hs:** Humedad del suelo

**IRC:** Índice de reflectividad del infrarrojo cercano

**L:** Cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado

**MODIS:** Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

**N:** Nitrógeno

**NDVI:** Índice de vegetación de diferencia normalizada

**P:** Fósforo

**P<sub>di</sub>:** Peso lisímetro diario

**P<sub>min</sub>:** Peso mínimo del lisímetro

**P<sub>max</sub>:** Peso máximo del lisímetro

**P<sub>atm</sub>:** Presión atmosférica

**R:** Reflectividad en el rojo

**R<sub>nd</sub>:** Radiación neta

**S:** Azufre

**Ta:** Temperatura

**Ta<sub>max</sub>:** Temperatura máxima diaria

**Ts:** Temperatura de superficie

**Ts<sub>min</sub>:** Temperatura de superficie mínima

**TVDI:** Índice de temperatura de sequedad de la vegetación

**Y:** Rendimiento

**α:** Parámetro de Priestley-Taylor

**Δ:** Curva de presión de vapor saturado

**γ:** Constante psicométrica

**λ:** Calor latente de vaporización

## RESUMEN

---

En el presente trabajo se calculó el Agua Verde (HHv) y el Agua Gris (HHg) asociada al cultivo de soja en condiciones de secano en el partido de Tandil, durante la campaña 2014/15. Ambas, son parte componente de la Huella Hídrica (HH), la cual se define como el volumen total de agua dulce usada para producir los bienes y servicios consumidos por una persona, empresa o país.

La HH está conformada por tres tipos de agua: el Agua Azul (HHa) proveniente de fuentes de agua superficiales y subterráneas, el HHg que corresponde al agua contaminada luego de cualquier proceso productivo, y el HHv proveniente de la lluvia que es evapotranspirada por el cultivo (ETr). Por lo tanto, la HH es un indicador directo e indirecto de la apropiación del agua, que incluye tanto el uso consuntivo (verde y azul) como el agua requerida para asimilar la contaminación (gris).

Se realizaron estimaciones a nivel de parcela siguiendo la guía metodológica propuestas por *Mekonnen y Hoekstra (2011)*, junto con ecuaciones específicas para el cálculo de evapotranspiración y encuestas para relevamiento de datos del cultivo.

La extensión de los cálculos a escala de partido se llevó a cabo utilizando imágenes de satélite (misión Landsat DCM) en las que se clasificaron las parcelas con cultivo de soja. Se estimó entonces la ETr a nivel de partido considerando la disponibilidad de agua en el perfil por medio de la fracción evaporativa (FE) como variable determinante de la espacialidad, obtenida partir del dato de la relación vegetación – temperatura de superficie estimada desde satélite (índice TDVI). Posteriormente se calculó el rendimiento (Y) para cada una de las parcelas de soja de la región de interés. Este dato junto con la ETr obtenida, permitió la estimación de HHv a escala de partido, información que fue validada con los datos obtenidos a nivel de parcela.

Finalmente se obtuvo un mapa de HHv, con los diferentes valores de HHv consumida por parcela durante la campaña analizada, indicando que para producir



1kg de soja se consumió entre 650 l y 1800 l. Por otra parte, HHg no fue considerada dado que no se aplican fertilizantes nitrogenados en este cultivo.

Los resultados logrados en este trabajo aportan a la simplificación del cálculo de HH, esperando contribuir de esta manera a futuros trabajos sobre la temática hidrológica, favoreciendo el aprovechamiento responsable y la gestión sustentable del recurso.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Producir alimentos implica el consumo de agua, lo cual convierte a este recurso en el principal componente en la producción de cualquier bien (*Pengue, 2006*).

En la actualidad a nivel mundial, se ha producido un incremento en el consumo de agua dulce, siendo la agricultura responsable por el 86% del consumo de agua en el planeta, incrementando a su vez la competencia con otros usos, como urbanos, industriales y el agua necesaria para la vida humana (*Chamorro y Sarandón, 2013*). Sumado a esto, la contaminación y degradación de los recursos hídricos también ha aumentado por el mayor consumo de agua demandado por la actividad agrícola.

En numerosas cuencas el agua está mal gestionada y como consecuencia resulta insuficiente para satisfacer todas las demandas (*Instituto Internacional del Manejo del Agua, 2007*). Esta problemática hace necesario que se evalúen los flujos de agua que se emplean durante el desarrollo de la actividad agrícola y cuáles son las fuentes de agua disponibles que sustentan la producción. Esto último permitirá formular nuevas estrategias que permitan hacer un uso más eficiente del recurso evitando su escasez a futuro.

En este contexto, es útil entonces analizar el concepto de HH y sus tres componentes: el HHv, el HHa y el HHg. (*Chamorro y Sarandón, 2013*). A partir de este concepto es posible evaluar flujos de agua que se consumen durante una actividad.

Pero para dar cuenta de la importancia de este concepto, la necesidad de evaluar consumos de agua y su vinculación con los procesos productivos (agrícolas en este caso), es preciso sintetizar la situación en cuanto al cultivo de soja se refiere.

Desde la década de los 90 se desarrolla un proceso de agriculturización generalizado que acrecentó el uso de tierras con fines agrícolas. Estas superficies fueron ocupadas con cultivos de soja en su mayoría.

En las últimas dos décadas la soja ha pasado a ser el cultivo más importante de la Argentina, pues además de ocupar la mayor cantidad de superficie laborable, es el bien agrícola que más aporta al PIB agrícola de ese país. Aunado a lo anterior, la leguminosa ha ganado para Argentina el tercer lugar mundial como productor y el segundo lugar como exportador (*Teubal et al., 2008*).

Si bien Argentina es uno de los países más ricos en cuanto a fuentes de agua dulce, el 40 % de sus superficies corresponden a regiones semiáridas con poca disposición de agua. En un principio, fueron el soporte de cultivos adaptados a estas regiones, pero que en la actualidad por el proceso de agriculturización están siendo sembradas con soja.

Este monocultivo aumentó la demanda de agua sobre la región, junto con la utilización de una mayor cantidad de productos fitosanitarios que también impactan en el ambiente, contaminando suelos y fuentes de agua.

Entonces si bien este cultivo permitió aumentar la productividad y rentabilidad actual, también aumentó los costos ambientales, entre ellos la contaminación y sobre-extracción de nutrientes y agua (*Viglizzo y Jobbágy, 2010*)

El aumento en la producción, exportación de materia primas y commodities (principalmente soja) han convertido a la Argentina en el 2º exportador de agua virtual de América Latina y 4º a nivel mundial (*Chamorro y Sarandón, 2013*) aumentando así también su huella hídrica, con sus tres componentes.

El 70 % de la soja del país sale de las tres provincias pampeanas, región donde el proceso de agriculturización dio paso a lo que se denominó “sojización”. Es decir, una concentración de la monocultura sojera con cultivos genéticamente modificados, exclusivamente de exportación, con dependencia de un único agroquímico (*Pengue, 2006*) repercutiendo en el aumento del consumo de agua y degradando el recurso hídrico.

El uso del agua en la Argentina, especialmente para la producción de cultivos de exportación y acompañada de la mano de un posible ciclo más seco en los

periodos por venir, obliga a una reflexión, sobre el uso consuntivo del recurso, especialmente frente a las nuevas demandas productivistas tanto en las regiones extrapampeanas como en áreas pampeanas (*Sierra, 2006*).

Considerando la importancia del recurso agua en todas las escalas, la creciente necesidad de buscar alternativas para hacer un uso más eficiente, evitar el aumento innecesario del consumo de agua y una futura escasez, a sabiendas que el cultivo intensivo de soja es sin dudas uno de los cultivos más extractivos de la región pampeana (*Requesens, 2011*).

La producción de soja bajo secano conlleva a un consumo de agua determinado que pocas veces es considerado. Este consumo puede estudiarse y comprenderse a partir de la aplicación del concepto huella hídrica, agua verde, agua gris, y brindar elementos para una potencial gestión.

## **2. OBJETIVOS**

---

### **2.1 Objetivo general:**

Estimar el Agua Verde y el Agua Gris del cultivo de soja en condiciones de secano en el partido de Tandil durante la campaña 2014-2015.

### **2.2 Objetivos específicos:**

- Encontrar una ecuación alternativa a la recomendada en el Manual N° 56 de la FAO (*Allen et al., 1998*) para el cálculo de evapotranspiración;
- Determinar espacialmente el rendimiento del cultivo, utilizando el método de *Holzman et al., (2014)*;
- Plantear los lineamientos básicos para las estimaciones de HHv y HHg, necesarias para el cálculo de la HH total;
- Cuantificar o determinar HHv y HHg a nivel de partido, utilizando información de satélite y estimar los efectos ambientales desde la visión de la Huella Hídrica.

### 3. ANTECEDENTES

---

Dado que el objeto de estudio se relaciona directamente con las transformaciones del sector agrícola acontecidas a finales del siglo XX comienzos del siglo XXI, es conveniente mencionar estudios realizados al respecto. **Pengue (2004)** analiza la expansión del cultivo de soja junto con la incorporación del paquete tecnológico que la acompaña, afirmando que los daños ambientales, la pérdida de soberanía y el debilitamiento de las economías regionales fueron los principales resultados de este nuevo modelo de producción. **Aizen et al., (2009)** por su parte, evaluó el incremento en el cultivo de soja asociado a un empobrecimiento de la diversidad de la agricultura, sosteniendo que la superficie total cultivada de nuestro país se ha incrementado en coincidencia con la gran expansión del cultivo de soja, sustituyendo otros cultivos de importancia.

**Vázquez et al., (2011)**, analizaron los cambios en el uso de la tierra del Partido de Tandil y sus impactos ambientales, observando un incremento de la superficie agrícola entre 1988 y 2010 a expensas de las áreas de pastizales naturales y pasturas destinadas a ganadería, generando pérdidas de ecosistemas nativos y contaminación. **Seehaus et al., (2014)** obtuvo resultados similares al caracterizar desde una perspectiva agroecológica, los cambios productivos y tecnológicos en establecimientos rurales en un sector del partido correspondiente a la Llanura Periserrana del Sistema de Tandilia.

Resulta pertinente considerar los desarrollos conceptuales y metodológicos que ayudaron a definir la huella hídrica como tal, aportando a la construcción de la estructura teórica y metodológica que sustenta este trabajo.

**Allen (1998)** definió el término de Agua Virtual por primera vez al analizar los problemas de escasez de agua en el Medio Oriente y planteó que en estas naciones, un habitante no accede a un metro cúbico de agua de alta calidad para beber cada año.

**Hoekstra y Hung (2002)** con el objeto de conseguir un indicador que relacione el uso del agua con el consumo humano desarrollaron el concepto de HH.

**Chapagain y Hoekstra (2004)** ajustaron el concepto y desarrollaron su metodología con mayor precisión, calculando la HH de las naciones de la UNESCO, contabilizando también el HHa y el HHv aunque sin definir las. Como conclusión, determinaron que el consumo de agua para la producción de alimentos y otros productos agrícolas constituía el sector que mayor porcentaje aportaba a este indicador. **Chapagain et al., (2006)** analizaron la HH global del consumo del algodón y los impactos causados por la contaminación que genera su producción, que consume 256 Gm<sup>3</sup> de agua por año y cuyo mayor consumo se encuentra por fuera de Europa, más exactamente, en India y Uzbekistán. **Hoekstra et al., (2011)**, brindó un marco teórico y metodológico para abordar la temática desde las diferentes escalas en la que se quisiera evaluar este indicador. Por su parte **Franke et al., (2013)** publica la guía de HHg, donde se define en profundidad este concepto, se detallan los parámetros a tener en cuenta y se proponen un conjunto de directrices para llevar a cabo su correcta contabilidad.

En lo que respecta a la aplicación de la HH para la Argentina, se cuentan con los análisis realizados por **Hoekstra y Chapagain (2006)** quienes estimaron un valor promedio de HH per cápita de 1300 a 1500 (m<sup>3</sup> / cápita / año), el cual supera el promedio mundial de huella hídrica, siendo este igual a 1240 (m<sup>3</sup> / cápita / año). **Aldaya et al., (2010)** desde una perspectiva similar, analizó el consumo de HHv en el caso de Argentina, dando como resultado un consumo de 1298 m<sup>3</sup>/ton con respecto al cultivo de soja, destacando que la mayor pérdida de agua a nivel nacional se debe principalmente a la exportación de soja, que es casi enteramente alimentada por la lluvia.

**Anschau et al., (2014)** estimó la HH de la cadena de maní en Argentina y determinó que presenta valores muy competitivos si se los compara con otros países productores, ya que la casi totalidad de su HH es verde.

**Brito et al., (2015)** calculó la HH del proceso de producción de tabaco en el área metropolitana del Valle de Lerma, Salta, y demostró la intensidad de utilización del agua por esta actividad productiva en el contexto de una región caracterizada por una incipiente urbanización y problemas de acceso a agua potable.

**El Ministerio del Campo, Gobierno de la Provincia de San Luis, (2015)** realizó cálculos de HH a nivel provincial, donde se estimaron los tres tipos de agua que componen este bioindicador, concluyendo que 1.493,96 millones de m<sup>3</sup>/año corresponden al agua verde, 729,33 millones de m<sup>3</sup>/año para la azul y 111,16 millones de m<sup>3</sup>/año para la gris.

Por último a nivel partido de Tandil, **Rodríguez (2014)** estimó la HH del cultivo de papa, siendo hasta el momento el único trabajo antecedente de estimación de este bioindicador, al que se le sumará el presente estudio, esperando que se pueda contribuir de esta manera a futuros trabajos sobre la temática hidrológica y aprovechamiento de recursos.

## 4. MARCO TEÓRICO

---

### 4.1 Consideraciones generales sobre la sustentabilidad

En relación a la sustentabilidad ambiental, fin último de la evaluación de HH, en 1983 la Organización de las Naciones Unidas estableció una Comisión sobre Medio Ambiente y Desarrollo y fue en 1987 a partir de un informe de la Comisión, conocido como “Nuestro futuro común” o Informe Brundtland donde se popularizó el término de desarrollo sustentable, definido como un desarrollo orientado a mejorar el bienestar social sin deteriorar los recursos y servicios ambientales, considerando la integración del crecimiento económico, la equidad social y la protección ambiental pilares fundamentales para el logro de este desarrollo.

Alrededor de esta aspiración se construyeron una serie de debates y desarrollos teóricos que incorporaron algunos postulados básicos de la ciencia económica para explicar cómo alcanzar la sustentabilidad, abordando este concepto desde dos enfoques contrapuestos:

Por un lado la Economía Ambiental disciplina basada en el pensamiento neoclásico, interpretó el concepto de sustentabilidad desde un enfoque débil, empleando la valoración económica como único método para resolver las diferentes cuestiones ambientales y alcanzar la sustentabilidad. Así *Pearce y Turner (1990)*, evaluaron la sostenibilidad de un conjunto de países según su capacidad de ahorro, es decir, si el ahorro en la economía era mayor o igual a las depreciaciones de capital natural y de capital hecho por los humanos, estos poseían un índice de sustentabilidad alto.

Otro enfoque fue el postulado por la Economía Ecológica en respuesta a la Economía Ambiental. Esta disciplina interpretó a la economía como un circuito abierto y dinámico, en constante interacción con el medio natural, por lo que no puede mantenerse ajena a sus exigencias, lo que requiere un uso de los recursos a un ritmo que no genere su agotamiento, ya que es imposible sustituir el capital natural por el capital manufacturado por el hombre, así como valorar los impactos



ambientales utilizando el dinero como única unidad de medida, concibiendo el concepto de sustentabilidad desde un enfoque fuerte.

En esta línea surgieron algunos trabajos como los presentados por *Roegen (1971)* quien sostuvo que si la actividad económica humana degrada los recursos de baja entropía (combustibles fósiles o materiales) no solo existirá un límite a las capacidades de sustentación de cada periodo, sino y también a la vida humana total que la tierra pueda mantener. Por otra parte *Martínez Allier (1995)*, sentó las bases de la Economía Ecológica como la disciplina que estudia las relaciones entre el crecimiento económico y el medio natural, afirmando que la sustentabilidad de una economía debe ser evaluada a través de indicadores biofísicos que incorporen consideraciones acerca de la distribución ecológica.

## **4.2 Explosión demográfica, planificación del desarrollo y Revolución verde**

De acuerdo a *Capalbo (2000)* a mediados de siglo XX, luego de finalizada la segunda Guerra Mundial se produjo un crecimiento explosivo de la población y con ello un incremento en el consumo de bienes y servicios. La economía toda y los sectores productivos comenzaron un proceso de transformación y reestructuración, el objetivo era aumentar la producción a través de procesos productivos basados en invenciones complejas, para satisfacer las necesidades de la población en aumento, reduciendo los costos económicos.

Este nuevo escenario fue evolucionando de la mano del concepto de progreso, el cual sostenía que, a través de la implementación de nuevas tecnologías se lograría resolver los problemas ocasionados por el aumento poblacional y de esta manera las sociedades alcanzarían estados de máximo crecimiento económico y desarrollo, conviviendo ambos conceptos como sinónimos.

Esta idea fue incorporada por los planificadores del desarrollo de la época, quienes ponían énfasis en el desarrollo tecnológico y la búsqueda de nuevas maneras de producir y operar sobre la naturaleza, como bases fundamentales para el desarrollo de los países (*Capalbo, 2000*).

En los años siguientes estos planes fueron el punto de partida para difundir esta nueva lógica, basándose en el pensamiento que había sido exitoso en Europa también podría ser aplicado en otros lugares del mundo menos desarrollados y así integrarlos a la economía mundial. Este fue el caso de algunos países de Latinoamérica, donde países desarrollados comenzaron a invertir capitales en la producción primaria para satisfacer de forma eficiente y económica su propio consumo y abastecer la producción de manufacturas (*Prebisch, 1973*). Se trataba de modernizar estas regiones, transformando su agricultura tradicional, para magnificar las producciones y disminuir costes (*Altieri, 2009*).

En este marco, en la décadas del 60' y el 70' comenzó una mecanización de la agricultura, la llamada Revolución Verde, impulsada por las potencias capitalistas para producir grandes cantidades de alimentos en menos tiempo y espacio y promover grandes beneficios comerciales (*Altieri, 2001; Sevilla Guzmán, 2006*). Su principal finalidad era generar altas tasas de productividad agrícola sobre la base de una producción extensiva de gran escala y el uso de alta tecnología, teniendo como principal soporte la selección genética de nuevas variedades de cultivo de alto rendimiento, asociada a la explotación intensiva permitida por el riego y el uso masivo de fertilizantes químicos, pesticidas, herbicidas, tractores y moderna maquinaria agrícola (*Ceccon, 2008*)

En la década de los '90 se anunció una nueva Revolución Verde, la revolución genética que uniría a la biotecnología con la ingeniería genética, promoviendo transformaciones significativas en la productividad de la agricultura mundial. Esta tenía como principal aspecto la creación de organismos genéticamente modificados conocidos como transgénicos.

Un ejemplo muy conocido es el de la soja Roundup Ready, resistente a herbicidas, un cultivo sembrado por agricultores a gran escala y altamente tecnificado tanto para la alimentación humana, alimentos balanceados para cría y engorde de animales, como para la creciente producción de biodiesel.

Una década después de acontecida la segunda Revolución Verde los promotores de la biotecnología agrícola en Latinoamérica aseguran que los cultivos producidos por ingeniería genética reducen los problemas ambientales, impulsando la agricultura lejos de la dependencia de los insumos químicos, incrementando la producción con beneficios para la seguridad alimentaria, ayudando a su vez a combatir la pobreza y el hambre, y recientemente contribuyendo a la producción eficiente de biocombustible (*Altieri, 2009*).

Sin embargo este modelo agroproductivo no tuvo ni tiene un carácter positivo en los países menos desarrollados, ya que su implementación no significó una reducción en el uso de recursos naturales, la demanda de combustibles fósiles y sus derivados para generación de energía aumentó, sumado a esto se ocuparon sectores de tierra para ser utilizados en la producción de cultivos cambiando el uso propio de los mismos y generando un cambio abrupto en el ecosistema circundante. Este crecimiento económico y el uso desmesurado de materiales y energía desencadenaron serios desgastes ecológicos de diferentes escalas, repercutiendo en algunos casos de manera irremediable en el ambiente.

### **4.3 Agriculturización y monocultivo de soja**

En la última década del siglo XX, comenzó a difundirse este modelo de producción denominado agricultura industrial, basado en sistemas intensivos, enfocado en la producción masiva de un solo producto (monocultivo de soja) con la utilización de un alto nivel de tecnificación, inversión de capital, energía y otros recursos.

Así se desencadenó un proceso de agriculturización, el cual se caracterizó por el uso creciente y continuo de las tierras para cultivos agrícolas en lugar de usos ganaderos o mixtos (*Petrantonio, 2008*).

Son varios los factores que harían suponer que la tendencia por la expansión de la producción sojera no se detendría (*Pengue, 2009*). Entre ellos, las demandas crecientes de la expansión demográfica en países que necesitan proteína vegetal para su transformación en proteína animal, la demanda de soja para la producción de biodiesel, el cambio climático que provocaría el desplazamiento de cultivos

como el maíz y el trigo, superficie que luego podría ser cultivada con soja, uno de los cultivos que más se podría adaptar al nuevo escenario.

Y por último los costos, el agricultor obtiene más ingresos produciendo soja que cualquier otro cultivo alternativo, o leche o carne de manera extensiva. Por esto mismo la superficie implantada con el cultivo crece año tras año respecto a los demás cultivos.

Esta pérdida en la diversidad de cultivos, implica una tendencia hacia la construcción de paisajes agrícolas homogéneos junto a una alta probabilidad de profundización de los costos ambientales. El monocultivo de soja afecta fuertemente los suelos, intensifica el uso de agroquímicos y fertilizantes y facilita el desplazamiento de otras economías en la región, importantes para el desarrollo local como la producción láctea, la floricultura, la horticultura o la producción pecuaria.

Como consecuencia de este proceso se presentan la pérdida de nutrientes y degradación de suelos, la destrucción de hábitats, el aumento en las exportaciones de agua virtual, la aparición de nuevas plagas, enfermedades y malezas tolerantes y resistentes, pérdida de diversidad biológica, deterioro de servicios ecológicos esenciales y contaminación del recurso hídrico son algunos de los principales problemas ambientales condicionados por la agriculturización (FAO, 2007).

#### **4.4 Gestión Integrada de Recursos Hídricos**

La forma en que se gestiona el agua hoy en día no es sostenible desde el punto de vista ambiental, como tampoco lo es en términos económicos y sociales.

Las necesidades futuras de mayor producción generarán una fuerte presión, en particular en las zonas más propicias para la producción de monocultivos de la demanda mundial, como lo es la soja, por lo que es necesario conocer anticipadamente la distintos consumos de agua a nivel espacial, para evaluar adecuadamente los escenarios futuros, brindando elementos y herramientas para una apropiada gestión.

Así en el corto plazo será posible la planificación de una Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas (*PNUMA-DHI Centro para el Agua y el Medio Ambiente, 2009*).

Las demandas de agua para el consumo humano básico y la sostenibilidad ambiental son prioritarias, por lo que es fundamental su conservación y la necesidad de generación de nuevos conocimientos que contribuyan no solo a este fin, sino también al desarrollo sustentable de este recurso, es decir, la utilización del recurso en la actualidad de modo tal que pueda ser aprovechado con buena calidad y en cantidad suficiente por nuestros hijos y nietos (*Ruiz de Galarreta; Rodriguez, 2013*).

#### **4.5 La Huella Hídrica**

La HH, es definida como el volumen de agua utilizada para producir productos y servicios consumidos por un individuo, por un grupo de personas o por un país respectivamente y se suele expresar en volumen de agua usado por año (*Hoekstra, 2003; Chapagain y Hoekstra, 2004*). De esta manera, establece como un consumidor o producto se relaciona con el uso de los sistemas de agua dulce, siendo un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuente y los volúmenes contaminados por tipo de contaminación (*Hoekstra y Hung, 2002; Hoekstra et al., 2009*).

La evaluación de HH es una herramienta analítica que puede ayudar a entender cómo las actividades y productos se relacionan con la escasez de agua, la contaminación, los impactos relacionados y lo que se puede hacer para asegurar que las actividades y productos no generen un uso insostenible del agua dulce (*Hoekstra et al., 2009*), contribuyendo a que las diferentes actividades productivas puedan ser más sostenibles desde el punto de vista del agua.

La mayoría de los estudios coinciden en que hoy en día en el mundo hay suficientes recursos hídricos, aunque su disponibilidad geográfica es desigual (*Aldaya et al., 2011*). Esto obliga a las regiones que cuentan con mayor abundancia del recurso a situarse sobre una postura de responsabilidad y previsión, ya que en muchos países con escasez o limitaciones hídricas, el agua se importa justamente de grandes países productores como los son los países de Latinoamérica (*Ministerio del Campo, Gobierno de la Provincia de San Luis. 2015*).

Es importante hacer un uso del recurso sostenido en el tiempo, sin impactar en su calidad y cantidad a largo plazo, para abastecer una población creciente que se desarrolla bajo un modelo económico que contradictoriamente afecta la conservación del ambiente y los recursos que lo sostiene. En virtud de esto, es de suma importancia cuantificar los efectos del consumo de los recursos hídricos, ya que a través de su comprensión se podrá constituir una base para una mejor gestión y uso racional de los recursos de agua dulce (*Chapagain y Hoekstra, 2008*).

#### **4.6 Componentes de la Huella Hídrica**

La HH se compone de tres tipos de agua:

- Agua azul (HHa), proveniente de fuentes de agua superficial y subterránea.
- Agua verde (HHv), proveniente de la lluvia que es evapotranspirada por el cultivo.
- Agua gris (HHg), que es el agua contaminada luego de cualquier proceso productivo.

El HHa de un cultivo, es el agua consumida para su riego, así como también el agua que es evaporada durante su almacenamiento o transporte por canales abiertos para ser suministrada luego a las plantas. Este consumo de agua no significa que el agua desaparezca, porque el agua permanecerá dentro del ciclo y siempre volverá a alguna parte. Pero en un cierto período uno no puede consumir más agua que la que está disponible, es un recurso renovable, pero eso no significa que su disponibilidad sea ilimitada.

La HHa entonces mide la cantidad de agua disponible en un determinado período que se consume (en otras palabras, no se devuelve inmediatamente dentro de la misma cuenca). De esta manera, proporciona una medida de la cantidad de agua azul disponible consumida por los seres humanos (*Hoekstra et al., 2011*).

Si se comparan los cultivos bajo riego en relación a los de secano, la HH tiene valores más elevados para los primeros que para los segundos. La clave del cálculo está vinculada al HHa, concretamente al agua de riego. Sin embargo, cada componente cumple un papel de importancia en la determinación de HH. Y para el caso concreto del cultivo de soja, tanto HHv como HHg son esenciales ya que un elevado porcentaje de las tierras de la región son cultivadas bajo la modalidad de secano (*Magrin et al., 2005*). El hecho de que grandes volúmenes de agua para riego no se apliquen en este tipo de cultivo no indica que de forma indirecta (a partir de las precipitaciones y del agua utilizada en la aplicación de agroquímicos) no se esté haciendo un uso del recurso agua.

Particularmente en las actividades agrícolas, la producción de granos ha considerado el uso del agua en sistemas de secano como un insumo de uso no restrictivo y que no ha sido imputado a las cuentas de costos y beneficios. A esto se suma que un elevado porcentaje de las tierras cultivadas en América Latina lo son en zonas de secano, pero que la agricultura industrial de exportación, demanda cada día más agua para sostener su sistema de producción e incrementar su productividad, como por ejemplo comienza a suceder en la Región Pampeana Argentina (*Pengue, 2006*).

#### **4.7 Agua Gris y Agua Verde**

El HHg del cultivo de soja, está constituido por el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes comparado con las concentraciones normales del cuerpo receptor y las normas de volcamiento (*Hoekstra et al., 2011; Franke, et al., 2013; Brutos et al., 2015*).

Se calcula como el volumen de agua que se requiere para diluir contaminantes (sustancias químicas) hasta el punto que la calidad del agua permanezca por

encima de las normas de calidad de agua ambiente acordadas. Siendo un indicador de la cantidad de contaminación de agua dulce que puede asociarse con una actividad, por lo que es una buena herramienta para evaluar el uso sostenible, eficiente y equitativo de los recursos hídricos (*Aldaya et al., 2010; Hoekstra et al., 2011; Franke, et al., 2013*).

Esta puede ser estimada teniendo en cuenta el uso de fertilizantes, herbicidas, pesticidas y/o insecticidas. Para el cálculo de HHg, se asume que existe una relación directa entre el uso de fertilizantes químicos y la consiguiente contaminación difusa del medio local debido al consumo de estos productos.

Para la estimación de HH del cultivo de soja, se incorpora el nitrógeno (N) como parámetro de control. En el caso del N se considerará el valor límite permitido de nitratos en el agua para consumo humano establecido por el Código Alimentario Argentino (45 mg NO<sup>3</sup>/L). Este valor, sumado al dato de cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado por hectárea y la concentración de este elemento en el cuerpo receptor, nos permite entonces estimar el volumen de agua necesario para diluir los retornos de agua contaminada al ambiente (*Mekonnen y Hoekstra, 2011*).

En cuanto al HHv del cultivo de soja no es otra cosa que la evapotranspiración (ET). La cual es definida como la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo (*Allen, 2006*).

La evaporación es entonces el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor), tales como lagos, ríos, caminos, y suelos. Mientras que la transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su posterior remoción hacia la atmosfera (*Allen, 2006*).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aunque cabe destacar que en las primeras etapas del cultivo el agua se pierde principalmente por evaporación, pero con el desarrollo del cultivo, la transpiración se convierte en el proceso principal.



La ET depende de numerosos factores meteorológicos, entre ellos la radiación solar como la fuente de energía fundamental para el desarrollo del proceso, la temperatura del aire como consecuencia de la anterior, la humedad relativa como medida de la capacidad evaporativa del ambiente y de la velocidad del viento que remueve constantemente el agua desde la superficie evaporante y transporta, en ocasiones, calor para mantener activo el proceso; pero, además, depende de las características de la vegetación del área, su tipo, densidad y estado de crecimiento, como también del suelo, sus propiedades y su contenido de humedad (*Allen et al., 1998*).

Se puede diferenciar entonces entre la Evapotranspiración potencial (ET<sub>p</sub>) que es la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones existentes, cuando el suelo está abundantemente provisto de agua y cubierto con una cobertura vegetal completa (*Thornthwaite, 1948*) y la Evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) que es la evapotranspiración que ocurre en condiciones reales, teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa ni el suelo se encuentra en estado de saturación (*Allen et al., 1998*). A su vez a fines de los años 70 y comienzos de los años 80 del siglo pasado fue introducido el concepto de ET de referencia (ET<sub>o</sub>), con el fin de estudiar la demanda de ET de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo y de las prácticas de manejo. Debido a que hay una abundante disponibilidad de agua en la superficie de evapotranspiración de referencia, los factores del suelo no tienen ningún efecto sobre ET. ET<sub>o</sub> expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, siendo los parámetros climáticos los únicos factores que afectan ET<sub>o</sub> (*Allen et al., 2006*).

Por lo tanto, ET<sub>o</sub> puede ser calculada a partir de datos meteorológicos obtenidos en cualquier estación climatológica. Hoy en día, es posible combinar datos de terreno y de satélite, o directamente reemplazar las medidas de terreno por datos de satélite, previa calibración y validación, para obtener la ET<sub>o</sub> con errores similares a ecuaciones que utilizan datos meteorológicos (*Rivas y Caselles, 2004; Rivas et al., 2016*).

La ET ha sido estudiada desde diferentes enfoques y disciplinas: hidrometeorología, agronomía, geografía, entre otras (*Irigoyen, 2003; Ocampo y Rivas, 2011; Fernández Long et al., 2014*). Se propone aquí abordarla como un concepto clave para la estimación del Agua Verde, y en consecuencia, para el cálculo de la Huella Hídrica.

Varios serán los aspectos a abordar: crecimiento, desarrollo y fertilización del cultivo (agronomía), variables/input de entrada para la estimación de la evapotranspiración del cultivo (hidrometeorología); datos del cultivo en el partido y la región (estadística y economía); métodos apropiados de cálculo y extrapolación de los mismos (teledetección); entre otros.

De manera que, se estudiará y estimará en detalle la ET y el volumen de fertilizantes aplicados, considerando todos los aspectos, otorgándole al estudio en su conjunto una mirada integral, donde cada aporte es valioso para el resultado final: estimación del HHv y HHg del cultivo de soja en condiciones de secano.

#### **4.8 Análisis de la Huella Hídrica y sus componentes en el cultivo de soja.**

El análisis de HH, HHv y HHg en un cultivo como la soja, requiere de la caracterización del medio físico-biológico, la descripción de la producción de cultivo y la tecnología utilizada para tal fin, la economía y la organización social vinculada a este tipo de actividad agrícola, entre otras. De modo que confluyen múltiples procesos y se desarrollan relaciones de dependencia entre los elementos, que no pueden ser analizados de manera individual (*García et al., 2004*).

Es necesario entender estas interrelaciones que conforman la estructura del problema, los vínculos entre el crecimiento económico de las últimas décadas y su repercusión en el ambiente, analizarlo desde todos sus aspectos de forma interdisciplinaria e integral, de acuerdo a la complejidad e incertidumbre intrínseca que presenta cualquier problemática ambiental, la cual se define como una

manifestación de una deficiencia, merma o carencia de racionalidad entre el subsistema natural y social (*Fernandez, 2000*).

El agua es un factor determinante en el desarrollo económico y social y al mismo tiempo, cumple la función básica de mantener la integridad del entorno natural. A pesar de esto, el agua es solo uno de los recursos naturales vitales, resultando imperativo que los temas hídricos no sean tratados de forma aislada.

Por lo anterior, una manera óptima de abordar la problemática, es a partir de la utilización de indicadores biofísicos de sustentabilidad, vinculantes y sinérgicos como lo es la HH, que nos permiten una solución en los temas de integración de los componentes de un sistema. El objetivo de los indicadores es proveer una base empírica y numérica para conocer los problemas, calcular el impacto de nuestras actividades en el medio ambiente y para elaborar y evaluar el desempeño de las políticas públicas (*López Sardi y Cattaneo, 2013*).

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

---

### 5.1 Descripción del área de estudio

#### 5.1.1 Características generales

El partido de Tandil se localiza en el sector centro-sudeste de la Provincia de Buenos Aires, situado dentro de la Región de la Pampa Austral o de Sierras y Llanuras Intraseranas (*Morello y Solbrig, 1997*).

Ocupa una superficie de 4.935 km<sup>2</sup> y limita al norte con el partido de Azul y Rauch, al este con los partidos de Ayacucho, Balcarce, al oeste con el Partido de Juárez, y al sur con los partidos de Lobería y Necochea. Se vincula con los mismos a través de la Ruta Nacional 226, la Ruta Provincial 74 y la Ruta Provincial 30, principales vías de comunicación de la zona.

El partido cuenta con una población de 123.817 habitantes, según los datos arrojados por el Censo 2010 realizado por el Instituto de Estadísticas y Censos de la Nación. Tandil es su ciudad cabecera, contando además con asentamientos urbanos de rango menor de primer categoría como Gardey y María Ignacia Vela y poblados más pequeños de segunda categoría como De la Canal, Fulton, La Pastora, Azucena (*Jacinto, 2012*)

Desde el punto de vista climático, Tandil presenta un clima húmedo- subhúmedo, con poca o ninguna deficiencia de agua, donde el valor medio anual de precipitación es de 925 mm, la evapotranspiración real y potencial son de 694 y 712 mm, respectivamente, con un déficit poco significativo (18 mm) correspondiente a los meses de enero, febrero y marzo. Mientras que los excesos hídricos se distribuyen en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre.

En el partido nacen diferentes cuencas de arroyos, tal es el caso de la Cuenca de los arroyos Tandileofú, Chapaleofú, Languyú, Quequén Chico, entre otras. Los tres primeros drenan sus aguas en sentido noroeste, en dirección a la cuenca

deprimida del Salado, mientras que las aguas del Arroyo Quequén Chico lo hace en sentido sur (*Burkart et. al., 1999; Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2010*).

Cabe destacar que ésta es una área conformada por relieves irregulares, debido a que es atravesada en sentido NO-SE por el Sistema de Tandilia, el cual se extiende desde Olavarría hasta Mar del Plata, con una extensión de 335 km y alturas en torno a los 500 m.s.n.m. (*Burkart et. al., 1999*). Dentro de este Sistema se pueden diferenciar tres compartimentos ecológicos según *Nuñez y Sanchez (2006)*: Serranías, Llanura Periserrana y Llanura distal.

El compartimento de las Serranías se caracteriza por pendientes pronunciadas, afloramientos rocosos y suelos poco desarrollados con riesgo de erosión y limitaciones en la zona radical, por lo que la actividad agrícola es escasa pero hay actividad ganadera, minería y turismo.

La Llanura Periserrana se encuentra casi totalmente bajo explotación agrícola dada sus aptitudes para esta actividad, ya que sus suelos son profundos, las pendientes son menos abruptas, disminuyendo el riesgo de erosión.

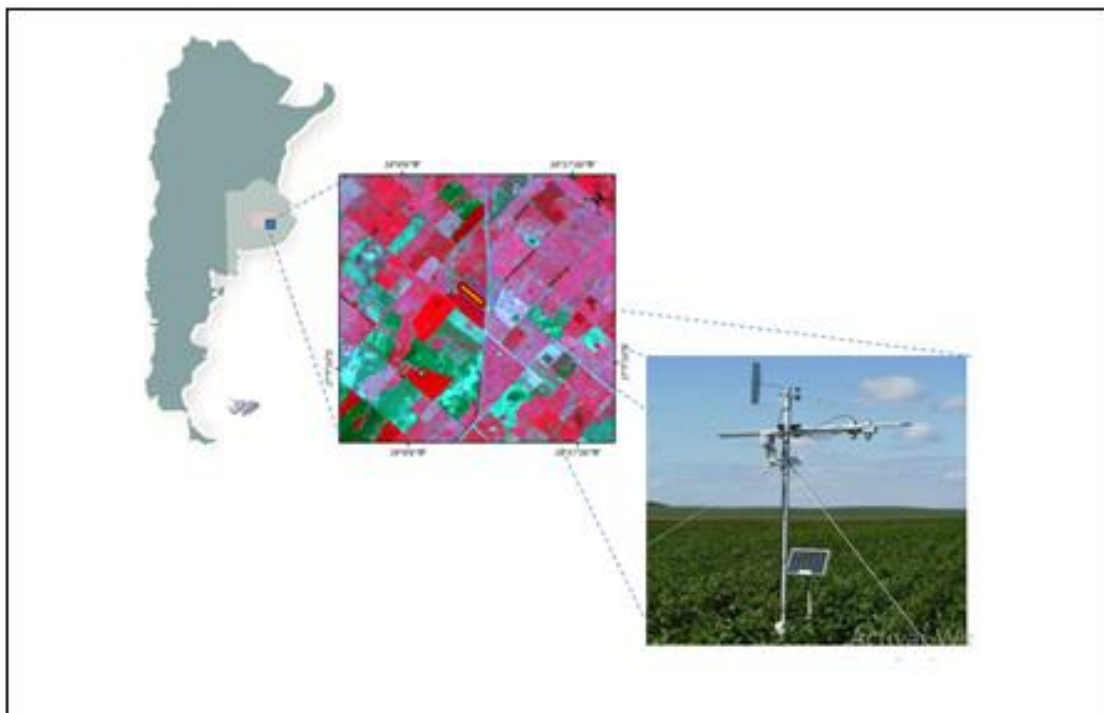
Sucediendo altimétricamente a la Llanura Periserrana, se encuentra la Llanura Distal, donde predominan los suelos alcalinos, pobremente drenados, debido a la escasa pendiente y permeabilidad. Estas condiciones edáficas permiten la coexistencia de áreas donde se desarrollan actividades agrícolas y áreas donde se desarrollan actividades ganaderas extensivas.

A pesar de las condiciones edáficas, en los últimos años los avances en el sistema productivo han favorecido el incremento en la actividad agrícola, lo que ha generado el desplazamiento de otros usos como la ganadería (*Vázquez, 2011*), transformándose en la actualidad en el principal sector económico del Partido.

### **5.1.2 Ubicación geográfica**

Para el cálculo a nivel de parcela, se utilizaron los datos registrados por la Estación de Balance de Energía (EBE) del Instituto de Hidrología de Llanuras, ubicada en el Establecimiento La Campana, Tandil (37° 17'S; 58° 56'O, 152 m), situada a 15 km al Este de la ciudad (Figura 1).

La campaña experimental se desarrolló desde noviembre de 2014 hasta marzo de 2015, abarcando todo el ciclo de cultivo de soja, en una parcela de 36 ha.



*Figura 1.* Ubicación de la estación de balance de energía en el establecimiento La Campana, situado en el Partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina, adaptado de *Bayala et al., (2013)*. En la foto de la estación se puede observar la ubicación de los sensores ambientales.

## 5.2 Datos e instrumentos utilizados

Para el cálculo de la  $E_{Tr}$  a nivel de parcela se utilizaron los datos registrados por dos EBEs instaladas en el centro de una parcela con cultivo de soja de secano (Figura 1). Las estaciones registran en forma diaria los componentes de la radiación neta ( $R_{n_d}$ ), la velocidad de viento, temperatura ( $T_a$ ) y humedad relativa del aire (HR), flujo de calor en el suelo ( $G_d$ ), temperatura y humedad del suelo, temperatura de la vegetación, presión atmosférica ( $P_{atm}$ ), entre otras variables.

Del conjunto de medidas se utilizaron los registros de los componentes de  $R_{n_d}$ ,  $T_a$  y HR y  $P_{atm}$ , principales parámetros meteorológicos que determinan la ET. Para la medida de los componentes de  $R_{n_d}$  se utilizó un radiómetro neto CNR-1 (Kipp y

Zonen). El radiómetro neto registra por separado la radiación incidente y saliente, tanto de onda corta como de onda larga, por medio de sus cuatro componentes: dos piranómetros CM3 (0,305 - 2,800  $\mu\text{m}$ ) y dos pirgeómetros CG3 (5 - 50  $\mu\text{m}$ ). Los sensores CM3 y CG3 presentan un error máximo de 2,5 %. Para el registro de la Ta y HR se utilizó el sensor CS215-L16 (Campbell Scientific, Inc.), que presenta un error máximo de 0,4 °C para la temperatura y del 2 % para la humedad relativa, considerando rangos habituales de medida.

Los instrumentos se montaron sobre un mástil de hierro a 2,60 m sobre la superficie, los valores medios, máximos y mínimos de cada variable se almacenaron cada 15 minutos en un datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.). El datalogger se conectó a una batería de 12 V con un panel solar de 20 W para su recarga (Carmona, 2013).

En la Figura 2 se enumeran los instrumentos que componen las estaciones portátiles ubicadas en las parcelas para la medición del conjunto de variables necesarias para la cuantificación de la HH.

Sensor	Modelo	Uso
Flujo de calor en el suelo	Hukseflux, HFT3	Flujo de calor en el suelo
Sensor RN	Kipp & Zonen, CNR1	Radiación de onda corta y larga
Datalogger	Campbell, CR10X- CR1000	Almacenado de datos
Temperatura de superficie	Campbell, Apogee	Temperatura de superficie
Net Radiometer	Kipp & Zonen, NR Lite	Radiación neta
Sensor Ta y HR	Campbell, CS215	Temperatura y Humedad del aire
Anemómetro	Met one, 014A	Velocidad de viento
Sensores de humedad	Decagon Devices, Inc EC-10 y Sensores SHC-20	Humedad de suelo

Figura 2. Sensores usados para la medición de variables ambientales en las estaciones EBEs instaladas en la parcela de soja.

Se elaboraron cuestionarios dirigidos a los informantes calificados, con el propósito de conocer fechas de siembra, cosecha, duración del ciclo del cultivo, utilización de fertilizantes, tipo y cantidad aplicada por hectárea de cultivo de soja, así como también datos correspondientes a  $Y$ . Esta información es fundamental tanto para el cálculo de la  $HH_g$  como  $HH_v$ , que será utilizada posteriormente para validar los datos recabados en las parcelas experimentales y cotejar la información brindada por las imágenes de satélite.

El primero de los cuestionarios se confeccionó para los productores agropecuarios del partido de Tandil (Anexo I) mientras que el segundo cuestionario fue realizado para los comerciantes de agroquímicos de la zona (Anexo II).

### 5.3 Cálculos a nivel de parcela

Para estimar el  $HH_v$  se utilizaron la ecuación propuesta por *Mekonnen y Hoekstra, (2011)*:

$$HH_v = \frac{\sum ET_r}{Y} \quad [1]$$

donde  $ET_r$  es el agua consumida y evapotranspirada por el cultivo (en mm llevada a  $m^3/ha$ ) e  $Y$  el rendimiento del cultivo ( $t/ha$ ).

Para el cálculo de la  $ET_r$  se utilizará el modelo de *Priestley y Taylor (1972)* (*Rivas et al., 2010; Carmona et al., 2013; Carmona et al., 2017*), considerando la fracción evaporativa ( $FE$ ) como indicador de disponibilidad de agua para evapotranspirar. La ecuación operativa es la siguiente (*Rivas y Carmona 2010*).

$$ET_r = FE \propto \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \cdot (Rn_d - G_d) \cdot fc \quad [2]$$

donde  $FE$  es la fracción evaporativa diaria para el ciclo del cultivo (adimensional),  $\alpha$  (adimensional) es el parámetro de Priestley-Taylor y se asume un valor de 1,26 (*Carmona et al., 2010*),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado como función de la temperatura media del aire ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante



psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>),  $Rn_d$  es la radiación neta diaria en el píxel (W/m<sup>2</sup>),  $G_d$  el flujo de calor en el suelo diario (W/m<sup>2</sup>) (considerado igual a cero para la escala de tiempo diaria),  $fc$  es igual a 28,36 y es el factor de conversión de unidades de W/m<sup>2</sup> a mm/día, como se expresa comúnmente la  $ET_d$  (ET diaria).

Se utilizará este modelo ya que ha demostrado que para zonas de clima húmedo proporciona una performance aceptable en relación al método de referencia propuesto por *Allen et al.*, (1998) (*Ocampo et al.*, 2011).

Los datos necesarios para aplicar las ecuaciones [1] y [2] junto con otros datos meteorológicos fueron proporcionados por el Grupo de Teledetección del Instituto de Hidrología de Llanuras, también fueron consultados registros de la estación meteorológica de la Base Aérea Militar de Tandil. Para la obtención de datos del cultivo, tales como  $Y$ , fue necesario complementar con información suministrada por otras instituciones (Ministerio de Agroindustria de la Nación-Oficina de Riesgo Agropecuario) e informantes calificados como productores agropecuarios e ingenieros agrónomos

Para determinar  $HH_g$  se aplicará la ecuación propuesta por *Mekonnen y Hoekstra*, (2011):

$$HH_g = \frac{L}{(C_{max} - C_{nat}) \cdot Y} \quad [3]$$

siendo  $L$  la cantidad de nitrógeno aplicado al cultivo (kg/ha);  $C_{max}$  la concentración máxima de nitratos admitida por normativa nacional según el Código Alimentario Argentino (CAA) (kg/m<sup>3</sup>) y  $C_{nat}$  la concentración natural de nitratos en acuífero (kg/m<sup>3</sup>).  $L$  se obtendrá de las encuestas realizadas a productores e informantes claves (ej.: bolsas de cereales o empresas comercializadoras de fertilizantes).  $C_{nat}$  se fijará en base a la bibliografía, particularmente estudios de calidad de agua y fondo químico (*Saraceno et al.*, 2014; *Barranquero et al.*, 2015; *Zabala et al.*, 2015; *Zabala et al.*, 2016).

### 5.3.1 Cálculo de $HH_v$

De acuerdo a lo establecido en la ecuación [1] de  $HH_v$ , para su cálculo fue fundamental la estimación tanto de la  $ET_r$  ( $m^3/ha$ ) de todo el ciclo del cultivo, como del  $Y$  ( $t/ha$ ). En las siguientes líneas se describe de forma detallada el método implementado para la estimación de ambos componentes de la ecuación.

#### 5.3.1.1 Cálculo de $ET_r$

Con los datos diarios de  $T_a$  y  $HR$ , velocidad de viento,  $Rn_d$  y  $P_{atm}$  registrados en la EBE y la obtención de valores diarios de  $FE$ , se calcularon los términos necesarios para aplicar la ecuación [2].

La  $FE$  se define como la fracción de agua disponible para las plantas, de la cual éstas extraen tanto el agua como los nutrientes, siendo un indicador del estado de humedad del suelo. Dicho indicador, interviene en la compleja relación suelo-vegetación-atmósfera, donde la  $ET_r$  se rige por la energía disponible, la turbulencia del viento y la humedad del suelo en la zona radical (*Ocampo et al., 2012*). Desde el punto de vista energético, cuando el sistema dispone de humedad, la energía incidente es utilizada mayormente en el proceso de  $ET$ . Con poca o nula humedad de suelo, toda la energía se destina al flujo de calor sensible y la  $FE$  se aproxima a cero, mientras que tiende a tomar valores cercanos a 1 cuando la humedad del suelo es máxima (*Vogt et al., 2011*).

La  $FE$  del suelo se determinó según lo propuesto por *Ocampo et al., (2012)*, a partir del registro diario de la variación del peso del lisímetro instalado próximo a la EBE, la cual se consideró como la medida real “observada” de la disponibilidad de agua en el suelo. A partir de este dato, se aplicó la ecuación que se describe a continuación para estimar la  $FE$ :

$$FE_{lp} = \frac{(P_{di} - P_{min})}{(P_{max} - P_{min})} \quad [4]$$

donde,  $P_{di}$  es el peso del lisímetro de pesada registrado el día  $i$ ,  $P_{min}$  es el peso mínimo (sin agua en el perfil del suelo) y  $P_{max}$  es el peso máximo registrado en el lisímetro (capacidad de campo).

De esta manera se obtuvo el dato de FE diaria ( $FE_d$ ) para cada uno de los días de la campaña, aplicado posteriormente en la ecuación [2].

$\Delta$  se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(Ta+273,3)^2} \quad [5]$$

donde,

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 Ta}{Ta+273,3}\right) \quad [6]$$

siendo,  $Ta$  ( $^{\circ}K$ ) la temperatura del aire registrada.

Por otra parte, la estimación de  $\gamma$  se obtuvo utilizando el valor de  $P_{atm}$  (kPa) y se calculó como:

$$\gamma = \frac{C_p P_{atm}}{0,622 \lambda} \quad [7]$$

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

Finalmente,  $Rn_d$  ( $W/m^2$ ) corresponde a las medidas registradas por el sensor CNR1 de las EBEs.

Cada uno de los componentes de la ecuación [2] se calculó de forma diaria abarcando el ciclo completo del cultivo, desde el 15 de noviembre hasta el 31 de marzo, periodo estipulado según la información obtenida en las encuestas realizadas a productores de la zona del partido de Tandil. Esto permitió obtener la  $ETr$  de todo el ciclo del cultivo en ( $m^3/ha$ ), mediante la sumatoria de  $ETr_d$  ( $ETr$  diaria), producto de los valores de  $ETpt_d$  ( $ET$  de Priestley y Taylor diaria) y la  $FE_d$ .

### 5.3.1.2 Cálculo del Y del cultivo de soja

El dato de  $Y$  no se obtuvo de la parcela experimental, sino que fue producto de lo indicado por los productores y comerciantes agropecuarios, a fin de que sea un dato representativo, no influido por las potencialidades o limitaciones que podrían

existir o no en la parcela. Luego esta información fue validada con los datos oficiales, provenientes del Ministerio de Agroindustria de la Nación.

Obtenido el valor de  $E_{Tr}$  del ciclo del cultivo de soja ( $m^3/ha$ ) y el valor de  $Y$  ( $t/ha$ ) de dicho cultivo, se prosiguió a la aplicación de la ecuación [1] para el cálculo de  $HH_v$  a nivel de parcela.

### **5.3.2 Cálculo de $HH_g$ a nivel de parcela**

Para obtener el valor de  $HH_g$  a nivel de parcela, se aplicó la ecuación [3], siendo necesario en principio, estimar  $L$  aplicado por ha. Este dato fue facilitado por los productores locales y comerciantes de la zona mediante la realización de un cuestionario. Se utilizó este dato, ya que al igual que en el caso del valor de  $Y$ , esta información adquiere mayor representatividad, sin estar influenciado por factores o procesos propios de la parcela. El valor de  $C_{nat}$  fue obtenido de estudios ya realizados en el partido de Tandil, los cuales afirman que en promedio la concentración de nitrato es de 42 mg/l sobre una muestra de 32 pozos (*Saraceno et al., 2014*). Esto se debió a que dentro de la parcela no se contaba con ninguna perforación donde se pudieran medir la concentración de nitrato. Por último, el dato de  $C_{min}$  fue tomado del CAA argentino.

### **5.4 Cálculo a escala de partido de Tandil**

Una vez realizados los cálculos de  $HH_v$  y  $HH_g$  a nivel de parcela en base a datos de terreno, bibliografía analizada e informantes claves, los mismos se extendieron a escala de partido utilizando imágenes de satélite. A partir de éstas, se realizó una clasificación no supervisada, píxel a píxel, para identificar los cultivos de soja de secano en la campaña correspondiente. Posteriormente se aplicó una máscara para eliminar parcelas con otros cultivos que no sean requeridos para este estudio o correspondan a cultivos bajo riego. Se utilizaron imágenes de resolución espacial y temporal adecuadas a la escala de potrero/paisaje (Landsat, MODIS).

$E_{Tr}$  se calculó nuevamente en base a la ecuación [2], adaptada a datos de satélite (*Rivas y Carmona, 2010*).

Y fue estimado espacialmente con datos MODIS, 250 m de resolución espacial, utilizando el método de *Holzman et al.*, (2014), con errores del orden del 20%:

$$Y = C_1(TVDI)^2 + C_2TVDI + C_3 \quad [8]$$

donde *TVDI* es un índice de estrés hídrico (Temperature Vegetation Dryness Index) durante el período crítico del cultivo (floración y llenado de grano), calculado a partir de la temperatura radiativa de superficie e índice de vegetación,  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  son coeficientes dependientes de la región agro-ecológica que surgen del ajuste entre datos observados de *Y* y *TVDI* (*Holzman et al.*, 2014; *Holzman y Rivas*, 2016). Estos coeficientes ya han sido obtenidos para el área de estudio en *Holzman et al.*, (2014).

Los cálculos a nivel de parcela logrados, fueron utilizados para validar las estimaciones satelitales. Luego se confeccionaron mapas de *HHv* y *HH*.

#### **5.4.1. Identificación de parcelas de soja**

Para realizar el cálculo de *HHv* a escala de partido, en principio se realizó una clasificación no supervisada de datos captados por satélite con el objeto de diferenciar las parcelas sembradas con cultivo de soja de secano existente.

Para ello se utilizó una imagen de reflectividad de superficie Landsat 8 (resolución espacial de 30 m) de fecha 4 de enero de 2015, captadas por el sensor OLI, el cual capta la energía reflejada en bandas desde el Visible hasta Infrarrojo Medio. Las imágenes fueron obtenidas de <https://espa.cr.usgs.gov/>, considerando el área total del partido de Tandil como región de interés.

La elección de esta fecha coincide con el periodo fenológico de máximo desarrollo del cultivo de soja y máxima cobertura vegetal. En esta etapa la reflectividad es muy alta en el infrarrojo cercano, debido a la escasa absorción de energía por parte de las plantas en esta banda.

Teniendo en cuenta este comportamiento de reflexión que caracteriza a la vegetación, posteriormente se procedió al procesamiento de la imagen por medio de la utilización del software Environment for Visualizing Images (ENVI). Se elaboró una combinación RGB 543 (RGB, por sus siglas inglés, Red-Green-Blue),

denominada falso color compuesto, combinación que permite distinguir con mayor claridad las áreas con cobertura vegetal captadas en la imágenes. En esta composición la vegetación adquiere un color rojo intenso debido a, como se mencionó anteriormente, la alta reflectividad en el infrarrojo cercano y la baja en el visible del espectro electromagnético.

Mediante el método de clasificación no supervisada píxel a píxel se obtuvieron conglomerados conformados por píxeles con comportamiento espectral homogéneo, utilizando el algoritmo ISODATA.

A partir de ellos fue posible extraer la clase temática de interés, diferenciando con claridad las parcelas con cultivo de soja, respecto a otros usos de suelos existentes en el área. Posteriormente esto fue validado con las parcelas localizadas mediante las coordenadas geográficas brindadas por los informantes calificados durante las encuestas.

Luego la imagen producto de la clasificación no supervisada, fue sometida a un método de agregación que permitió su cambio de resolución de 30 m a 250 m, igualando la resolución con las imágenes MODIS utilizadas más adelante para el cálculo de ETr.

Por último, se utilizó esta imagen para construir una máscara binaria, en la cual los diferentes píxeles que conforman la imagen, son clasificados en base a la homogeneidad de los valores de reflectividad. De esta manera sólo se consideraron las parcelas con soja.

## **5.4.2 Cálculo de $HH_v$**

### **5.4.2.1 Estimación de ETr**

Para el cálculo de  $HH_v$  a nivel de partido, al igual que en el cálculo a nivel de parcela, fue necesario realizar previamente el cálculo de ETr a esta misma escala, como así también estimar Y.

El cálculo de ETr se logró utilizando la ecuación [2] simplificada,

$$ETr = ET_{pt} . FE \quad [9]$$

donde ( $ET_{pt}$ ) es la ET de Priestley y Taylor de todo el ciclo del cultivo, valor obtenido a partir de los cálculos realizados a nivel de parcela y que será considerado constante a escala de partido, debido a que a esta escala la variabilidad de los diferentes parámetros meteorológicos que influyen en la ET es casi nula, siendo éstos similares a los medidos en la parcela experimental. Por otro lado, la FE es la variable determinante de la espacialidad, la cual fue variando en las diferentes parcelas de interés dentro del partido, debido a la heterogeneidad de distintos factores que influyen en la humedad del suelo (tipos de suelos, profundidad del nivel freático, etc).

La FE a escala de partido se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$FE = 1 - TVDI \quad [10]$$

donde,  $TVDI$  es el índice de temperatura de sequedad de la vegetación (TDVI), que se sustenta en la relación inversa entre temperatura de superficie ( $T_s$ ) e índices de vegetación. El  $TVDI$  fue obtenido a partir de datos captados por el sensor remoto Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo del satélite AQUA, con una resolución espacial media de 250 m (*Rivas et al., 2005; Vazquez, 2013*). Los productos utilizados fueron: a) MYD11A2:  $T_s$  captada en un lapso de 8 días, resolución espacial de 1 km, utilizándose un total de 16 imágenes para todo el ciclo del cultivo (4 imágenes mensuales) b) MYD13Q1, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), captado en periodos de 15 días, resolución espacial 250 m, empleándose 8 imágenes para abarcar toda la campaña, significando 2 imágenes mensuales. El producto MYD11A2 fue remuestreado a 250 m para equiparar las resoluciones.

Para la estimación del  $TVDI$ , se utilizó la ecuación propuesta por *Sandholt et al., (2002)*, la cual establece:

$$TVDI = (T_s - T_{s_{min}})/(a + b \cdot NDVI - T_{s_{min}}) \quad [11]$$

siendo,  $T_{s_{min}}$  la temperatura de superficie mínima para una región dada,  $a$  y  $b$  son parámetros propios para el área de estudio y  $NDVI$  es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Dicho índice se fundamenta en la relación inversa entre  $T_s$  y  $NDVI$  para los píxeles contenidos en un área de estudio con heterogeneidad de grados de cobertura de vegetación y humedad del suelo (Figura 3). El índice asume valores entre 1, indicando mínima disponibilidad de agua en el suelo (límite seco, Figura 3), donde la  $FE$  y  $E_{Tr}$  es mínima y 0, indicando máxima disponibilidad de agua y máxima  $FE$  y  $E_{Tr}$  (límite húmedo).

En *Holzman et al.*, (2014) se demostró que el  $TDVI$  posee una alta correlación lineal con la humedad del suelo ( $H_s$ ) a distintas profundidades. De esta manera, el  $TDVI$  es un indicador de la variabilidad espacial del agua disponible para la  $ET$  del cultivo.

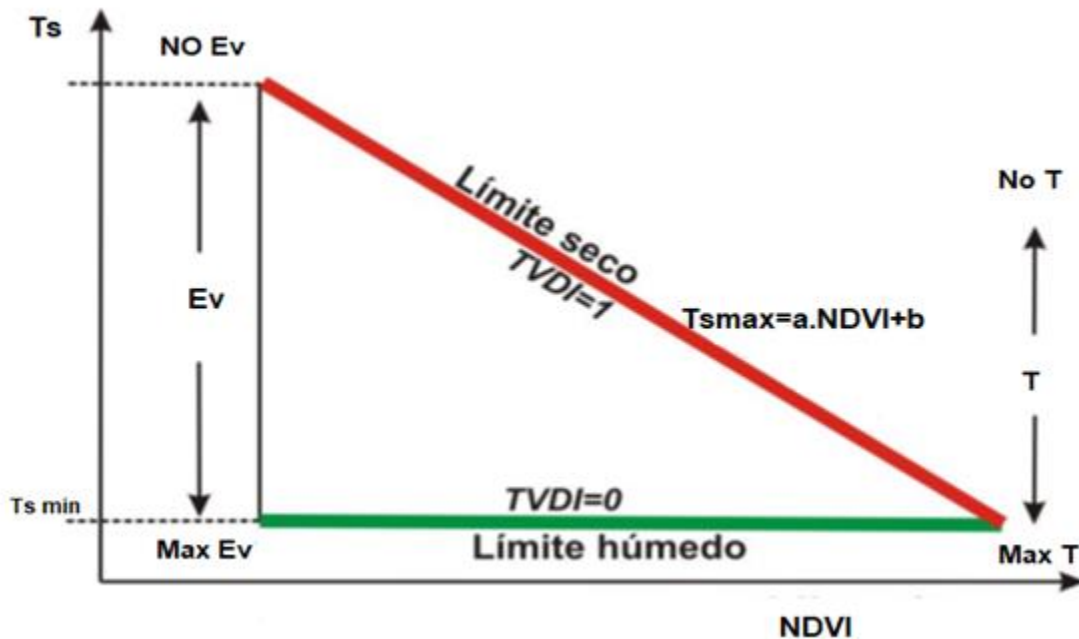


Figura 3. Relación  $T_s/NDVI$  y parámetros del índice  $TVDI$ . Ev: evaporación, T: transpiración. Tomado de *Holzman et al.*, (2014)

El  $NDVI$  se calculó con datos provenientes de imágenes MODIS, según la expresión propuesta por *Rouse et al.*, (1974):



$$NDVI = (IRC - R)/(IRC + R) \quad [12]$$

donde, *IRC* representa el índice de reflectividad del infrarrojo cercano y *R* es la reflectividad en el rojo.

El NDVI puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia a distintas longitudes de onda, y es particularmente sensible a la cubierta vegetal, de acuerdo a *Gilabert et al., (1997)*.

El utilizar este índice, tiene su fundamento en el particular comportamiento radiométrico de la vegetación. Una cubierta vegetal en buen estado de salud, tiene una firma espectral que se caracteriza por el contraste entre la banda del rojo (entre 0,6 y 0,7  $\mu\text{m}$ .), la cual es absorbida en gran parte por las hojas, y el infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,1  $\mu\text{m}$ .), que es reflectada en su mayoría. Esta cualidad de la vegetación permite la realización de su valoración cualicuantitativa.

En *Holzman et al., (2014)* se realizó un estudio regional multitemporal en el que se determinaron los parámetros (*a*, *b* y  $T_{s_{\min}}$ ) del TDVI. En ese estudio se compararon los parámetros mensuales. Dado que estos parámetros tienen una variación estacional, se determinaron los *a*, *b* y  $T_{s_{\min}}$  extremos para la Región Pampeana, que indican mínima y máxima *E<sub>Tr</sub>* para cada mes, respectivamente. Estos parámetros extremos permitieron el adecuado cálculo del TVDI en el periodo considerado en el estudio.

Logradas las 4 imágenes de TDVI para todo el ciclo de cultivo, finalmente se calculó la FE utilizando la ecuación [10], dando como resultado 4 imágenes mensuales de FE del partido de Tandil.

Estos valores de FE junto con el dato de  $ET_{\text{pt}}$  a nivel de parcela, obtenidos a partir de la sumatoria de  $ET_{\text{pt}_d}$ , permitieron aplicar la ecuación [9], obteniendo así 4 imágenes de *E<sub>Tr</sub>*, una por cada mes de la campaña.

Posteriormente se aplicó la máscara binaria en cada una de ellas para obtener la *E<sub>Tr</sub>* considerando solamente las parcelas sembradas con cultivo de soja. Este

valor se utilizó junto con el valor de Y para calcular posteriormente el  $HH_v$  a nivel de partido.

#### 5.4.2.2 Cálculo de Y

Como se mencionó anteriormente, existe una alta correspondencia entre el TDVI y la Hs. *Holzman et al.*, (2014, 2016) demostraron además, que el TDVI tiene alta incidencia en el rendimiento de un cultivo.

Esto hace posible, que a través del cálculo de TVDI pueda estimarse el rendimiento del cultivo de interés, en este caso soja, aplicando la ecuación [8] propuesta por *Holzman et al.*, (2014).

En la Figura 4 se muestra el ajuste TVDI-Y con los coeficientes ajustados para estimar el rendimiento de soja.

La ecuación [8] se aplicó en ENVI a partir de los datos de TDVI mensuales. El cálculo de Y se realizó teniendo en cuenta solamente los meses de enero y febrero, momento en el que el cultivo de soja es más vulnerable al estrés hídrico, que coincide con el periodo de floración y el desarrollo de la vaina de semilla.

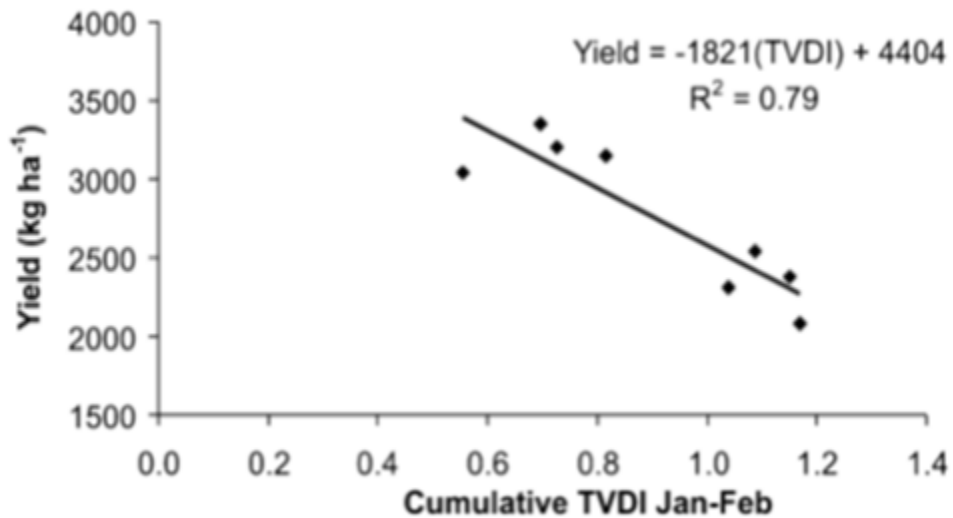


Figura 4. Gráfico de dispersión entre rendimiento de soja y TVDI acumulado del período crítico y ecuación utilizada para el cálculo espacial de Y a nivel de partido. Valores de rendimiento más elevados se corresponden con valores bajos de TDVI, es decir, alta disponibilidad de humedad de suelo. Tomado de *Holzman et al.*, (2014)

Finalmente, calculados la  $E_{Tr}$  y el  $Y$  a nivel de partido, se prosiguió a aplicar la ecuación [1], obteniéndose un valor de  $HH_v$  en esta misma escala.

#### **5.4.3 Cálculo de $HH_g$ a escala de partido**

El cálculo de  $HH_g$  se llevó a cabo aplicando nuevamente la ecuación 3. Al igual que el cálculo a nivel de parcela,  $L$  procede de las encuestas realizadas, en tanto  $C_{min}$ , se obtuvo del CAA. En el caso de  $C_{nat}$ , como se mencionó con anterioridad, se utilizaron los datos aportados por estudios de calidad de agua ya realizados en el partido, considerando que en promedio la concentración de nitratos en las aguas subterráneas del partido de Tandil, durante el año 2013, fue de 42 mg/l.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 6.1 Cálculos a nivel de parcela

#### 6.1.1 Resultados de las encuestas

En el caso de los comerciantes en su mayoría cuentan con más de 8 años dedicados a la venta de fertilizantes nitrogenados, fosfatado, azufrados y mezclas químicas. En el cultivo de soja se prioriza la fertilización fosfatada en la etapa de pre-siembra, como arrancador para promover un buen desarrollo temprano al establecerse el cultivo. Por esto se comercializan fertilizantes en los que el elemento predominante es el fósforo (P), con concentraciones que rondan el 43%, como el fosfato monoamónico ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), fosfato diamónico  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  y mezclas químicas que poseen concentraciones de azufre (S) y nitrógeno (N) pero en menor proporción, ya que si bien el mejor efecto de arranque proviene del P, la mejor sinergia se obtiene con la aplicación de concentraciones menores de S y N.

La utilización de estos fertilizantes fosfatados, particularmente en el cultivo de soja, varía entre los 60 y 70 kg/ha para la campaña 2014/2015, de acuerdo a los estudios de suelo que realizan los productores.

En las encuestas realizadas a productores, estos concordaron en que el fertilizante aplicado para cultivo de soja es fosfatado siendo necesarios fundamentalmente durante la etapa emergente de la planta.

En promedio estos productores poseen más de 15 años en la actividad agropecuaria y la mayoría de ellos son asesorados por ingenieros agrónomos, quienes les informan sobre la dosis necesaria de fertilizante a aplicar, las cuales a diferencia de lo estimado por los comerciantes, ronda entre los 40 y 80 kg/ha para lograr un rendimiento promedio de 2500 kg/ha. Esta variabilidad se debería, según los productores, a que la mayoría del P aplicado permanece en el suelo, siendo acotada la proporción que queda disponible para la planta.

El precio, el rendimiento estimado, las deficiencias de fertilidad del suelo y exigencias climáticas también influyen en el aumento o disminución del consumo de fertilizantes en cada campaña.

En cuanto a la fecha de siembra, tanto los comerciantes como los productores la situaron en días correspondientes a la segunda quincena de noviembre, mientras que la cosecha se llevaría a cabo a fines del mes de marzo en condiciones de tiempo favorable.

## **6.1.2 Cálculo de HHv**

### **6.1.2.1 Cálculo de ETr**

Considerando que se desea calcular la ETr a nivel de parcela, en principio se utilizaron los datos de  $R_{nd}$ ,  $P_{atm}$  y  $T_a$  registrados por la EBE (Anexo III) para cada uno de los días del ciclo del cultivo, período que abarcó desde el 15 de noviembre hasta el 31 de marzo, momento en que la soja es cosechada.

En la Figura 5 se puede observar, que la variación temporal de  $P_{atm}$  se mantuvo en valores cercanos a 99,4 kPa, promedio determinado a través de los datos registrados en la estación meteorológica ubicada en la Base Aérea Militar de Tandil para el periodo de tiempo analizado.

En cuanto a la  $T_a$  el valor más bajo de temperatura máxima diaria ( $T_{a_{max}}$ ) se registró en el mes de noviembre, siendo de 14, 2°C, mientras que en los meses de enero y febrero se registraron  $T_{a_{max}}$  más elevadas, con valores de 32,6 °C y 31,5 °C, respectivamente. Sin embargo durante todo el ciclo del cultivo no hubo variaciones de  $T_a$  diarias significativas. La  $T_a$  determina en gran parte la demanda atmosférica de agua, por lo tanto las temperaturas elevadas durante este periodo aumenta la probabilidad de déficit hídrico.

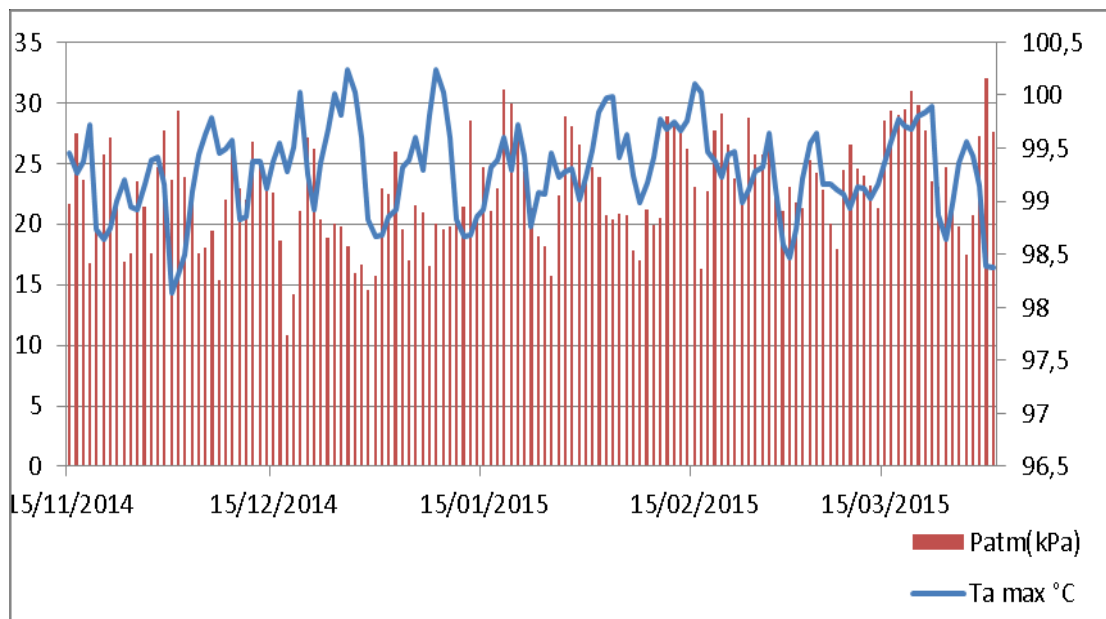


Figura 5. Gráfico de variación diaria de  $Ta_{max}$  y  $P_{atm}$  durante el período analizado.

Teniendo en cuenta entonces la información meteorológica del Anexo III, en primera instancia se procedió al cálculo de  $\Delta$  y  $\gamma$  siendo ambos, junto con  $R_{nd}$ , parámetros necesarios para la estimación de la  $ET_o$  según Priestley y Taylor.

Para la obtención de FE, se empleó la ecuación [4] sumado a los datos de pesadas diarias del lisímetro instalado en la EBE, considerando además el peso máximo (313.200 g) y mínimo del lisímetro (262.400 g).

El resto de los parámetros son constantes, por lo que no fue necesaria la implementación de ecuaciones para su estimación.

De esta manera se elaboró una tabla con los valores diarios de cada uno de los componentes de la ecuación [2] (Anexo IV), donde como se puede observar, se calculó  $ET_{pt_d}$  y  $ET_{r_d}$ .

Analizando la variación temporal de  $R_{nd}$  y FE, se pudo establecer una relación entre ambas variables (Figura 6). Durante los primeros días del mes de diciembre, la FE disminuye de manera abrupta, recuperándose paulatinamente en el mes de enero. Los valores bajos de FE (0,6-0,7) permanecieron durante todo el mes de

enero y principios de febrero, mientras que los valores de  $R_{nd}$  alcanzaron sus valores más altos durante este mismo período.

Posteriormente, en la última etapa del ciclo del cultivo, cuando comienza la etapa de maduración de la planta, se observa un crecimiento en la FE.

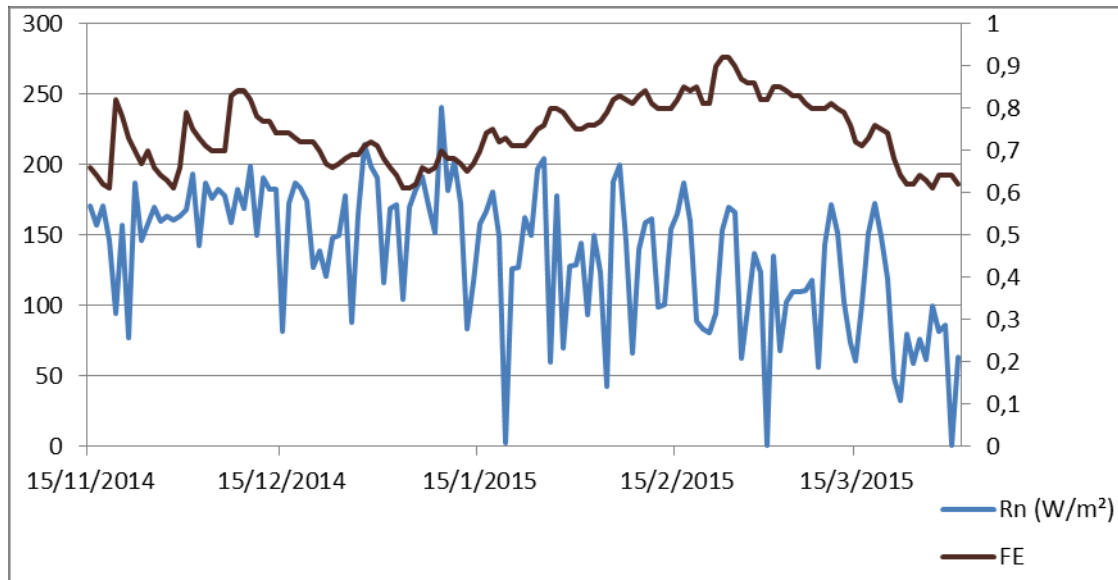


Figura 6. Comparación de la evolución de FE y  $R_{nd}$  durante la campaña.

Finalmente, se calculó la  $ET_{pt}$  y  $ET_r$  acumulada para todo el ciclo del cultivo de soja, a través de la sumatoria de los valores diarios obtenidos (Anexo IV), dando como resultado un valor de 6052  $m^3/ha$  y 4477  $m^3/ha$  respectivamente.

Como se puede observar en la Figura 7 la variación de la  $ET_r$ , es muy similar a la variación temporal de  $R_{nd}$ , estableciéndose una relación directamente proporcional, es decir, valores altos de  $R_{nd}$  se corresponden con valores altos de  $ET_r$  y a la inversa.

En los meses de enero, principios de febrero y parte de marzo se observa menor  $ET_r$ , coincidente con los bajos valores de FE antes descritos, lo cual indicaría la existencia de déficit hídrico (Figura 7).

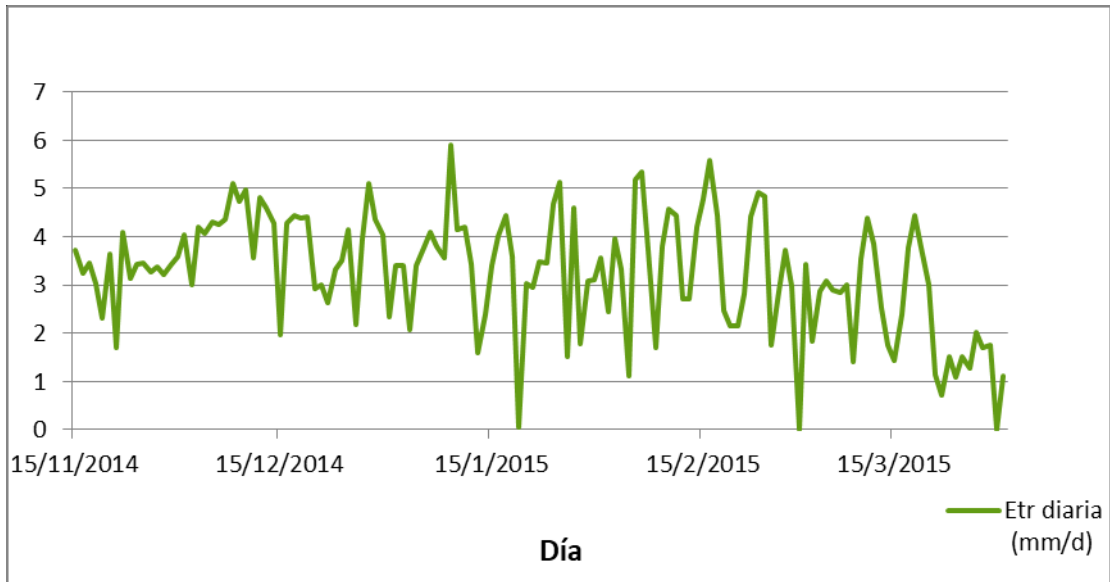


Figura 7. Variación temporal de la ETr diaria durante el ciclo de cultivo de soja.

#### 6.1.2.2 Cálculo de Y

El valor de Y utilizado a nivel de parcela fue el indicado por los encuestados, el cual corresponde a 2500 kg/ha. Si bien este dato no fue unánime para todos los productores y comerciantes, representó el 73 % de las encuestas, siendo además un valor de rendimiento cercano al promedio de los valores encuestados, el cual fue de 2515 kg/ha.

Cabe destacar que el Y máximo estipulado para el área de Tandil durante la campaña 2014/2015 fue de 2770 kg/ha, sin embargo, según información brindada por el Ministerio de Agroindustria, el Y alcanzado por ha en este periodo, no superó los 2100 kg/ha.

#### 6.1.2.3 Cálculo de HHv a nivel de parcela

Para efectuar el cálculo de HHv, el valor de ETr para todo el ciclo del cultivo calculado en mm, fue llevado a m<sup>3</sup>/ha, en tanto que el valor de Y se utilizó en t/ha tal como lo requiere la ecuación [1]. Finalmente el valor de HHv a nivel de parcela fue de 1791 m<sup>3</sup>/t.



### 6.1.3 Cálculo de HHg

Durante el desarrollo de este trabajo se ha logrado establecer que a diferencia de otros cultivos, la soja en particular por ser una leguminosa cuya semilla es inoculada, no requiere la aplicación de fertilizantes nitrogenados, dado que mediante la inoculación se logra la incorporación efectiva de un alto número de bacterias del suelo que fijan el nitrógeno (N) atmosférico sobre la superficie de las semillas de soja previo a la siembra de las mismas. Cabe destacar que la fertilización nitrogenada en este caso puede causar exceso de nitrógeno lo que impediría la nodulación de la planta y el desarrollo de la misma. Por dicho motivo, este elemento no es trascendente para el cálculo del HHg, solo se utiliza en cantidades menores, al igual que el S, para aumentar el desempeño de P.

En el cultivo de soja se prioriza la fertilización fosfatada, utilizando en su mayoría fosfato monoamónico ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) y fosfato diamónico  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  debido a que P es un componente crítico para lograr un crecimiento rápido y un desarrollo adecuado de la parte aérea, de las raíces, de los nódulos, aumentando así los rendimientos del cultivo y cuya disponibilidad se va reduciendo en forma progresiva con cada cosecha. En el caso de la soja entonces, es el P el elemento relevante. Un aspecto a destacar, ya que en la temática de HH, para el cálculo del HHg es habitual el uso de N como parámetro de control.

Sin embargo, teniendo en cuenta los estudios realizados por *Sainz Rozas et al., (2012)* los valores de P registrados en el Sur-sureste de Buenos Aires fueron los más bajos registrados en toda la Región Pampeana. Sumando a esta progresiva escasez natural, se destaca, tal como afirma *Rubio (2002)*, su relativa escasez edáfica, la falta de reposición natural y la elevada retención por parte de la matriz del suelo, originando que este elemento se desplace muy poco, permaneciendo cerca de su lugar de origen, contrariamente a lo sucedido en el caso del N, cuyo movimiento relativo en el suelo es mayor.

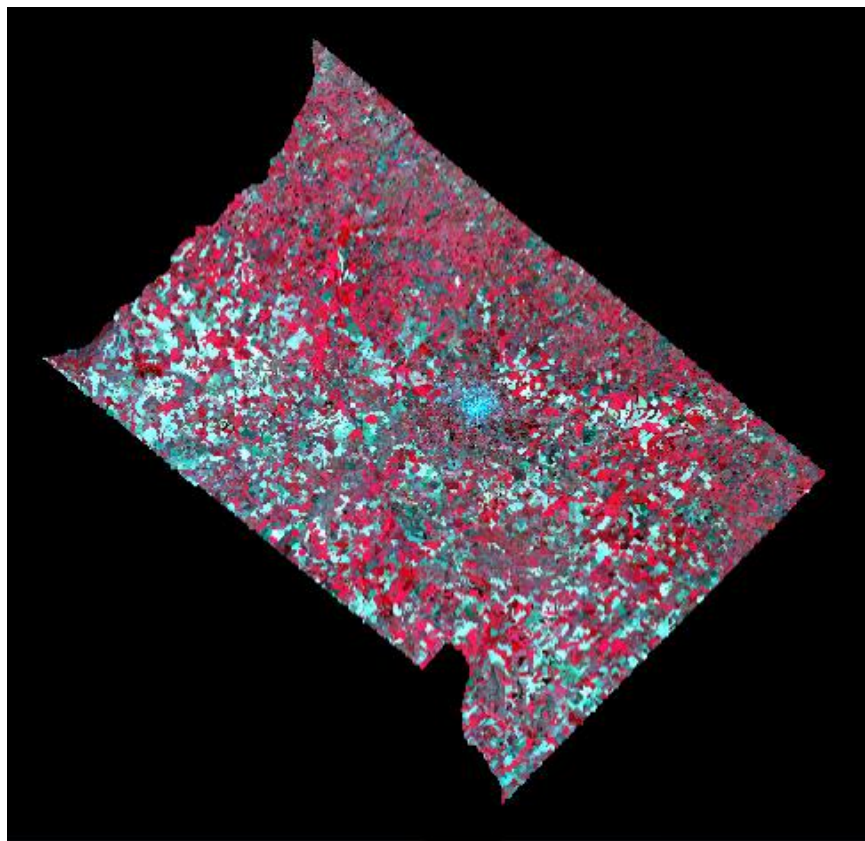
Debido a esto, las posibilidades de encontrar P en exceso en aguas subterráneas, es casi nula, por lo tanto, no justificando el uso de este elemento para el cálculo de HHg, no solo a nivel de parcela sino también a nivel de Partido.

## **6.2 Cálculos a nivel de partido**

En este apartado se presentan los mapas de HHv logradas a partir de datos de satélite para el partido. El cálculo de HHg no fue realizado, considerando los resultados arrojados por las encuestas y lo expuesto a nivel de parcela.

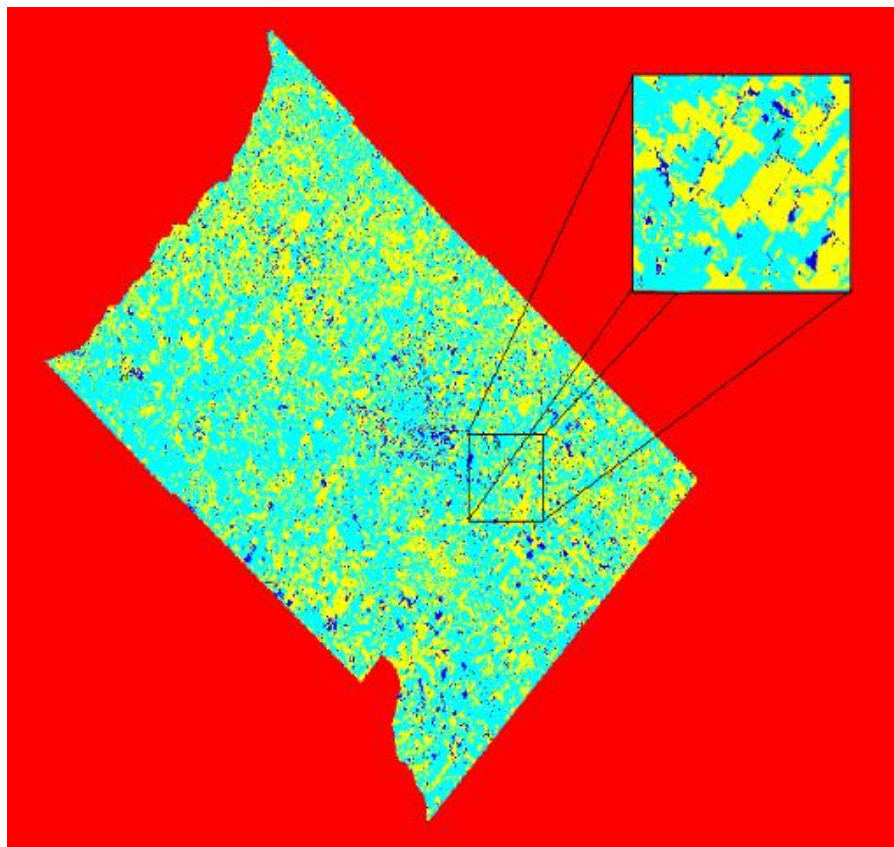
### **6.2.1 Identificación de parcelas con cultivo de soja**

En principio para distinguir parcelas cultivadas se realizó una composición falso color compuesto. En la Figura 8 se puede observar la vegetación en distintas tonalidades de rojos, desde rojo intensos, representando la cobertura vegetal más densa, hasta rojos más claros para vegetación menos densa. El celeste corresponde a suelo desnudo, zonas rocosas o urbano, el cual se manifiesta con mayor nitidez en el centro de la imagen, donde se sitúa el casco urbano. Los colores verdes o verdes azulados corresponden a parcelas aradas o suelos descubiertos. Por último, el azul oscuro a negro se relaciona con cuerpos de agua o cursos de agua, los cuales por la época del año en que fue captada la imagen, es posible que no se distingan con claridad debido a la vegetación que los circunda.



*Figura 8.* Recorte del partido de Tandil. Imagen Landsat 8, 15/01/2015. Composición RGB 543: color rojo zonas con cobertura vegetal, color celeste zonas de suelo desnudo-roca o urbano, color verde zonas de suelo descubierto o arado.

Una vez obtenida esta imagen, se llevó a cabo sobre la misma, una clasificación no supervisada ISODATA (Figura 9), donde, en color amarillo se observan las parcelas cultivadas con soja, el color celeste se corresponde con distintos usos de suelo y edificaciones. Finalmente, el color azul representa cuerpos de agua o suelos con alto contenido de humedad debido al uso de riego o por encontrarse bajo condiciones de anegamiento.



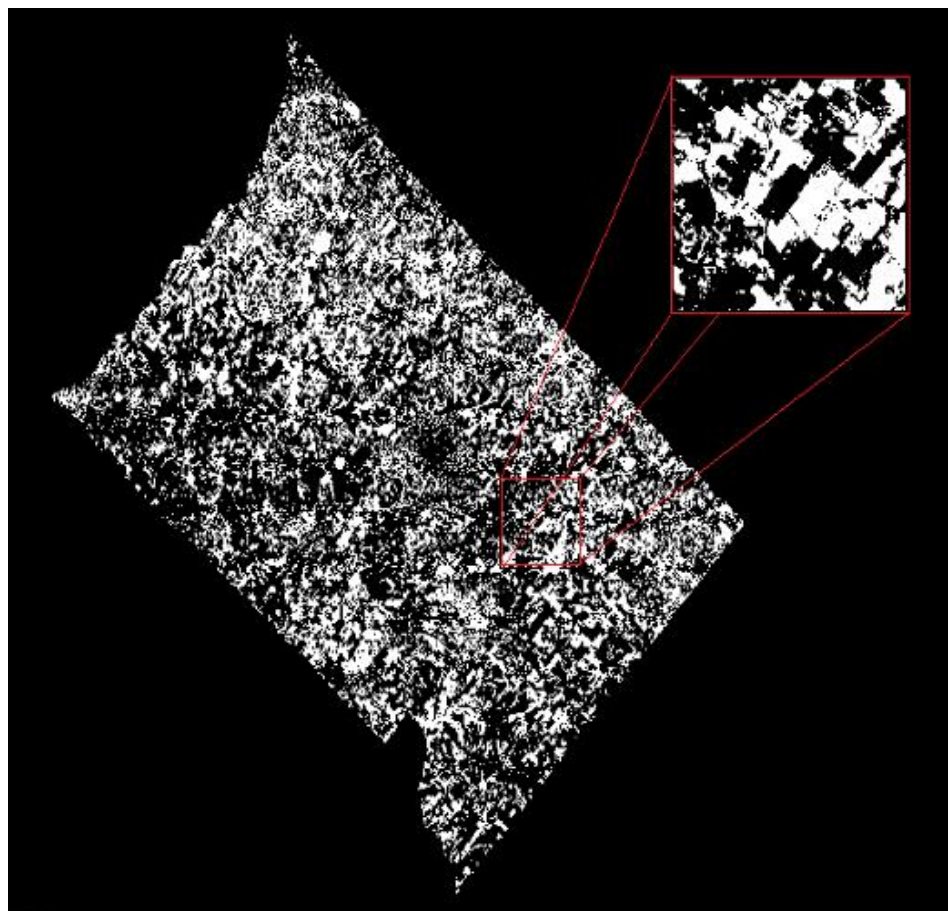
*Figura 9.* Clasificación no supervisada a escala de partido. En amarillo se distinguen las parcelas cultivadas con soja, en celeste zonas destinadas a otros usos de suelo y en azul cuerpos de agua o suelo con alto contenido de humedad.

Si se comparan las Figuras 8 y 9, se puede observar que las parcelas con soja (Figura 9) coinciden con las parcelas que poseen un tono rojo intenso en la Figura 8. Esto se debe a la particularidad que poseen las plantas de reflejar la luz solar en el Infrarrojo cercano, sobre todo cuando la vegetación se encuentra en su estadio de máxima cobertura.

Posteriormente, se localizaron en el Google Earth las parcelas cultivadas con soja durante la campaña 2014/2015, según las coordenadas indicadas en los cuestionarios por los encuestados. Producto de esto, se delimitaron 6 parcelas de cultivo en diferentes sectores del partido, información que coincidió con la clasificación realizada, validando la misma.

Empleando la imagen de la clasificación no supervisada, se generó una máscara, resultando una imagen binaria donde se identifican con claridad los suelos

ocupados con cultivo de soja en color blanco y los píxeles clasificados como otros usos de suelo, coloreados en negro (Figura 10).



*Figura 10.* Máscara binaria. En color blanco se observan las parcelas con cultivo de soja a nivel de partido, mientras que el color negro representa otros usos de suelo.

## 6.2.2 Cálculo de HHv

### 6.2.2.1 Cálculo de ETr

Una vez realizada la correspondiente diferenciación de las parcelas de cultivo a nivel de partido, se llevó a cabo el cálculo de la ETr, aplicando la ecuación [9].

La ET<sub>pt</sub> utilizada fue la obtenida a través de los cálculos a nivel de parcela, cuyo valor es de 6052 m<sup>3</sup>/ha durante todo el ciclo del cultivo. Este valor se consideró constante para toda la región de interés, debido a la escasa variación de los parámetros meteorológicos que la condicionan.

A continuación se calculó FE, la cual no se consideró homogénea para toda la región, si no que varía, generando valores de ETr igualmente heterogéneos.

Para la obtención de TDVI se promediaron 4 imágenes de Ts y 2 de NDVI para lograr una única imagen mensual de TDVI. Por lo tanto, para abarcar todo el ciclo del cultivo, se utilizaron 4 imágenes mensuales de TDVI, descartando la última quincena del mes de noviembre (Figura 11).

Cabe destacar que las imágenes de Ts y NDVI utilizadas no se exhibieron en los resultados, ya que su exposición en este trabajo se considera irrelevante para la comprensión del mismo.

Analizando la Figura 11, en el mes de enero, existe una preponderancia de sectores de suelo húmedo (representado en color celeste), los cuales disminuyen en el mes de febrero, persistiendo esta tendencia durante el mes de marzo, donde se observa parcelas color rojo, representando valores más elevados de TDVI, lo que se traduce en un descenso de la Hs.

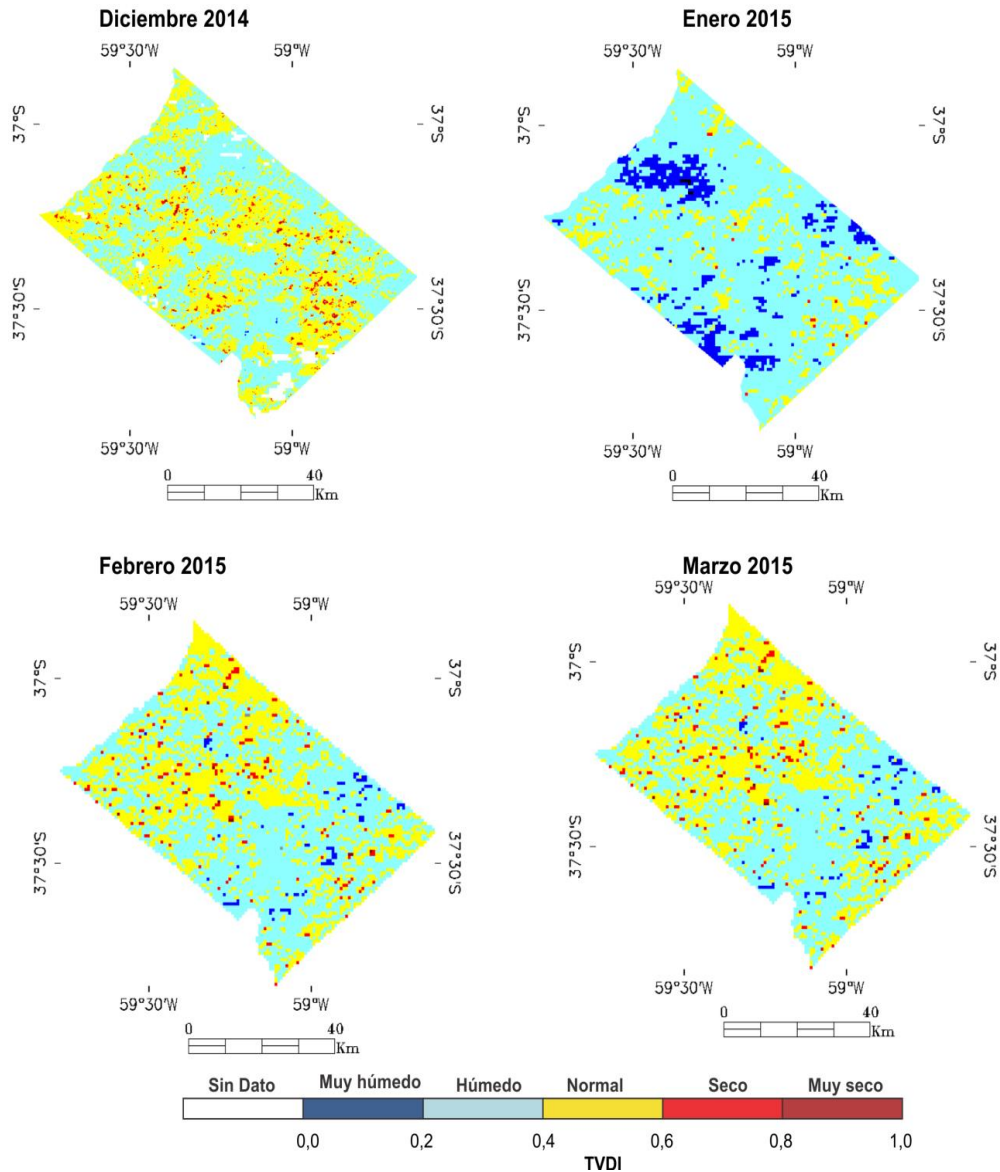


Figura 11. Imágenes mensuales de TVDI.

Logradas las 4 imágenes de TDVI, una por cada uno de los meses de la campaña, se calculó la FE para cada uno de estos meses (Figura 12). Dada la relación existente entre TDVI y FE, en la Figura 12 se presenta el mismo patrón, parcelas con valores de FE cercanos a 1, es decir, suelos con alto contenido de humedad en el transcurso del mes de enero, disminuyendo en el mes de febrero, situación que se intensifica durante el mes de marzo, observándose suelos cuyo contenido de humedad es más bajo.

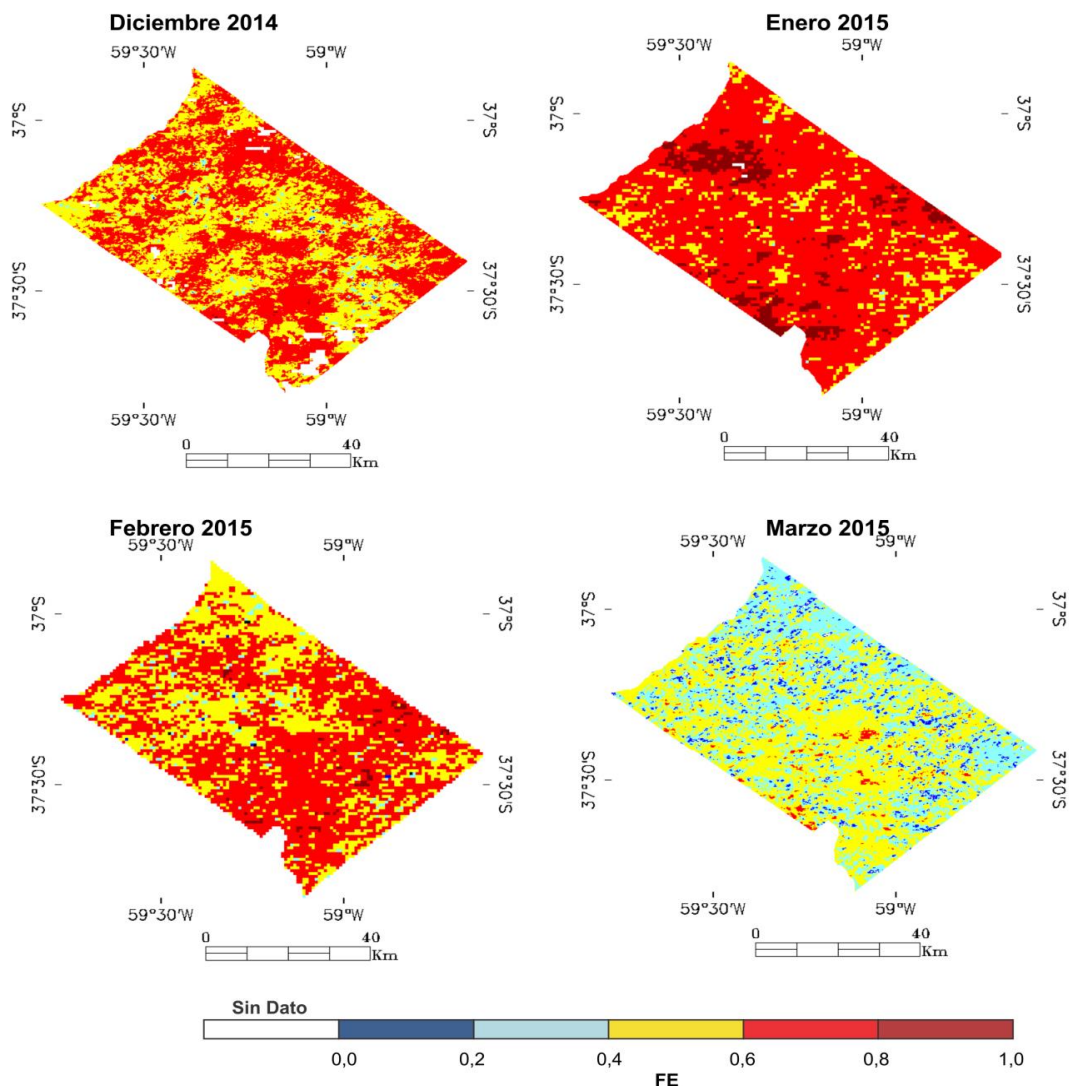


Figura 12. Imágenes mensuales FE

Finalmente con el valor de  $ET_{pt}$  y las 4 imágenes de FE obtenidas, aplicando la ecuación [9], se generaron 4 imágenes de  $ET_r$  para cada una de las parcelas del partido. Empleando la máscara binaria posteriormente, se pudo discriminar aquellos suelos destinados a otros usos, dando como resultados entonces 4 imágenes de  $ET_r$  considerando solamente las parcelas cultivadas con soja (Figura 13). Se observa que en el mes de diciembre se distinguen en color verde parcelas donde la  $ET_r$  no excede los 180 mm, lo cual se modifica en el mes de enero, siendo este el mes con mayor  $ET_r$ , en comparación con los demás meses de la



campaña. La predominancia de parcelas donde la ETr alcanza valores cercanos a 450 mm (expresadas en color rojo), lo evidencia.

Esto se condice con los resultados arrojados en las imágenes de la Figura 12 para el mes de enero, es decir, altos valores de FE y por lo tanto de Hs que permiten un incremento de la ETr.

En febrero y marzo, si bien existe una disminución de la ETr, los valores siguen siendo elevados. Teniendo en cuenta este dato y considerando la disminución de la FE durante estos meses, se explica la existencia de déficit hídrico, situación coincidente con los resultados observados a nivel de parcela.

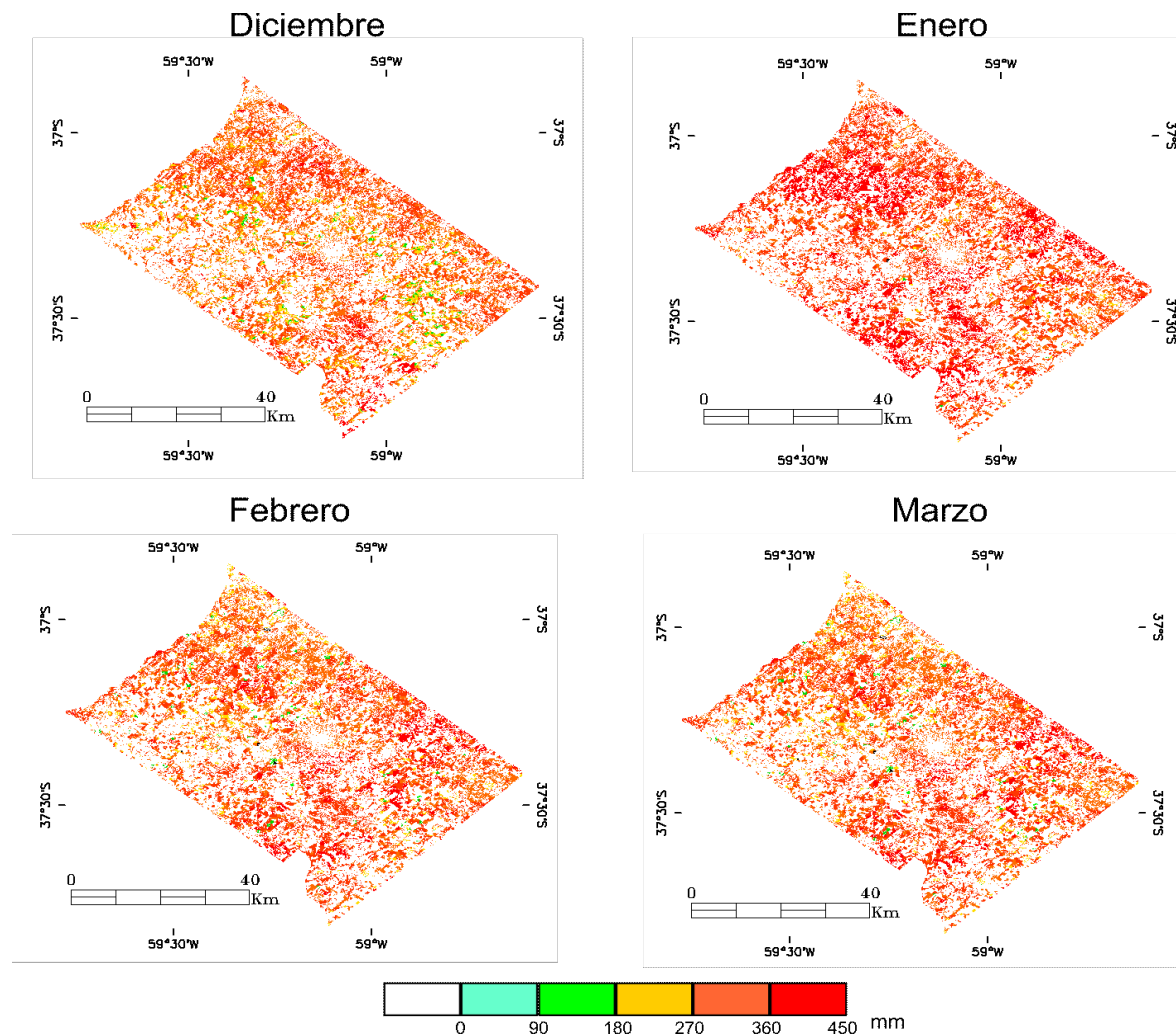


Figura 13. Imágenes mensuales de ETr para parcelas de soja.

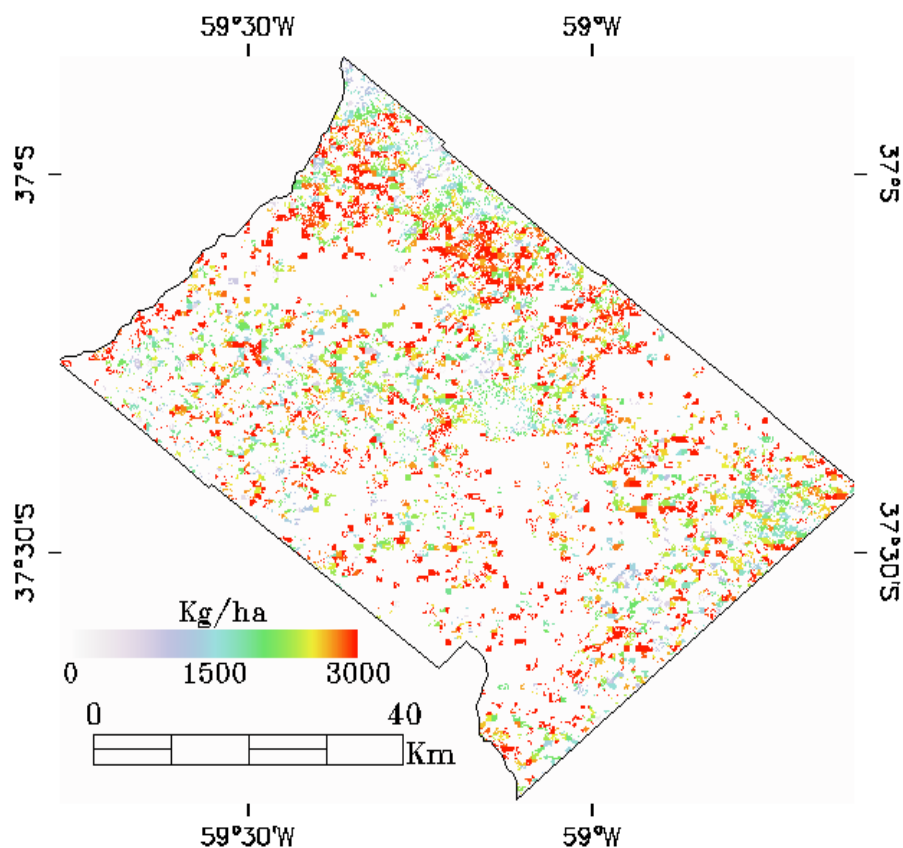
### 6.2.2.2 Cálculo de Y

El cálculo de Y a nivel de partido, se logró aplicando en la ecuación [8], los coeficientes  $C_2$  y  $C_3$  junto con el dato de TVDI acumulado durante el mes de enero y febrero (Figura 11):

$$\text{Rendimiento} = -1990.1\text{TVDI} + 4260.5 \quad [13]$$

donde  $TVDI$  es el TVDI mensual acumulado de enero y febrero. Es importante indicar que en este caso en particular el coeficiente  $C_1$  es cero tal como se observó en la Figura 4.

Esto permitió generar una imagen de Y, la cual se enmascaró para obtener finalmente una imagen con los Y de cada una de las parcelas del partido (Figura 14). La Figura 14 muestra en color rojo las parcelas que han producido elevados rendimientos, concentrándose principalmente en el sector Norte y Noreste del partido de Tandil. Por otra parte, las parcelas color celeste se corresponden con Y más bajos y se sitúan cercanas al límite con el partido de Rauch y otras rodeando al casco urbano. En el resto del partido los valores de Y variaron entre los 1400 kg/ha en los casos menos favorables, y 2700 kg/ha en zonas de rendimiento óptimo.



*Figura 14.* Imagen de rendimiento de soja en el partido de Tandil, durante la campaña 2014/2015. Las parcelas con rendimientos menores a 1600 kg/ha figuran en color celeste, en verde parcelas con rendimientos no superiores a 2100kg/ha, en una tonalidad amarillo-anaranjado rendimientos cercanos a los 2800 kg/ha, por último, en rojo se observan parcelas con rendimientos cercanos a los 3000 kg/ha.

### 6.2.2.3 Cálculo de HHv

Obteniendo la ETr acumulada por medio de las 4 imágenes mensuales de ETr expuestas en la Figura 13, junto con el dato de Y, se estimó HHv a nivel de partido utilizando la ecuación [1] dando como resultado el mapa de HHv (Figura 15).

Los sectores en color violeta corresponden a parcelas con valores de HHv de 650 m<sup>3</sup>/t, en color celeste aquellas con valores de HHv cercanos a las 950 m<sup>3</sup>/t, en verde parcelas cuyo consumo de HHv es de 1250 m<sup>3</sup>/t, en color amarillo parcelas con un consumo de 1550 m<sup>3</sup>/t y en rojo parcelas donde HHv se encuentra próxima

a 1800 m<sup>3</sup>/t, las que se sitúan en su mayoría al Oeste limitando con el partido de Benito Juárez y al Sur, limitando con el partido de Necochea. Aquella parcelas que se encuentran rodeando la ciudad de Tandil, también poseen un consumo de HHv dentro de los más altos, sin embargo no así Y, que en promedio no superaría los 1650 kg/ha (Figura 14).

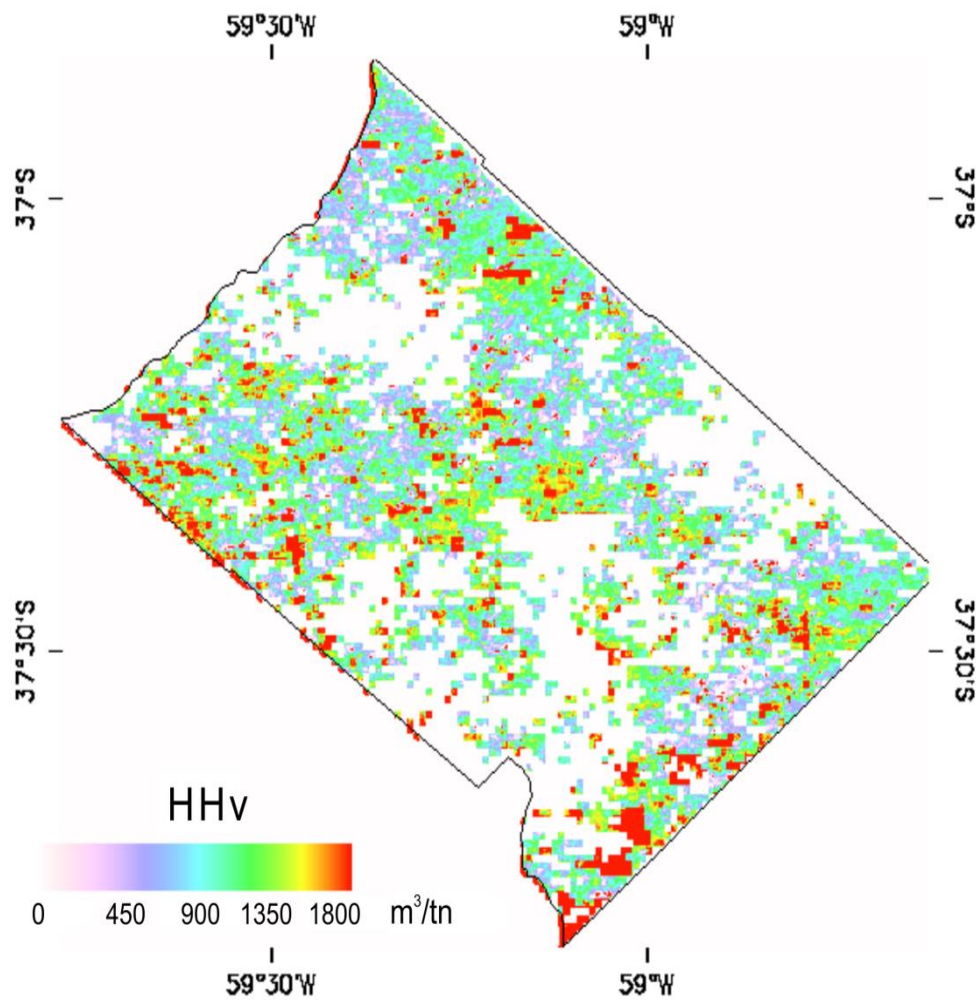


Figura 15. Imagen de HHv consumida por parcela de soja, en el partido de Tandil, durante la campaña 2014-2015. Blanco corresponde a parcelas sin soja.

Es importante destacar que según *Aldaya (2010)* el consumo de HHv con respecto al cultivo de soja en Argentina fue 1298 m<sup>3</sup>/t, valor que es superado en el caso de algunas parcelas del partido, mientras que en otras el consumo de HHv resulto muy por debajo del mencionado.

## 7. CONCLUSIONES

---

Mediante la realización de este trabajo de investigación se ha logrado implementar de forma satisfactoria los conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera, haciendo mayor hincapié en la temática de la teledetección, recursos hídricos y economía ambiental, pero siempre desde un enfoque multidisciplinario, requerido para abordar la complejidad intrínseca de toda problemática ambiental.

En lo que respecta al cálculo de  $HH_v$ , se aplicó el Modelo de *Priestley y Taylor (1972)* adaptado a la teledetección por *Rivas y Carmona (2010)* para la correcta estimación de  $E_{Tr}$ , resultando una ecuación de evaporación de simple aplicación y que requiere menos variables en relación a la recomendada por el Manual N° 56 de la FAO.

Por otra parte, el rendimiento del cultivo a escala de partido se estimó espacialmente con datos captados por el sensor MODIS utilizando el método de *Holzman et al., (2014)* que permitió obtener resultados favorables, de gran exactitud, con los cuales se confeccionó un mapa de rendimiento.

Ambos son aciertos alentadores surgidos en el marco del desarrollo de este trabajo, que permiten simplificar y dinamizar los cálculos de  $HH_v$ ,  $HH_g$  y consecuentemente de  $HH$  a diferentes escalas.

Obtenidos los datos de  $E_{Tr}$  e  $Y$  se elaboró un mapa de  $HH_v$  donde se presentan los diferentes valores de  $HH_v$  consumida en cada una de las parcelas con cultivo de soja del partido de Tandil durante la campaña 2014/15. Estos valores indicarían que el consumo de  $HH_v$  fue de  $650 \text{ m}^3/\text{t}$  y hasta  $1800 \text{ m}^3/\text{t}$  en algunas parcelas, lo cual implica que para producir 1kg de soja se consumió entre 650 l y 1800 l.

En lo que respecta al cálculo de  $HH_g$  utilizando nitrógeno como parámetro de control, no es aplicable en el caso del cultivo de soja. Debido a esto la  $HH$  de este cultivo de secano tendería a ser igual al valor de  $HH_v$ .

Es necesario profundizar el estudio de la HHg, considerando para su estimación la aplicación de herbicidas como el glifosato, que de la misma manera que los fertilizantes, pueden potencialmente afectar el recurso hídrico, trayendo aparejado una larga lista de impactos ambientales negativos.

## 8. REFERENCIAS

---

- Aizen, M. A., Garibaldi, L. A. y Dondo, M. (2009).** Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina. *Ecología austral*, 19(1), 45-54.
- Aldaya, M. M., Allan, J. A. y Hoekstra, A. Y. (2010).** Strategic importance of green water in international crop trade. *Ecological Economics*, 69(4), 887-894.
- Aldaya, M. M., Niemeyer, I. y Zarate, E. (2011).** Agua y Globalización: Retos y oportunidades para una mejor gestión de los recursos hídricos. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros*, (230), 63-83.
- Allen, R. G. (2006).** Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998).** Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109
- Altieri, M. A. (2001).** Biotecnología agrícola: mitos, riesgos ambientales y alternativas. *Ecología política*, (21), 15-42.
- Altieri, M. A. (2009).** Escalonando la propuesta agroecológica para la soberanía alimentaria de América Latina. *Agroecología*, 4, 39-48.
- Anschau, R. A., Bongiovanni, R., Tuninetti, L., Manazza, J. F. y Mercedes, R. V. (2015).** HUELLA HÍDRICA DE LA CADENA DE MANÍ EN ARGENTINA. Jornada Nacional de Maní. 30. 2015 09 17, 17 de setiembre 2015. General Cabrera, Córdoba. AR.
- Barranquero, R., Varni, M., Pardo, R., Vega, M., Zabala, M.E., Ruiz de Galarreta, V.A. (2015).** Joint interpretation of the hydrochemistry of two neighbouring basins by N-way multivariate methods. *Environmental Earth Sciences*, 75, 335
- Bayala, M. I., Rivas, R. E. y Scavuzzo, M. (2013).** Generación de mapas de temperatura de alta resolución mediante técnicas de remuestreo. *Interciencia*, 38(7).
- Brito, L. A., Iribarnegaray, M. A., Barboza, A. S. y Seghezzo, L. (2015).** Huella del agua del cultivo de tabaco en el área metropolitana del Valle de Lerma, provincia de Salta. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.



**Bruntland, G. H. (1987).** Informe Brundtland. Editorial: OMS Washington.

**Burkart, R., Bárbaro, N. O., Sánchez, R. O. y Gómez, D. A. (1999).** Eco-regiones de la Argentina. Presidencia de la Nación-Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable-Administración de Parques Nacionales.

**Capalbo, L. (2000).** Desarrollo: del dominio material al dominio de las ilimitadas potencialidades humanas. M. Acevedo, A. Elizalde, et al., El resignificado del desarrollo. Buenos Aires: UNIDA.

**Carmona, F. (2013).** Desarrollo de un modelo general para la estimación de la radiación neta con imágenes de satélite. Tesis Doctoral. Facultad de Física, Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Universidad de Valencia. [Inédita]

**Carmona, F., Rivas, R. y Caselles, V. (2013).** Estimate of the alpha parameter in an oat crop under rain-fed conditions. *Hydrological Processes*, 27 (19), pp. 2834-2839. DOI:10.1002/hyp.9415. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.9415/abstract>

**Carmona, F., Rivas, R. y Kruse, E. (2017).** Estimating daily net radiation in the FAO Penman-Monteith method. *Theoretical and Applied Climatology*. First online: 03 March 2016, Vol. 129, Issue 1-2, 1 July 2017, pp 89-95. DOI: 10.1007/s00704-016-1761-6. ISSN 0177-798X.

**Carmona, F., Rivas R., Ocampo D., Schirmbeck J. y Holzman M. (2011).** Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. *Aqua – LAC, Journal of the International Hydrological Programme for Latin America and Caribbean*, vol. 3, nro. 1. ISSN 1688-2873.

**Ceccon, E. (2008).** La revolución verde: tragedia en dos actos. *Ciencias*, 91(091).

**Chamorro, A. M., Sarandón, S. J. (2013).** 13702-El agua: un recurso esencial para una agricultura sustentable. Efecto de la tecnología, la calidad de sitio y el tipo de cultivo, sobre la eficiencia de su uso en Tres Arroyos, Argentina. *Cuadernos de Agroecología*, 8(2).

**Chapagain, A., Hoekstra, A. Y. (2004).** Water footprints of nations. Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura. 2007. Agua para la Alimentación,

Agua para la Vida. Londres: Earthscan y Colombo: Instituto Internacional del Manejo del Agua.

**Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y. (2008).** The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water international*, 33(1), 19-32.

**Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savernake, H. H. G. y Gautam, R. (2006).** The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological economics*, 60(1), 186-203

**FAO. 2007.** El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Parte 1: Pagos a los agricultores por servicios ambientales. Colección FAO: Agricultura N° 38.

**Fernández, R. (2000).** La ciudad verde: teoría de la gestión ambiental urbana.

**Franke, N. A., Boyacioglu H., Hoekstra A. Y. 2013.** Grey Water Footprint Accounting: Tier 1 Supporting Guidelines. Value of Water Research Report Series No. 65. 64 p.

**Georgescu-Roegen, N. (1971).** The law of entropy and the economic process.

**Gilabert, M. A., González-Piqueras, J. y García-Haro, J. (1997).** Acerca de los índices de vegetación. *Revista de teledetección*, 8(1), 1-10.

**Hoekstra, A.Y. (2003).** "Virtual Water. An Introduction". *Virtual Water Trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Values of Water Research Report Series n° 12.* IHE, Delft, Holanda.

**Hoekstra, A. Y. y Chapagain, A. K. (2006).** Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. In *Integrated assessment of water resources and global change* (pp. 35-48). Springer, Dordrecht.

**Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. y Mekonnen, M. M. (2009).** *Water footprint manual. State of the Art*, 1-131.

**Hoekstra A.Y., Chapagain A.K., Aldaya M.M., Mekonnen M.M. (2011).** *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard.* Earthscan, Londres.

**Hoekstra, A. Y. y Hung, P. Q. (2002).** Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of water research report series, 11, 166.

**Holzman, M. E. y Rivas, R. (2016).** Early maize yield forecasting from remotely sensed temperature/vegetation index measurements. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9 (1): 507-519.

**Holzman, M. E., Rivas, R. y Piccolo, M.C. (2014).** Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 28: 181-1

**Instituto Internacional del Manejo del Agua. (2007).** Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura. Agua para la Alimentación, Agua para la Vida. Londres: Earthscan y Colombo.

**Jacinto, G. (2012).** Vínculos urbano-rurales y construcción de nuevas territorialidades en asentamientos de rango menor. Mundo agrario, 12(24), 00-00.

**López Sardi, E. M. y Cattaneo, M. P. (2013).** Los indicadores ambientales como herramientas de la economía.

**Magrín, G., Travasso, M., López, G., Rodríguez, G. y Lloveras, A. (2005).** Vulnerabilidad de la producción agrícola en la Región Pampeana Argentina“. Informe Final Disponible en: <http://aplicaciones.Medioambiente.gov.Sar/archivos/web/UCC/File/comunicacionesnacionales/vulnerabilidadproducción agrícola región pampeana. pdf>.

**Martínez Alier, J. (ed.1995).** Los principios de la economía ecológica. Textos de P. Geddes, S. Podolinsky y F. Soddy, Fundación Argentaria, Madrid, España.

**Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2011).** National Water Footprint Accounts: The Green, Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption. Value of Water. Research Report Series (50).

**Morello, Jorge y Solbrig, Otto Tomas (1997).** Argentina granero del mundo: hasta cuándo?. La degradación del sistema agroproductivo de la pampa húmeda y sugerencias para su recuperación. CEA, UBA, Harvard University, INTA, Bs. As.

- Nuñez, M. y R.O. Sánchez. (2006).** Hacia una mejor comprensión de las potencialidades y restricciones ecogeográficas de los sistemas de tierras asociados a Tandilia. *Contribuciones Científicas (GAEA)* 67: 165- 180.
- Ocampo, D. y Rivas, R. (2011).** Evaluación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en Argentina: aplicación en zonas húmedas, semiáridas y áridas.
- Ocampo, D., Rivas, R. E., Silicani, M. R., Carmona, F., Holzman, M. y Mancino, C. A. (2012).** Estimación de la fracción evaporativa a partir de registros de humedad de suelo y un lisímetro de pesada. Encuentro del "International Center For Earth Sciences"-E-ICES 8, 8
- Paruelo, J. M., Guerschman, J. P. y Verón, S. R. (2005).** Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), 14-23.
- Pearce, D. W. y Turner, R. K. (1990).** *Economics of natural resources and the environment.* JHU Press.
- Pengue, W. A. (2004).** Producción agroexportadora e (in) seguridad alimentaria: El caso de la soja en Argentina. *Revibec: revista de la Red Iberoamericana de Economía Ecológica*, 1, 046-55.
- Pengue, W. A. (2006).** Agua virtual, agronegocio sojero y cuestiones económico-ambientales futuras. *Ambiente Y Sociedad.*
- Pengue, W. A. (2009).** Cuestiones económico-ambientales de las transformaciones agrícolas en las Pampas. *Problemas del desarrollo*, 40(157), 137-161.
- Petrantonio, M. y Aranguren, C. (2008).** El proceso de sojización: la mirada en un territorio en perspectiva histórica. II Jornadas Nacionales de Investigadores de las Economías Regionales-IX Encuentro Nacional de la Red de Economías Regionales en el marco del Plan Fénix, Tandil.
- Prebisch, R. (1973).** *Problemas teóricos y prácticos del crecimiento económico.*
- Priestley C.H.B., Taylor J. 1972.** On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2):81-92.

**Requesens, E. (coordinador). (2011).** Bases agroambientales para un desarrollo sustentable del partido de Azul. Docuprint S.A. Buenos Aires.

**Rivas, R. E., Bayala, M. I., Carmona, F., Holzman, M., Degano, M. F., & Mancino, C. A. (2016, November).** Adaptación del modelo de Rivas y Caselles para el cálculo de la evapotranspiración con datos del producto MODIS MYD11A2. In XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica SELPER (Misiones, 2016) (Vol. 17).

**Rivas, R. y Carmona, F. (2010).** La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: una alternativa para estudios detallados de cuencas. Boletín Geológico y Minero, 121 (4): 401-412

**Rivas, R. y Caselles, V. (2004).** A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. Remote Sensing of Environment, 93(1-2), 68-76.

**Rivas, R., Weinzettel, P. y Usunoff, E. (2005).** Resultados preliminares de la estimación del estrés hídrico a partir de temperatura de superficie y NDVI. Actas II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea-Relación aguas superficiales-aguas subterráneas, 195-202.

**Rodríguez, C. I. (2014).** Evaluación ambiental del uso y gestión del agua subterránea en el partido de Tandil (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata). [Inédito]

**Rouse Jr, J., Haas, R. H., Schell, J. A. y Deering, D. W. (1974).** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.

**Rozas, H. S., Echeverría, H. y Angelini, H. (2012).** Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 38(1), 33-39.

**Rubio, G. (2002).** Conectando el fósforo del suelo con la planta. In Simposio enfoque sistémico de la fertilización fosforada.(On line)< [http://www. ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/9EA3E6F7F3D865AE8525799C0058C6CD/\\$FILE/nota5. pdf](http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/9EA3E6F7F3D865AE8525799C0058C6CD/$FILE/nota5.pdf)>(12 de junio 2015).

**Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R. (2010).** Caracterización del recurso hídrico y su calidad vinculada a la presencia de nitratos en el partido de Tandil", p.

71-79. En: Centro de Investigaciones Ambientales (CINEA), Estudios Ambientales II, Tandil y área de influencia. Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil.

**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*, 79(2-3), 213-224.

**San Luis Agua, S. E. (2015). Ministerio del Campo, Gobierno de la Provincia de San Luis. 2014.** Cálculo y análisis de la huella hídrica de la Provincia de San Luis. Sectores agrícola y pecuario.[Links]

**Saraceno, D., Barranquero, R. S., de Galarreta, A. R., Banda, R., Noriega, M. Á. Q. y Irastorza, M. T.** Análisis de la calidad del agua subterránea en el partido de Tandil en relación a las prácticas agropecuarias.

**Seehaus, M. y Requesens, E. (2014).** Agriculturización y diversidad productiva en la llanura periserrana del centro-sudeste bonaerense. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 113.

**Sevilla-Guzmán, E. (2006).** Agroecología y agricultura ecológica: hacia una "re" construcción de la soberanía alimentaria.

**Sierra, E.M. (2006).** Escenarios agroclimáticos para la producción de soja en la Argentina y el mundo. Tercer Congreso de soja del Mercosur. Conferencias Plenarias, Foros, Workshops. Bolsa de Comercio de Rosario. Mercosoja. Pág. 247. Rosario.

**Teubal, M., Reveles, I. L. A., Lindenboim, J., Giarracca, N., Gomez, M., Díaz, P., y Trombetta, M. (2008).** Soja y agronegocios en la Argentina: la crisis del modelo. *Laboratorio*, 22, 5-7.

**Thornthwaite, C. W. (1948).** An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

**Vázquez, P., y Zulaica, L. (2011).** Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos Geográficos*, 10, 242-267.

**Viglizzo, E. F., & Jobbágy, E. (2010).** Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental (No. P01 INTA 18412).

**Vogt, J-V., Niemeyer, S. y Viau, A. A. (2011).** Monitoring water stress at regional scales. Proceedings of the 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing, Canada. 315-321.

**WWAP, DHI Water Policy, PNUMA-DHI Centro para el Agua y el Medio Ambiente. (2009).** Integrated Water Resources Management in Action

**Zabala, M. E., Martínez, S., Manzano, M. y Vives, L. (2016).** Groundwater chemical baseline values to assess the Recovery Plan in the Matanza-Riachuelo River basin, Argentina. Science of the Total Environment, 541, 1516-15

**Zabala, M. E., Manzano, M., Vives, L. (2015).** The origin of groundwater composition in the Pampeano Aquifer underlying the Del Azul Creek basin, Argentina. Science of the Total Environment, 518, 168-188.

## **9. REFERENCIAS WEB**

---

**PNUMA-DHI Centro para el Agua y el Medio Ambiente, (2009).**  
<http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml>

**Ruiz de Galarreta, A. V., Rodriguez C. I. (2013).**  
<https://www.unicen.edu.ar/content/la-importancia-del-manejo-sustentable-del-agua>

## 10. ANEXOS

### Anexo I. Cuestionario para productores agropecuarios

#### Utilización de fertilizante en cultivo de soja (productor)

Productor N° \_\_\_\_\_

Entrevistado: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Edad: \_\_\_\_\_ Profesión: \_\_\_\_\_ Ocupación: \_\_\_\_\_

Coordenadas geográficas del campo/campos: \_\_\_\_\_

1. ¿Qué fertilizantes conoce?

- |  |   |
|--|---|
| a) Urea granulada y otros nitrogenados | h) Mezclas NPK (NP - NK - PK - NPK y otros) |
| b) UAN y otros líquidos                | i) Superfosfato Simple                      |
| c) Nitrato de Amonio                   | j) Superfosfato Triple                      |
| d) Nitrato de Potasio                  | k) Sulfato de Amonio                        |
| e) Cloruro de Potasio                  | l) Sulfonitrato de Amonio                   |
| f) Fosfato Diamónico                   | m) Sulfato Doble de Potasio y Magnesio      |
| g) Fosfato Monoamónico                 | n) Otros                                    |

2. ¿Hace uso de ellos?

- a) SI \_\_\_\_\_ b) NO \_\_\_\_\_

3. ¿Cómo se informa sobre quedosá utilizar en el cultivo?

- |                               |                      |
|-------------------------------|----------------------|
| a)- Ing. Agrónomo _____       | c)- Grupo CREA _____ |
| b)- Vecino _____              | d)- INTA _____       |
| e)- Otros (especificar) _____ |                      |

4. ¿Cuánto tiempo lleva en el manejo de dichos fertilizantes?

5. ¿Conoce cuál es el principal componente (el de mayor proporción) de los fertilizantes que utiliza?

- |                    |                  |
|--------------------|------------------|
| a) Nitrógeno _____ | d) Potasio _____ |
| b) Fósforos _____  | e) Otros _____   |
| c) Azufre _____    |                  |

6. ¿Aplica fertilizante sobre el cultivo de soja?

- a) SI \_\_\_\_\_ b) NO \_\_\_\_\_

7. ¿Cuál utiliza? ¿Por qué? \_\_\_\_\_

8. ¿Cuál es el estado de agregación de dicho fertilizante:

- a) Líquido \_\_\_\_\_ b) Sólido \_\_\_\_\_

9. La fertilización del cultivo es realizada por:

- a) Equipo tercerizado \_\_\_\_\_ b) Productor \_\_\_\_\_ c) Ambos \_\_\_\_\_

10. ¿Qué cantidad de fertilizante utiliza por hectárea particularmente en el cultivo de soja?

11. ¿En qué fechas se procede a la siembra y cosecha del cultivo de soja?

Fecha de siembra \_\_\_\_\_ Fecha de cosecha \_\_\_\_\_

12. ¿En qué momentos es conveniente fertilizar el cultivo? ¿Por qué?

- a) Pre-siembra \_\_\_\_\_  
b) A la siembra \_\_\_\_\_  
c) Post-siembra \_\_\_\_\_  
d) Combinación de Etapas (especificar) \_\_\_\_\_

13. ¿Cuál es el nivel de conocimiento que posee con respecto a las indicaciones de uso de dicho fertilizante?

- a) Muy alto \_\_\_\_\_  
b) Alto \_\_\_\_\_  
c) Medio \_\_\_\_\_  
d) Bajo \_\_\_\_\_  
f) Muy bajo \_\_\_\_\_

14. En el caso del partido de Tandil, ¿hay alguna exigencia de suelo o climática a tener en cuenta para la aplicación de fertilizante?

- |                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| a) Profundidad de los suelos _____ | e) Temperatura _____        |
| b) Textura _____                   | f) Humedad _____            |
| c) Nivel freático _____            | g) Precipitaciones _____    |
| d) Ph del suelo _____              | h) Otra (especificar) _____ |

15. ¿Podría decirnos a su entender qué eventos o sucesos influyen en el aumento o disminución del consumo de fertilizantes?

16. Con respecto a su conocimiento de campañas anteriores, ¿puede estimar el consumo de fertilizante por hectárea y el rendimiento del cultivo?

17. ¿Tiene conocimiento sobre qué porcentaje de fertilizante es consumido por la planta y qué porcentaje de dicho fertilizante se pierde?

18. Usted, ¿utiliza información meteorológica para llevar a cabo la tarea de fertilización?

- a) SI \_\_\_\_\_ b) NO \_\_\_\_\_

19. Puede indicar cuál es la fuente donde consulta los datos climáticos necesarios?



Servicio Meteorológico Nacional Argentino \_\_\_\_

Páginas web (especificar) \_\_\_\_

Otros informantes calificados (especificar) \_\_\_\_

20. ¿Estaría dispuesto a utilizar otra red de datos meteorológicos?

a) SI \_\_\_\_ b) NO \_\_\_\_

21. En su establecimiento/unidad productiva, ¿lleva registro de precipitaciones?

a) SI \_\_\_\_ b) NO \_\_\_\_

22. Registra otra variable meteorológica o del suelo?

SI (Especificar) \_\_\_\_\_ NO \_\_\_\_

23. ¿Sería posible, con su previa autorización y consentimiento, realizar un seguimiento de la aplicación de fertilizantes y la respuesta del cultivo al mismo dentro de su campo?

## Anexo II. Cuestionario para comerciantes agropecuarios

### Utilización de fertilizante en cultivo de soja (comerciante)

Comerciante N° \_\_\_\_\_

Entrevistado: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

Edad: \_\_\_\_\_ Profesión: \_\_\_\_\_ Ocupación: \_\_\_\_\_

1. ¿Qué tipo de fertilizantes comercializa?

- |                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| a) Nitrogenados _____ | d) Azufrados _____      |
| b) Fosfatados _____   | e) Mezcla química _____ |
| c) Potásicos _____    | f) Otros _____          |

2. ¿Cuánto tiempo ha comercializado dichos fertilizantes?

3. Con respecto al cultivo de soja, ¿Qué fertilizante comercializa?

4. ¿Qué concentración posee?

5. ¿Cuál es el estado de agregación de dicho fertilizante?

- a) Líquido \_\_\_\_\_ b) Sólido \_\_\_\_\_

6. ¿En qué fecha se comercializa con mayor frecuencia este fertilizante para el cultivo de soja?

- a) Pre-siembra \_\_\_\_\_  
b) A la siembra \_\_\_\_\_  
c) Post-siembra \_\_\_\_\_  
d) Combinación de Etapas (especificar) \_\_\_\_\_

7. Podría estimar cuántas compras de fertilizante realizan los productores agrícolas de soja durante la misma campaña del cultivo:

- a) 1 \_\_\_\_\_ b) 2 \_\_\_\_\_ c) 3 \_\_\_\_\_ d) Mas \_\_\_\_\_

8. ¿En qué fechas se procede a la siembra y cosecha del cultivo de soja?

- a) Fecha de siembra \_\_\_\_\_ b) Fecha de cosecha \_\_\_\_\_

9. ¿Conoce cuantos kilogramos de fertilizante se utilizan por hectárea particularmente en el cultivo de soja?

10. ¿Cómo se informa Ud. sobre el uso de dicho fertilizante?

11. Puede estimar qué volumen (en tn) de fertilizante comercializa por campaña de soja.

12. En el caso del partido de Tandil, ¿hay alguna exigencia de las que se detallan del suelo o climática a tener en cuenta para la aplicación de fertilizante?

- a) Profundidad de los suelos \_\_\_\_\_ f) Temperatura \_\_\_\_\_

b) Textura \_\_\_\_\_ g) Humedad \_\_\_\_\_

c) Nivel freático \_\_\_\_\_ h) Precipitaciones \_\_\_\_\_

e) Ph del suelo \_\_\_\_\_ i) Otra (especificar) \_\_\_\_\_

13. ¿Tiene conocimiento sobre qué porcentaje del fertilizante aplicado es consumido por la planta y que porcentaje se pierde?

14. ¿Podría decirnos a su entender qué eventos o sucesos influyen en el aumento o disminución del consumo de fertilizantes?

15.Cuál es su opinión y respecto de campañas anteriores, sobre el uso de fertilizantes nitrogenados:

- a) Aumentó \_\_\_\_\_ b) Disminuyó \_\_\_\_\_ c) No se perciben modificaciones notorias \_\_\_\_\_

16. Como proveedor de fertilizantes, ¿es usted asesorado por alguna empresa, institución o profesional en particular, que le proporcione datos meteorológicos y edáficos concretos?

- a) SI (Especificar) \_\_\_\_\_ b) NO \_\_\_\_\_

### Anexo III. Datos diarios obtenidos en la estación de balance de energía.

Fecha	Día Juliano	Rnd (W/m <sup>2</sup> )	Ta °K	Patm (kPa)
15/11/2014	319	170,5	298,8	98,9
16/11/2014	320	156,6	297,1	99,6
17/11/2014	321	170,1	298,1	99,2
18/11/2014	322	145,7	301,2	98,4
19/11/2014	323	94	292,5	98,8
20/11/2014	324	157,3	291,7	99,4
21/11/2014	325	77	292,6	99,6
22/11/2014	326	187,1	294,9	99
23/11/2014	327	145,8	296,6	98,4
24/11/2014	328	157,5	294,4	98,5
25/11/2014	329	169,5	294,1	99,1
26/11/2014	330	159,6	296,2	98,9
27/11/2014	331	162,9	298,2	98,5
28/11/2014	332	160,4	298,5	99,3
29/11/2014	333	163,4	296,2	99,6
30/11/2014	334	167,6	287,2	99,1
1/12/2014	335	192,9	288,8	99,8
2/12/2014	336	141,9	290,4	99,2
3/12/2014	337	186,6	295,7	99
4/12/2014	338	176,4	298,6	98,5
5/12/2014	339	182,6	300,3	98,5
6/12/2014	340	177,7	301,7	98,7
7/12/2014	341	158,8	298,8	98,2
8/12/2014	342	182,6	299,1	99
9/12/2014	343	168,5	299,8	99,5
10/12/2014	344	198,6	293,3	99,1
11/12/2014	345	149,5	293,6	99
12/12/2014	346	190,7	298,1	99,5
13/12/2014	347	182,2	298,1	99,3
14/12/2014	348	182,4	295,9	99,1
15/12/2014	349	81,2	298,1	99
16/12/2014	350	172,7	299,6	98,6
17/12/2014	351	187,2	297,3	97,7
18/12/2014	352	182,9	299,3	98,1
19/12/2014	353	174,4	303,8	98,9
20/12/2014	354	126,5	297	99,6
21/12/2014	355	139	294,1	99,4
22/12/2014	356	120,1	297,9	98,8
23/12/2014	357	148	300,7	98,6
24/12/2014	358	149,5	303,6	98,7
25/12/2014	359	177,6	301,9	98,7
26/12/2014	360	88,1	305,6	98,5
27/12/2014	361	164,3	303,8	98,3
28/12/2014	362	213,9	300,1	98,4
29/12/2014	363	198,5	293,3	98,1
30/12/2014	364	190,8	292	98,2
31/12/2014	365	115,6	292,1	99,1
1/1/2015	1	168,5	293,6	99
2/1/2015	2	171,7	294,2	99,4
3/1/2015	3	104,3	297,6	98,7
4/1/2015	4	169,4	298,3	98,4
5/1/2015	5	182	300	98,9
6/1/2015	6	191,4	297,4	98,8
7/1/2015	7	170,3	301,1	98,3
8/1/2015	8	151,6	298,5	98,7
9/1/2015	9	240,3	292,7	98,7
10/1/2015	10	181,7	295,5	98,7
11/1/2015	11	202,4	295,4	98,9
12/1/2015	12	172	298,8	98,9
13/1/2015	13	82,9	296,8	99,7
14/1/2015	14	117	297,3	98,8
15/1/2015	15	157,4	297,5	99,3
16/1/2015	16	167,1	294,9	98,9
17/1/2015	17	180,8	296,9	99,1
18/1/2015	18	148,9	299	100
19/1/2015	19	2	302,2	99,9

20/1/2015	20	126	303,3	99,7
21/1/2015	21	126,5	303,4	99,2
22/1/2015	22	162,1	298,4	98,9
23/1/2015	23	149,9	300,3	98,6
24/1/2015	24	197,2	296,9	98,5
25/1/2015	25	204,2	294,8	98,2
26/1/2015	26	59,2	296,3	99
27/1/2015	27	177,6	298,5	99,7
28/1/2015	28	69,6	301,6	99,7
29/1/2015	29	128,1	300,7	99,5
30/1/2015	30	128,5	301,4	99,1
31/1/2015	31	143,7	300,6	99,3
1/2/2015	32	93,1	301,5	99,2
2/2/2015	33	149,6	304,5	98,8
3/2/2015	34	123,3	303,7	98,8
4/2/2015	35	42,6	298,9	98,8
5/2/2015	36	187,3	298,1	98,8
6/2/2015	37	199,5	296,8	98,5
7/2/2015	38	144,6	298,7	98,4
8/2/2015	39	65,6	298,9	98,9
9/2/2015	40	139,4	294,7	98,7
10/2/2015	41	159	295,8	98,8
11/2/2015	42	161,8	297,3	99,7
12/2/2015	43	99	297,6	99,7
13/2/2015	44	100,6	300,4	99,6
14/2/2015	45	153,8	295,9	99,4
15/2/2015	46	165,1	291,3	99,1
16/2/2015	47	187,2	290,2	98,3
17/2/2015	48	159,5	292,5	99
18/2/2015	49	88,5	296,7	99,6
19/2/2015	50	83	299,6	99,8
20/2/2015	51	80,4	300,4	99,5
21/2/2015	52	94,3	296,2	99,2
22/2/2015	53	153,6	296,3	99
23/2/2015	54	169,2	295,8	99,7
24/2/2015	55	166,2	295,4	99,4
25/2/2015	56	62,1	294,2	99,4
26/2/2015	57	99	296	99,5
27/2/2015	58	136,6	295,9	99,1
28/2/2015	59	123,5	295,1	98,9
1/3/2015	60	0	296,2	99,1
2/3/2015	61	134,6	298	98,9
3/3/2015	62	67,4	299,7	98,9
4/3/2015	63	102,4	301,6	99,3
5/3/2015	64	109,7	301	99,2
6/3/2015	65	109,3	300,8	99,1
7/3/2015	66	110,1	301,8	98,7
8/3/2015	67	118,1	302,2	98,5
9/3/2015	68	55,8	302,6	99,2
10/3/2015	69	143,4	293,7	99,5
11/3/2015	70	171	291,6	99,3
12/3/2015	71	151,4	294,6	99,2
13/3/2015	72	102,1	297,9	99,1
14/3/2015	73	72,8	299,7	98,9
15/3/2015	74	60,7	298,6	99,7
16/3/2015	75	101,4	296,1	99,8
17/3/2015	76	151	289,5	99,8
18/3/2015	77	172,2	289,4	99,8
19/3/2015	78	148,6	291,8	100
20/3/2015	79	118,7	291,1	99,9
21/3/2015	80	48,4	290,5	99,6
22/3/2015	81	31,8	289,3	99,1
23/3/2015	82	79,9	291	99,1
24/3/2015	83	58,9	291,8	99,3
25/3/2015	84	75,7	295,2	98,9
26/3/2015	85	61,4	290,6	98,7
27/3/2015	86	99,5	289,3	98,5
28/3/2015	87	81,2	292,9	98,8
29/3/2015	88	85,5	295,9	99,6
30/3/2015	89	0	297,5	100,1
31/3/2015	90	63,1	293,4	99,6

## Anexo IV. Cálculos diarios de los componentes de la ecuación [2] y obtención de ETr.

Altitud (m)	152		ALB (..)	0,23		$\alpha$ PT (..)	1,26
Fecha	Día Juliano	FEd (..)	Rnd (W/m <sup>2</sup> )	$\Delta$ (kPa °C)	$\gamma$ (kPa °C)	ETptd (mm/d)	ETrd (mm/d)
15/11/2014	319	0,66	170,5	0,1	0,065	5,6	3,7
16/11/2014	320	0,64	156,6	0,1	0,066	5	3,2
17/11/2014	321	0,62	170,1	0,1	0,065	5,5	3,4
18/11/2014	322	0,61	145,7	0,2	0,065	4,9	3
19/11/2014	323	0,82	94	0,1	0,065	2,8	2,3
20/11/2014	324	0,78	157,3	0,1	0,066	4,6	3,6
21/11/2014	325	0,73	77	0,1	0,066	2,3	1,6
22/11/2014	326	0,7	187,1	0,1	0,065	5,8	4
23/11/2014	327	0,67	145,8	0,1	0,065	4,6	3,1
24/11/2014	328	0,7	157,5	0,1	0,065	4,8	3,4
25/11/2014	329	0,66	169,5	0,1	0,065	5,2	3
26/11/2014	330	0,64	159,6	0,1	0,065	5	3,2
27/11/2014	331	0,63	162,9	0,1	0,065	5,3	3,3
28/11/2014	332	0,61	160,4	0,1	0,066	5,2	3,2
29/11/2014	333	0,66	163,4	0,1	0,066	5,2	3,4
30/11/2014	334	0,79	167,6	0,1	0,065	4,5	3,5
1/12/2014	335	0,75	192,9	0,1	0,066	5,3	4
2/12/2014	336	0,73	141,9	0,1	0,065	4,1	2,9
3/12/2014	337	0,71	186,6	0,1	0,065	5,9	4,1
4/12/2014	338	0,7	176,4	0,1	0,065	5,8	4
5/12/2014	339	0,7	182,6	0,2	0,065	6,1	4,3
6/12/2014	340	0,7	177,7	0,2	0,065	6	4,2
7/12/2014	341	0,83	158,8	0,1	0,065	5,2	4,3
8/12/2014	342	0,84	182,6	0,2	0,065	6	5
9/12/2014	343	0,84	168,5	0,2	0,066	5,6	4,7
10/12/2014	344	0,82	198,6	0,1	0,065	6	4,9
11/12/2014	345	0,78	149,5	0,1	0,065	4,5	3,5
12/12/2014	346	0,77	190,7	0,1	0,066	6,2	4,8
13/12/2014	347	0,77	182,2	0,1	0,066	5,9	4,5
14/12/2014	348	0,74	182,4	0,1	0,065	5,7	4,2
15/12/2014	349	0,74	81,2	0,1	0,065	2,6	1,9
16/12/2014	350	0,74	172,7	0,2	0,065	5,7	4,2
17/12/2014	351	0,73	187,2	0,1	0,064	6	4,4
18/12/2014	352	0,72	182,9	0,2	0,065	6	4,3
19/12/2014	353	0,72	174,4	0,2	0,065	6,1	4,4
20/12/2014	354	0,72	126,5	0,1	0,066	4	2,9
21/12/2014	355	0,7	139	0,1	0,066	4,2	3
22/12/2014	356	0,67	120,1	0,1	0,065	3,9	2,6
23/12/2014	357	0,66	148	0,2	0,065	5	3,3
24/12/2014	358	0,67	149,5	0,2	0,065	5,2	3,5
25/12/2014	359	0,68	177,6	0,2	0,065	6	4,1
26/12/2014	360	0,69	88,1	0,2	0,065	3,1	2,1
27/12/2014	361	0,69	164,3	0,2	0,065	5,7	3,9
28/12/2014	362	0,71	213,9	0,2	0,065	7,2	5,1
29/12/2014	363	0,72	198,5	0,1	0,065	6	4,3
30/12/2014	364	0,71	190,8	0,1	0,065	5,6	4
31/12/2014	365	0,68	115,6	0,1	0,065	3,4	2,3
1/1/2015	1	0,66	168,5	0,1	0,065	5,1	3,4
2/1/2015	2	0,64	171,7	0,1	0,066	5,3	3,3
3/1/2015	3	0,61	104,3	0,1	0,065	3,3	2
4/1/2015	4	0,61	169,4	0,1	0,065	5,5	3,3
5/1/2015	5	0,62	182	0,2	0,065	6,1	3,7
6/1/2015	6	0,66	191,4	0,1	0,065	6,2	4
7/1/2015	7	0,65	170,3	0,2	0,065	5,8	3,8
8/1/2015	8	0,66	151,6	0,2	0,065	5,4	3,5
9/1/2015	9	0,7	240,3	0,2	0,065	8,4	5,8
10/1/2015	10	0,68	181,7	0,2	0,065	6,1	4,1
11/1/2015	11	0,68	202,4	0,1	0,065	6,1	4,1
12/1/2015	12	0,67	172	0,1	0,065	5,1	3,4
13/1/2015	13	0,65	82,9	0,1	0,066	2,4	1,6
14/1/2015	14	0,67	117	0,1	0,065	3,5	2,4
15/1/2015	15	0,7	157,4	0,1	0,066	4,8	3,4
16/1/2015	16	0,74	167,1	0,1	0,065	5,4	4
17/1/2015	17	0,75	180,8	0,1	0,065	5,9	4,4
18/1/2015	18	0,72	148,9	0,2	0,066	4,9	3,5
19/1/2015	19	0,73	2	0,1	0,066	0	0

20/1/2015	20	0,71	126	0,2	0,066	4,2	3
21/1/2015	21	0,71	126,5	0,1	0,066	4,1	2,9
22/1/2015	22	0,71	162,1	0,1	0,065	4,8	3,4
23/1/2015	23	0,73	149,9	0,1	0,065	4,7	3,4
24/1/2015	24	0,75	197,2	0,1	0,065	6,2	4,6
25/1/2015	25	0,76	204,2	0,1	0,065	6,7	5,1
26/1/2015	26	0,8	59,2	0,1	0,065	1,9	1,5
27/1/2015	27	0,8	177,6	0,1	0,066	5,7	4,5
28/1/2015	28	0,79	69,6	0	0,066	2,2	1,7
29/1/2015	29	0,77	128,1	0,1	0,066	4	3
30/1/2015	30	0,75	128,5	0,1	0,065	4,1	3,1
31/1/2015	31	0,75	143,7	0,1	0,066	4,7	3,5
1/2/2015	32	0,76	93,1	0,2	0,065	3,2	2,4
2/2/2015	33	0,76	149,6	0,2	0,065	5,2	3,9
3/2/2015	34	0,77	123,3	0,2	0,065	4,3	3,3
4/2/2015	35	0,79	42,6	0,1	0,065	1,4	1,1
5/2/2015	36	0,82	187,3	0,2	0,065	6,3	5,1
6/2/2015	37	0,83	199,5	0,1	0,065	6,4	5,3
7/2/2015	38	0,82	144,6	0,1	0,065	4,5	3,7
8/2/2015	39	0,81	65,6	0,1	0,065	2	1,6
9/2/2015	40	0,83	139,4	0,1	0,065	4,5	3,8
10/2/2015	41	0,84	159	0,2	0,065	5,4	4,5
11/2/2015	42	0,81	161,8	0,2	0,066	5,4	4,4
12/2/2015	43	0,8	99	0,2	0,066	3,3	2,7
13/2/2015	44	0,8	100,6	0,2	0,066	3,3	2,7
14/2/2015	45	0,8	153,8	0,2	0,066	5,2	4,1
15/2/2015	46	0,82	165,1	0,2	0,065	5,8	4,7
16/2/2015	47	0,85	187,2	0,2	0,065	6,5	5,5
17/2/2015	48	0,84	159,5	0,1	0,065	5,2	4,4
18/2/2015	49	0,85	88,5	0,1	0,066	2,8	2,4
19/2/2015	50	0,81	83	0,1	0,066	2,6	2,1
20/2/2015	51	0,81	80,4	0,1	0,066	2,6	2,1
21/2/2015	52	0,9	94,3	0,1	0,065	3,1	2,8
22/2/2015	53	0,92	153,6	0,1	0,065	4,7	4,4
23/2/2015	54	0,92	169,2	0,1	0,066	5,3	4,9
24/2/2015	55	0,9	166,2	0,1	0,066	5,3	4,8
25/2/2015	56	0,87	62,1	0,1	0,066	2	1,7
26/2/2015	57	0,86	99	0,2	0,066	3,3	2,8
27/2/2015	58	0,86	136,6	0,1	0,065	4,3	3,7
28/2/2015	59	0,82	123,5	0,1	0,065	3,6	2,9
1/3/2015	60	0,82	0	0,1	0,065	0	0
2/3/2015	61	0,85	134,6	0,1	0,065	4	3,4
3/3/2015	62	0,85	67,4	0,1	0,065	2,1	1,8
4/3/2015	63	0,84	102,4	0,2	0,066	3,4	2,8
5/3/2015	64	0,83	109,7	0,2	0,066	3,7	3
6/3/2015	65	0,83	109,3	0,1	0,065	3,4	2,8
7/3/2015	66	0,81	110,1	0,1	0,065	3,5	2,8
8/3/2015	67	0,8	118,1	0,1	0,065	3,7	2,9
9/3/2015	68	0,8	55,8	0,1	0,066	1,7	1,4
10/3/2015	69	0,8	143,4	0,1	0,066	4,4	3,5
11/3/2015	70	0,81	171	0,1	0,066	5,4	4,3
12/3/2015	71	0,8	151,4	0,1	0,065	4,8	3,8
13/3/2015	72	0,79	102,1	0,1	0,065	3,2	2,5
14/3/2015	73	0,76	72,8	0,1	0,065	2,3	1,7
15/3/2015	74	0,72	60,7	0,1	0,066	1,9	1,4
16/3/2015	75	0,71	101,4	0,2	0,066	3,3	2,4
17/3/2015	76	0,73	151	0,2	0,066	5,1	3,7
18/3/2015	77	0,76	172,2	0,2	0,066	5,8	4,4
19/3/2015	78	0,75	148,6	0,2	0,066	5	3,7
20/3/2015	79	0,74	118,7	0,2	0,066	4	3
21/3/2015	80	0,68	48,4	0,2	0,066	1,6	1,1
22/3/2015	81	0,64	31,8	0,2	0,065	1,1	0,7
23/3/2015	82	0,62	79,9	0,1	0,065	2,4	1,5
24/3/2015	83	0,62	58,9	0,1	0,066	1,7	1
25/3/2015	84	0,64	75,7	0,1	0,065	2,3	1,5
26/3/2015	85	0,63	61,4	0,1	0,065	2	1,2
27/3/2015	86	0,61	99,5	0,2	0,065	3,3	2
28/3/2015	87	0,64	81,2	0,1	0,065	2,6	1,7
29/3/2015	88	0,64	85,5	0,1	0,066	2,7	1,7
30/3/2015	89	0,64	0	0,1	0,066	0	0
31/3/2015	90	0,62	63,1	0,1	0,066	1,7	1,1
						ΣETpt 605,2	ΣETr 447,7