



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS HIDRICAS**

**TESIS DE MAESTRIA**  
**MAESTRIA EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS HIDRICOS**

**“ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE SEQUÍAS CON**  
**METODOLOGIAS DE TELEDETECCIÓN”**

**TESISTA: Ing. Juan Pablo Vicente Szymula**

**ÍNDICE GENERAL**

Índice General	i
Índice de Figuras	iii
Índice de tablas	v
1. Introducción	1
2. Área de estudio y datos a utilizar	9
2.1 Descripción del área de estudio	9
2.2 Datos disponibles	15
2.2.1 Datos meteorológicos	16
2.2.2 Datos de suelo	17
2.2.3 Imágenes satelitales	20
3. Análisis Antecedente: Índice de Palmer (PDSI)	22
3.1 Consideraciones sobre el PDSI	23
3.2 Metodología	25
3.3 Resultados del PDSI	32
4. Índices de Vegetación	36
5. Resultados	41
5.1 Valores medios regionales	41
5.2 Análisis de los valores medios en áreas con igual tipo y cobertura de suelos	46
5.3 Análisis de los histogramas de frecuencia	52
5.4 Análisis de la distribución espacial de los índices de vegetación	57
6. Discusión	67

7. Conclusiones	71
8. Anexos	76
8.1 Índice de Palmer	76
8.1.1 Reconquista	77
8.1.2 Las Breñas	81
8.1.3 Santiago del Estero	85
8.2 Valores medios regionales de NDVI y NDWI	89
9. Glosario	92
10. Bibliografía	95

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1	Monitoreo de las condiciones de humedad en el mes de septiembre de 2010 mediante: (a) SPI, (b) CMI, (c) PDSI). Fuente CREAN	3
Figura 1.2	Análisis variado de las precipitaciones en la Provincia del Chaco: (a) Isohietas medias anuales 1956 – 2010; (b) isohietas año hidrológico 2008 – 2009; (c) anomalías en % de precipitaciones acumuladas 2002 – 2009. Fuente: APA.	4
Figura 1.3	Firmas espectrales de vegetación tipo, en condiciones normales y estresada – (Fuente: librería de curvas espectrales del USGS)	5
Figura 1.4	Curvas espectrales de distintos tipos de vegetación – (Fuente: librería de curvas espectrales de USGS)	6
Figura 2.1	Mapa de Argentina con el área de estudio superpuesta.	11
Figura 2.2	Valores medios anuales correspondiente a: (a) precipitación, (b) temperatura. Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos	12
Figura 2.3	Valores medios mensuales de la localidad de Las Breñas, correspondiente a: (a) precipitación, (b) temperatura. Fuente: INTA	13
Figura 2.4	Mapas de suelos escala 1:500.000; (a) orden principal de los suelos, (b) grupo principal de los suelos – (Fuente: INTA)	18
Figura 2.5	Mapa de Capacidad de Uso de suelos del INTA; (b). Mapa de Riesgo Agrícola. (Fuente: Dirección de Estudios Básicos – APA, 2004)	19
Figura 3.1	Ajuste de los factores e duración. Fuente: Wells, et. al. (2004)	31
Figura 3.2	Valores de PDSI para: (a) Santiago del Estero; (b) Las Breñas y (c) Reconquista	33
Figura 3.3	Valores de PDSI de la última década en estaciones del noreste argentino	35
Figura 4.1	Ubicación de áreas homogéneas de tipo y uso de suelos a analizar	40
Figura 5.1	Valores medios regionales en el período analizado: (a) NDVI; (b) NDWI	42
Figura 5.2	Valores medios regionales de NDVI y NDWI para enero.	43
Figura 5.3	Valores medios regionales de NDVI y NDWI para abril.	44
Figura 5.4	Valores medios regionales de NDVI y NDWI para julio.	45
Figura 5.5	Valores medios regionales de NDVI y NDWI para octubre.	46
Figura 5.6	Valores medios regionales de NDVI y NDWI para octubre.	48

Figura 5.7	Valores medios de áreas específicas del mes de abril para (a) NDVI; (b) NDWI	49
Figura 5.8	Valores medios de áreas específicas del mes de julio para (a) NDVI; (b) NDWI	50
Figura 5.9	Valores medios de áreas específicas del mes de octubre para (a) NDVI; (b) NDWI	51
Figura 5.10	Histogramas del mes de enero correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI	53
Figura 5.11	Histogramas del mes de abril correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI	54
Figura 5.12	Histogramas del mes de julio correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI	55
Figura 5.13	Histogramas del mes de octubre correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI	56
Figura 5.14	Secuencia del NDVI para el mes de enero	59
Figura 5.15	Secuencia del NDWI para el mes de enero	60
Figura 5.16	Secuencia del NDVI para el mes de abril	61
Figura 5.17	Secuencia del NDWI para el mes de abril	62
Figura 5.18	Secuencia del NDVI para el mes de julio	63
Figura 5.19	Secuencia del NDWI para el mes de julio	64
Figura 5.20	Secuencia del NDVI para el mes de octubre	65
Figura 5.21	Secuencia del NDWI para el mes de octubre	66
Figura 6.1	Valores de PDSI para el período de enero	68
Figura 6.2	Valores de PDSI para el período de abril	68
Figura 6.3	Valores de PDSI para el período de julio	69
Figura 6.4	Valores de PDSI para el período de octubre	70

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1	Información de cultivos el sector dentro de la provincia del Chaco	14
Tabla 2.2	Información de cultivos el sector dentro de la provincia de Santa Fe	15
Tabla 2.3	Estaciones Meteorológicas INTA	16
Tabla 2.4	Listado de imágenes MODIS analizadas del área de estudio	21
Tabla 3.1	Categorías PDSI según Palmer (1965)	23
Tabla 4.1	Escenas disponibles de la serie enero	39
Tabla 4.2	Descripción de áreas específicas. Capacidad de uso de suelo según INTA, tipo de cobertura vegetal y riesgos agrícolas y ganaderos asociados	40
Tabla 8.1	Parámetros del suelo para Reconquista	77
Tabla 8.2	Coefficientes del método para Reconquista	77
Tabla 8.3	Valores de PDSI para Reconquista	78
Tabla 8.4	Parámetros del suelo para Las Breñas	81
Tabla 8.5	Coefficientes del método para Las Breñas	81
Tabla 8.6	Valores de PDSI para Las Breñas	81
Tabla 8.7	Parámetros del suelo para Santiago del Estero	85
Tabla 8.8	Coefficientes del método para Santiago del Estero	85
Tabla 8.9	Valores de PDSI para Santiago del Estero	85
Tabla 8.10	Valores medios regionales de NDVI y NDWI	89

## **RESUMEN**

La marcada estacionalidad de las precipitaciones en el Noreste Argentino, agravada por largos períodos de sequía y exceso de humedad, enfatiza la necesidad de buscar diversas herramientas que permitan evaluar y monitorear el estado del sistema hídrico en distintos períodos de tiempo.

La disponibilidad de imágenes satelitales permite el seguimiento de diferentes variables ambientales con metodologías propias de la Teledetección, permitiendo tener resultados regionales a tiempo prácticamente real.

En esta tesis se implementó metodologías basadas en los índices de vegetación (IVs) “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) y del índice “Normalized Difference Water Index” (NDWI) obtenidos con imágenes satelitales del sensor MODIS, en la identificación y monitoreo de sequías en una zona del Noreste Argentino. Se realizó fundamentalmente un estudio espacio-temporal en el período 2001-2009 evaluándose valores medios regionales e histogramas de frecuencia de los índices de vegetación. Este análisis se realizó tanto a escala regional, como a unidades homogéneas de tipo y uso de suelo destacables en el área de estudio. La eficiencia de los IVs se realizó comparando los resultados con el “Índice de Palmer” (PDSI) desarrollado en tres estaciones meteorológicas.

Los resultados mostraron que las variaciones de los IVs, fundamentalmente el NDWI, son compatibles con las variaciones de humedad del ambiente, y por lo tanto, pueden ser utilizados en el monitoreo de sequías.



## **1. INTRODUCCIÓN**

Las sequías son fenómenos recurrentes que han afectado y afectan las civilizaciones a lo largo de la historia (Heim, 2002). La última sequía en el noreste argentino, que en muchos lugares ha permanecido hasta el año 2010, tuvo su inicio en el año 2003 en casi toda la región. La misma, afectó a los pobladores y ocasionó cuantiosas pérdidas económicas en el Noreste del país. Esto pone de manifiesto la necesidad de contar con herramientas que permitan, por un lado poder evaluar y cuantificar una sequía, y por otro realizar el seguimiento de la misma.

La diversidad de sectores afectados, originan diferentes definiciones de sequía. La sequía es por naturaleza un fenómeno regional (Alley, 1984). Palmer (1965) la define como el “*intervalo de tiempo, generalmente en el orden de meses o años, durante el cual los aportes de humedad en un determinado lugar disminuyen consistentemente respecto de los aportes normales de humedad*”. Desde otra perspectiva, también se puede definir una sequía como un proceso en el que interviene tanto la oferta o disponibilidad del recurso hídrico, como la demanda o necesidad de aprovechar el recurso (Fernández Larrañaga, 1997).

La Sociedad Americana de Meteorología (American Meteorological Society) (2003) agrupa a la sequía en cuatro clases o tipos principales:

- La sequía meteorológica o climática, definida en términos de un déficit de precipitación, tanto en magnitud como en duración.

- La sequía agrícola, debida en gran parte al déficit de humedad en el suelo, y aplicada en general a regiones sin riego.
- La sequía hidrológica relacionada más a los efectos producidos por el déficit de precipitación, que por el déficit de precipitación en sí mismo. En general, las sequías hidrológicas, se encuentran fuera de fase a las meteorológicas y/o agrícolas, debido a que, las deficiencias en la precipitación, se aprecian con retardo en el resto de los componentes del sistema hidrológico como ser cursos de agua, reservorios y acuíferos.
- La sequía socioeconómica, asociada a la oferta y demanda de determinados bienes.

Una sequía se caracteriza fundamentalmente por su magnitud, su duración y su extensión espacial. Se han propuesto muchos índices a fin de cuantificar una sequía que pueden ser muy complejos o muy simples (Valiente, 2001). Algunos de estos índices utilizan sólo datos de precipitación como el “Porcentaje de Precipitación Normal” (PPN) o el “Índice Estandarizado de Precipitación” (SPI), mientras que metodologías más elaboradas como el “Índice de Severidad de Sequía de Palmer” (PDSI) (Palmer, 1965) tienen en cuenta la interacción de la precipitación y la evapotranspiración con la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo.

Varios han tratado de evaluar y/o cuantificar los efectos de las sequías en Argentina mediante métodos hidrológicos y/o meteorológicos tradicionales (Minetti et al., 2010). En la cuenca del Plata, se ha desarrollado el SPI desde principios del siglo XX, Krepper et. al. (2010). La Universidad Nacional de Córdoba, a través del CREAN (Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales) realiza el monitoreo de

sequías fundamentalmente de la región pampeana mediante el mapeo de varios índices: SPI, PDSI y el Índice de Humedad de cultivos (CMI) desarrollado por Palmer en 1968. En la Figura 1.1 se muestra como ejemplo mapa de los índices para el mes de septiembre de 2010 publicado por el CREAN ([www.crean.unc.edu.ar](http://www.crean.unc.edu.ar)). Tanto el SPI (Figura 1.1a) como el PDSI (Figura 1.1b) presentan resultados bastante consistentes entre sí. El CMI (Figura 1.1c), en cambio, presenta en algunos sectores, resultados contradictorios, hecho que puede suceder dado que el CMI evalúa las condiciones de humedad en el corto plazo.

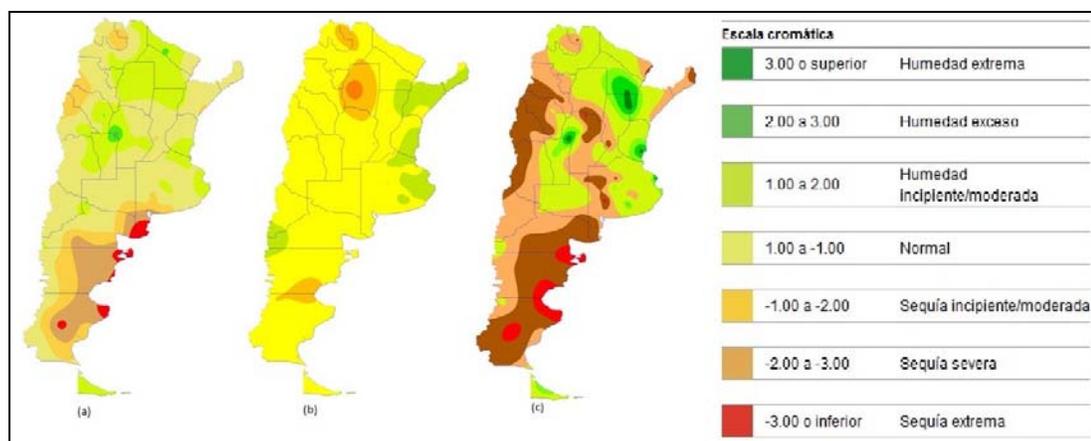


Figura 1.1. Monitoreo de las condiciones de humedad en el mes de septiembre de 2010 mediante: (a) SPI, (b) CMI, (c) PDSI). Fuente CREAN

La Dirección de Estudios Hídricos de la Administración Provincial del Agua de la Provincia del Chaco realiza el monitoreo de las sequías en función a la variabilidad de precipitación, generando mapas de anomalías de precipitación, encontrándose zonas con déficit acumulado superiores al 20% en el período 2002 – 2010 (APA, 2010). La Figura 1.2, muestra ejemplos de este tipo de información. La Figura 1.2a muestra las isohietas medias anuales en todo el período de registro de la red pluviométrica provincial (1956 – 2010), que contrasta fuertemente con las isohietas del año 2008 – 2009, con precipitaciones inferiores al 40% en varias zonas respecto a la media (Figura 1.2b). La

Figura (1.2c) representa las anomalías (%) de la precipitación acumulada en el período 2002 – 2009, donde se aprecia que una importante zona, posee en dicho período un déficit acumulado de precipitación en el orden del 30%.

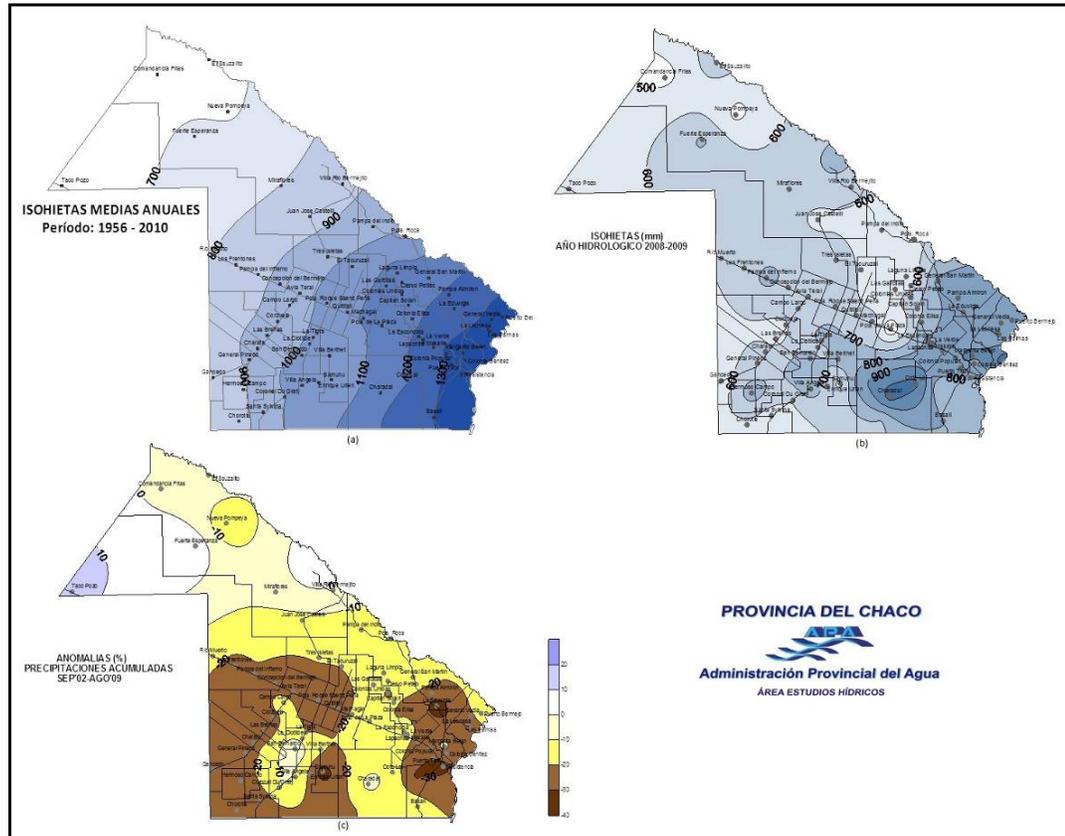


Figura 1.2. Análisis variado de las precipitaciones en la Provincia del Chaco: (a) Isohietas medias anuales 1956 – 2010; (b) isohietas año hidrológico 2008 – 2009; (c) anomalías en % de precipitaciones acumuladas 2002 – 2009. Fuente: APA.

En una región del noreste argentino Szymula et al., (2010), desarrollaron el PDSI para evaluar y comparar las sequías de los últimos 50 años, teniendo en cuenta que el método permite realizar comparaciones temporales como espaciales (Wells et al., 2004).

Por otra parte, a creciente disponibilidad de tecnologías satelitales modernas y el avance de la informática permiten contar con resultados prácticamente a tiempo real de

algunas variables ambientales. Al respecto, el desarrollo de metodologías basadas en los denominados índices de vegetación se encuentra en permanente avance lo que ha motivado el desarrollo de este trabajo de tesis.

Los índices de vegetación (IVs) están basados en la reflexión de energía de la cobertura vegetal. Los IVs intentan cuantificar la biomasa o el vigor de la vegetación. Un IV se genera a partir de la combinación matemática de valores de reflectancia dos o más bandas espectrales. Las bandas que se utilizan son seleccionadas a partir del conocimiento espectral de la cobertura vegetal (Chuvienco, 2002).

La actividad celular de las plantas hace que esta absorba y/o refleje diferentes porciones de la energía del espectro electromagnético, produciendo una firma espectral característica. El reconocimiento de estas firmas es fundamental en la interpretación que se pueda realizar de una imagen satelital. En la Figura 1.3 se aprecia las variaciones de una firma espectral teórica de una planta estresada y una en condiciones normales.

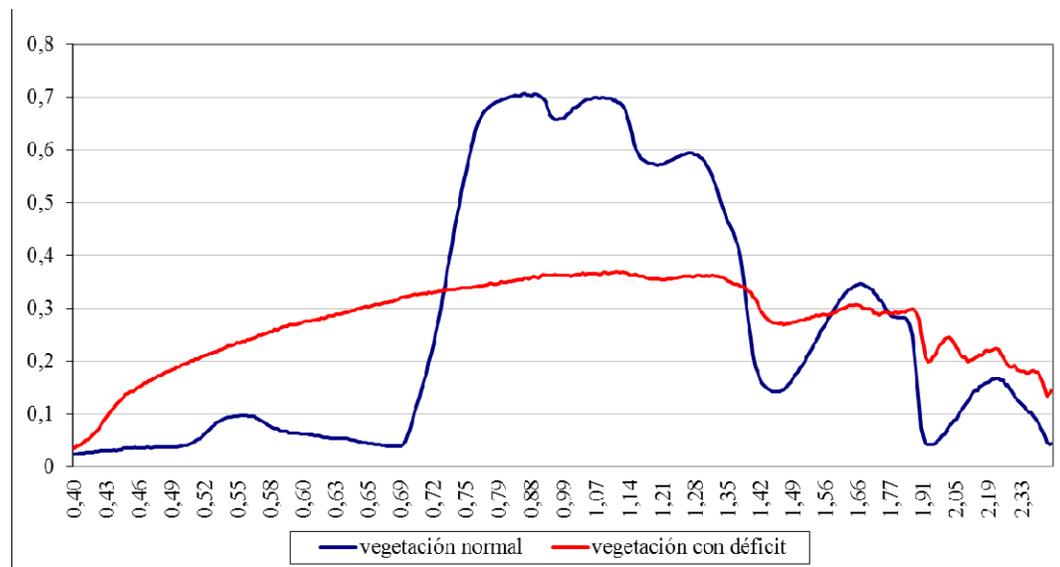


Figura 1.3. Firmas espectrales de vegetación tipo, en condiciones normales y estresada – (Fuente: librería de curvas espectrales del USGS)

Las firmas espectrales varían también con el tipo de vegetación. Esto puede generar inconvenientes al evaluar áreas con diversidad de ambientes. En la Figura 1.4 se muestran algunos ejemplos de distintos tipos de vegetación.

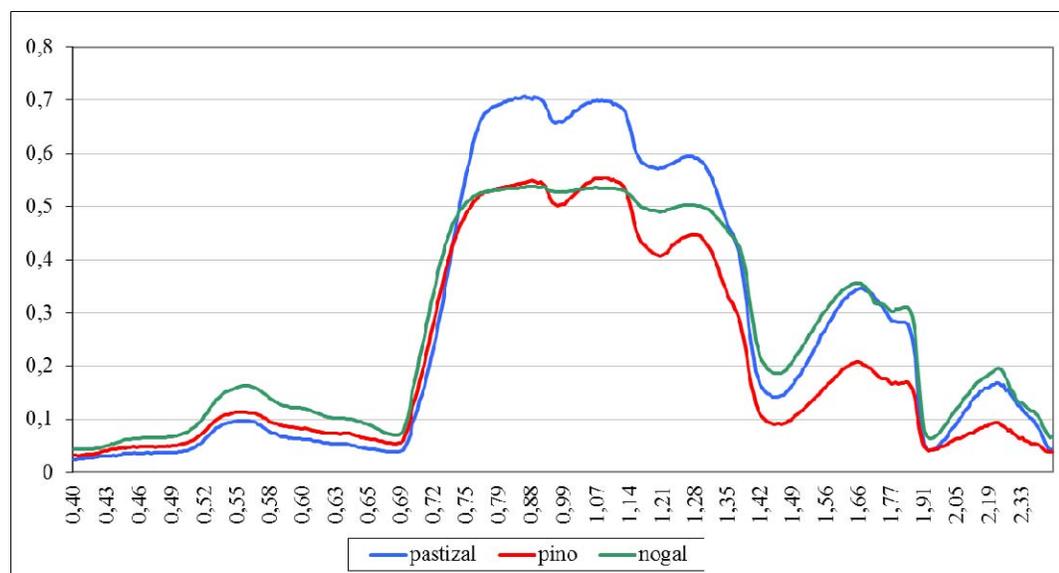


Figura 1.4. Curvas espectrales de distintos tipos de vegetación – (Fuente: librería de curvas espectrales de USGS)

Estas variaciones en una curva espectral son utilizadas para generar diferentes IVs que respondan en determinadas características de la planta. Estas firmas permiten cuantificar la actividad de la clorofila, por ejemplo, mediante el “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) y el “Enhanced Vegetation Index” (EVI) entre otros. También se han desarrollado Índices para evaluar el contenido de humedad de la vegetación como el “Normalized Difference Water Index” NDWI (Gao, 1996). Estos índices han sido publicados en numerosos trabajos para evaluar y monitorear los cambios en la cobertura vegetal tanto espacial como temporal. Kogan et al. (2003), implementaron a partir de una serie temporal de NDVI, el “Vegetation Condition Index” (VCI) en Kazakhstan, el cual

relaciona para un píxel, el valor actual de NDVI con los valores mínimos y máximos del mismo en el período de estudio. Las conclusiones de Kogan et al. (2003) indican que el VCI posee una buena correlación con las variaciones climáticas y con las condiciones-productividad de la vegetación. El VCI puede ser utilizado para analizar los impactos de las sequías entre otros. Elmore et al. (2000), mediante aplicación del “Spectral Mixture Analysis” (SMA) y NDVI, analizaron la precisión de la teledetección en la determinación de cobertura de vegetación y sus cambios en el tiempo en una zona semiárida de California, Estados Unidos. Los resultados concluyeron que el NDVI muestra cualitativamente los cambios en el “verdor” de la vegetación, mientras que el SMA permite estimar con precisión las magnitudes de los cambios. Huete et al. (2002), evaluaron la performance radiométrica y biofísica de los índices NDVI y EVI obtenidos de los productos MODIS en distintos ambientes – semiáridos, sabana y bosque tropical -. Los resultados muestran que ambos IVs presentan un buen comportamiento en la evaluación espacio temporal en las cantidades y condiciones de la vegetación. García et al. (2007), estudió una región de España y concluyó que el análisis de las variaciones en la forma del espacio temperatura de superficie (LST) vs NDVI, resulta una metodología apropiada en la detección de sequías. Nicholson et al. (1998) mediante análisis de precipitaciones y NDVI evaluaron la posible existencia de desertificación en una zona en los límites del Sahara al Oeste de África. La utilización del NDVI permitió, por un lado probar la inexistencia de una supuesta desertificación, y por el otro, demostrar que es un buen indicador de las variaciones de productividad de los suelos.

En la actualidad, existen investigaciones relacionadas al estudio de sequías basadas en la evaluación combinada de métodos de teledetección e hidrometeorológicos. Al respecto, Caparrini et al. (2009) presentaron un plan para monitorear las sequías en

Toscana, Italia, mediante un sistema de evaluación conjunta del SPI, IVs y un modelo hidrológico distribuido. Los primeros resultados indican que tanto el SPI como los IVs no pueden por sí solos evaluar una sequía dado los numerosos factores de la cual depende.

La cuenca del Río Paraná, se encuentra afectada por secuencias de sequías e inundaciones, que son, cada vez más frecuentes (Krepper y Venturini, 2010). Sin embargo, en el noroeste del país hasta el momento, no se ha monitoreado ni cuantificado una sequía utilizando algunas de las técnicas mencionadas en los párrafos anteriores.

El objetivo general de esta tesis es investigar la aplicabilidad de índices propios de la teledetección en la identificación de sequías así como en el seguimiento de su evolución.

Los objetivos específicos de esta tesis son:

- Analizar la variación espacial y temporal de diversos índices de vegetación en un área extensa y con ambientes naturales diversos.
- Analizar la variación temporal de diversos IVs en áreas homogéneas seleccionadas según tipo y cobertura de suelo.
- Analizar la utilización de histogramas de frecuencia en el uso del monitoreo de sequías.
- Comparar los resultados con aplicaciones realizadas en base a índices meteorológicos.

Productos derivados de la teledetección como los IVs, son publicados en la actualidad por diversos organismos. El INTA, a través del Instituto de Clima y Agua

presenta periódicamente para toda la Argentina mapas de NDVI actual y variaciones de mismo en un período de tiempo determinado, así como otros productos. Solamente con un mapa o imagen de un IV, como el NDVI por ejemplo, se dificultaría la identificación de una sequía. Es necesario, entonces, definir metodologías que permitan identificarlas y evaluarlas en los resultados obtenidos por medio de la teledetección.

Si bien uno de los objetivos específicos de esta tesis es analizar la variabilidad temporal en las áreas homogéneas de cobertura vegetal y tipo de suelo identificadas en el área de estudio, se remarca que el interés principal es la evaluación del comportamiento de toda el área en conjunto.

## **2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS A UTILIZAR**

### **2.1 Descripción del área de estudio**

La zona de estudio está emplazada en el Noreste Argentino, consiste en un rectángulo de 200km por 300km, delimitado por las coordenadas N: - 26° 00'00"; S: -29° 00'00"; O: - 62° 00'00"; E: -60° 00'00".Esta área comprende parte de las provincias de Chaco, Santa Fe y Santiago del Estero (ver Figura 2.1). La selección del área de estudio se fundamentó en los siguientes criterios:

- Que sea un área lo suficientemente extensa y con diversidad de coberturas vegetales y tipos de suelo que son necesarias para explorar algunas metodologías, como se propone en este trabajo.

- Que el área de trabajo no genere inconvenientes en la adquisición de imágenes y en los procesos de cálculo. La disponibilidad de imágenes se complica con el incremento de la superficie de estudio por el aumento de posibilidades de presencia de nubes sobre el área de estudio ya que el número de imágenes disponibles disminuye considerablemente.
- Que el área tenga la menor variación temporal posible en los usos de suelo. La finalidad es minimizar las incertidumbres que se puedan generar en los análisis temporales de distintas metodologías debido a un cambio en la cobertura vegetal de una determinada zona (por ejemplo, monte a cultivo). Por esto, se buscó un área con la menor variación temporal posible. En este punto, fue determinante el límite norte donde se desestimó la zona del impenetrable chaqueño y el límite oeste, teniendo en cuenta que Santiago del Estero sufrió un importante desmonte en los últimos años.

La zona de estudio es una llanura, con muy baja pendiente - del orden de 0,0002km/km - y escasos cuerpos de agua. En general la zona presenta dificultades en el escurrimiento de los excesos hídricos. De acuerdo a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, la zona de estudio pertenece al sistema del Río Paraná, y dentro del mismo, a la cuenca de los Bajos Submeridionales. La Provincia del Chaco, a través de la Administración Provincial del Agua (APA), considera a la zona como parte de dos cuencas, Los Bajos de Chorotis al oeste, y los Bajos Submeridionales propiamente dichos al este.

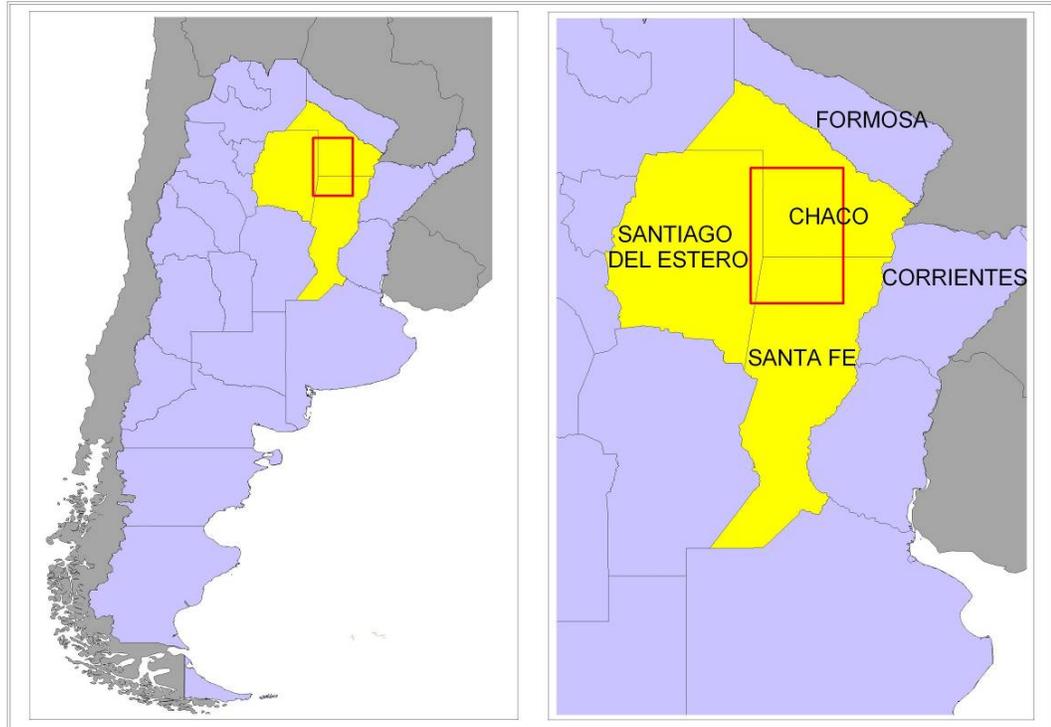


Figura 2.1. Mapa de Argentina con el área de estudio superpuesta.

La región presenta una cobertura vegetal heterogénea, destacándose zonas de cultivos al oeste y pastizales al sur-este con importante actividad ganadera. En menor porcentaje se destaca el monte nativo en el norte y oeste del área de estudio.

Las isohietas muestran una disminución de la precipitación en la dirección Este – Oeste, oscilando las precipitaciones medias anuales entre 1100mm en el este a 800mm al oeste. Sin embargo, la variabilidad de la precipitación en el sentido norte – sur también es significativa. La Figura 2.2(a) muestra el mapa de isohietas de toda la Argentina obtenido de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, mientras que la 2.2(b) el de temperaturas. Si concentramos la atención en norte del país solamente, se puede ver la marcada diferencia entre el este y el oeste, y en menor medida las variaciones norte-sur.

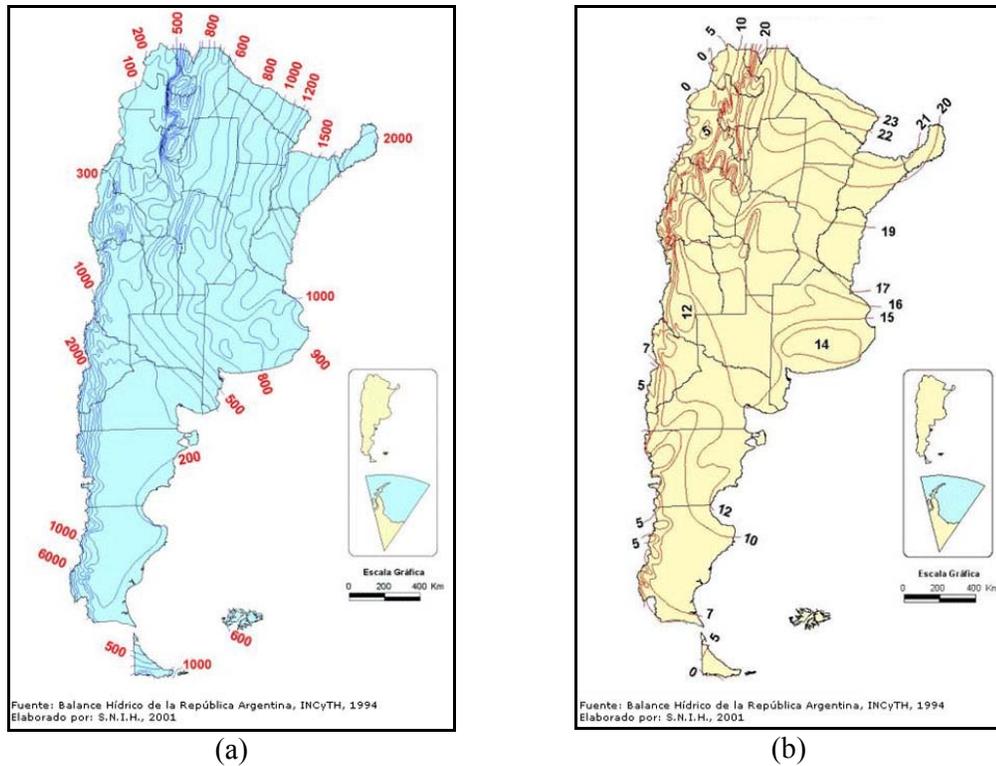
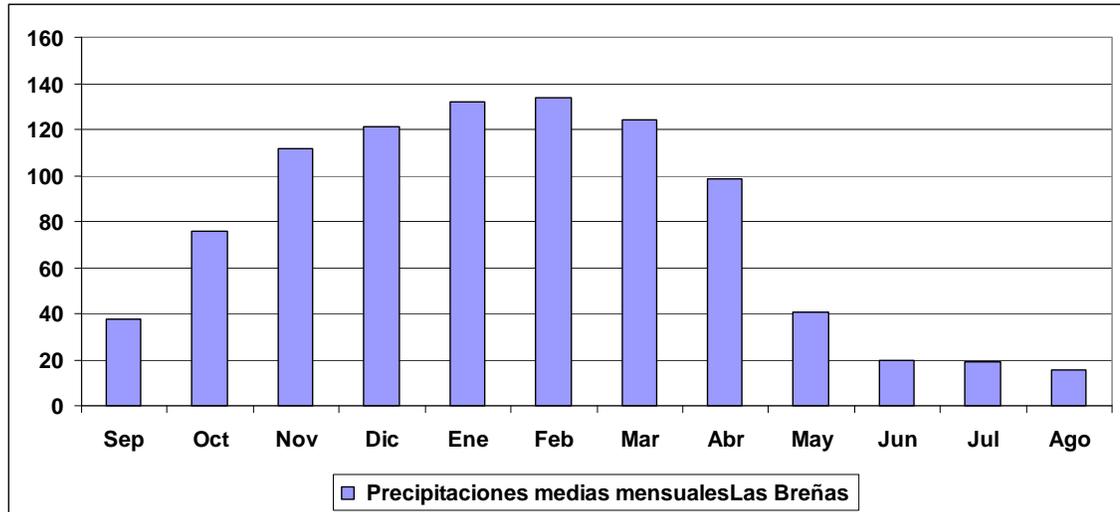


Figura 2.2. Valores medios anuales correspondiente a: (a) precipitación, (b) temperatura.  
Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos

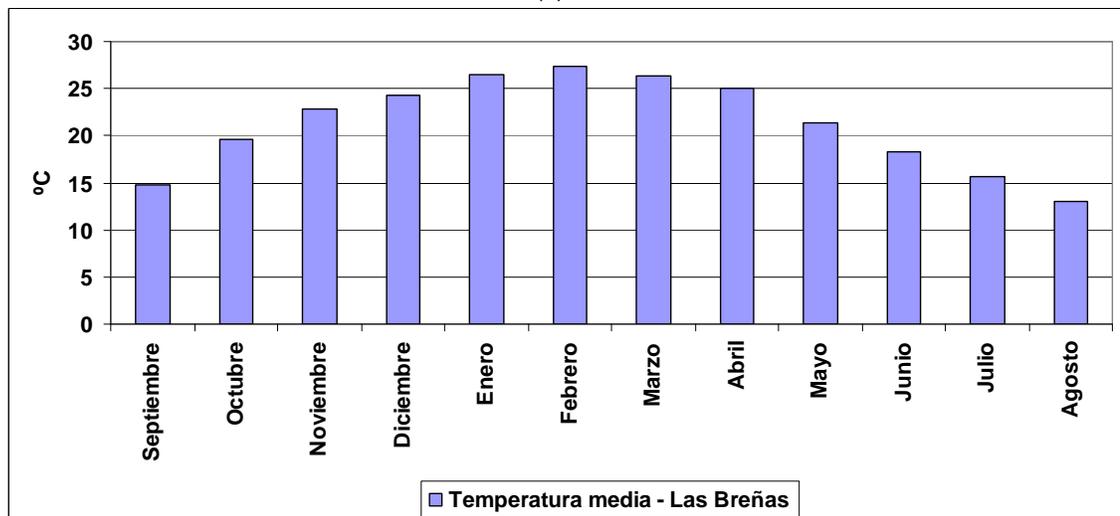
La zona analizada posee un clima subtropical con una marcada estación seca. La misma se puede apreciar en la figura 2.3, con los valores medios mensuales de precipitación y temperatura de la localidad de Las Breñas, en la Provincia del Chaco. Las precipitaciones se concentran entre los meses de noviembre y abril, coincidente con las mayores temperaturas.

En general en la zona de estudio podemos destacar tres tipos de suelo (INTA, 1974) que se describen a continuación. Al este de la zona, se destacan las arcillas y limos lacustres, consistente en material depositado por el agua en áreas de muy bajo escurrimiento. En el centro, prevalecen los loes, constituidos por partículas muy finas y de alta fertilidad potencial debido a su contenido de carbonato de calcio. Finalmente, al oeste,

prevalece el material denominado aluvial local fósil, característico de zonas con cauces de ríos muertos y llanuras fluviales surcadas por cañadas.



(a)



(b)

Figura 2.3. Valores medios mensuales de la localidad de Las Breñas, correspondiente a: (a) precipitación, (b) temperatura. Fuente: INTA

La actividad económica de la región consiste principalmente en prácticas agrícolas y ganaderas (APA, 2004). Los datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca ([www.siaa.gov.ar](http://www.siaa.gov.ar)) indican que en el año 2001 la soja ya constituía el principal cultivo de la región. En menor medida se siembra algodón, girasol, maíz, sorgo y trigo. Si bien las

provincias de Chaco y Santiago del Estero se han caracterizado históricamente por ser principalmente productoras de algodón, al inicio del período de estudio, aparece como un cultivo secundario. La superficie cultivada con algodón para la provincia del Chaco en el período 1995/1996 fue de 600.000 hectáreas, en contraste con las 90.000 hectáreas del 2001/2002.

La tabla 2.1 muestra la evolución de los principales cultivos durante el período de estudio, en los departamentos de la provincia del Chaco que se encuentran en la zona de estudio (17 departamentos), mientras que la tabla 2.2, es similar a la tabla 2.1 para Santa Fe en los departamentos de 9 de Julio y Vera. El sector de Santiago del Estero es muy pequeño y por la conformación de los departamentos la información puede no ser representativa, y por eso no se la analizó.

Hectáreas Cosechadas - Provincia de Chaco (Fuente: <a href="http://www.siaa.gov.ar">www.siaa.gov.ar</a> )						
Campaña	Algodón	Girasol	Maíz	Soja	Trigo	Tot. Ha cosechadas
2000 /01	26,61%	13,94%	9,63%	41,20%	8,62%	986350
2001 /02	8,51%	15,50%	11,14%	54,34%	10,51%	1032350
2002 /03	5,76%	21,00%	8,40%	53,99%	10,86%	1381200
2003 /04	10,99%	18,07%	8,31%	53,23%	9,40%	1383250
2004 /05	21,14%	13,35%	7,43%	56,90%	1,17%	1123339
2005 /06	15,69%	24,42%	10,44%	45,23%	4,22%	1275089
2006 /07	16,23%	22,23%	10,34%	44,26%	6,94%	1583747
2007 /08	13,57%	20,42%	9,57%	55,30%	1,13%	1363094
2008 /09	19,80%	11,93%	5,60%	62,56%	0,11%	961215

Tabla 2.1 Información de cultivos el sector dentro de la provincia del Chaco

Hectáreas Cosechadas - Provincia de Santa Fe (Fuente: <a href="http://www.siiia.gov.ar">www.siiia.gov.ar</a> )							
Campaña	Algodón	Girasol	Maíz	Soja	Sorgo	Trigo	Tot. Ha cosechadas
2000 /01	5,55%	6,72%	8,77%	54,65%	7,36%	16,95%	171100
2001 /02	2,53%	5,75%	7,82%	49,68%	7,77%	26,45%	217400
2002 /03	1,00%	9,21%	10,71%	42,23%	9,96%	26,89%	200800
2003 /04	1,61%	9,29%	9,29%	43,60%	10,38%	25,84%	247700
2004 /05	1,73%	2,29%	9,31%	52,70%	10,38%	23,60%	196610
2005 /06	3,52%	10,14%	8,21%	53,55%	11,78%	12,80%	207100
2006 /07	4,51%	12,62%	9,56%	42,16%	15,82%	15,33%	206100
2007 /08	5,51%	37,77%	1,97%	44,14%	4,72%	5,90%	127100
2008 /09	21,24%	26,55%	0,00%	50,09%	0,00%	2,12%	113000

Tabla 2.2 Información de cultivos el sector dentro de la provincia de Santa Fe

Como se mencionó en el párrafo anterior, el cultivo principal durante el período 2001 – 2009 fue la soja (más del 50% de toda la superficie sembrada), y las variaciones en superficie sembrada a lo largo de las campañas no han sido significativas. Sin embargo las superficies sembradas de los cultivos secundarios han variado en porcentajes importantes en el período mencionado.

## **2.2 Datos disponibles**

Se cuenta con información meteorológica, cartográfica y satelital proveniente de diferentes organismos públicos.

A continuación se presenta un detalle de los datos disponibles para esta tesis.

### 2.2.1 Datos Meteorológicos

Las estaciones del INTA se han caracterizado por la medición exhaustiva de gran número de variables. INTA ha cedido información de varias estaciones experimentales para el desarrollo de esta tesis. Los datos consisten en series de datos mensuales de precipitación; temperaturas medias, máximas y mínimas; radiación global; evaporación de tanque; heliofanía efectiva y relativa; humedad relativa; tensión de vapor; velocidad del viento a 2m y 10m. La Tabla 2.3, detalla el nombre de las estaciones, la provincia a la que pertenece y los años de registro.

Estación	Provincia	Período de registro
Las Breñas	Chaco	1961 - 2009
P. R. Sáenz Peña	Chaco	1961 - 2008
Reconquista	Santa Fe	1970 - 2009
Santiago del Estero	Santa Fe	1961 - 2009
Ceres	Santa Fe	1961 - 2009
Colonia Benitez	Chaco	1968 - 2009
Las Lomitas	Formosa	1961 - 2009
Formosa	Formosa	1962 - 2009
Bella Vista	Corrientes	1961 - 2009
Oliveros	Santa Fe	1961 - 2009

Tabla 2.3 Estaciones Meteorológicas INTA

El problema de la densidad espacial de las estaciones meteorológicas se ve claramente en las estaciones del INTA. De las estaciones mencionadas en la Tabla 2.3, solamente las estaciones de Las Breñas y Sáenz Peña se encuentran en el área de estudio. Por tal motivo, también se utilizará información de otros organismos. Se ha analizado fundamentalmente datos pluviométricos de la Administración Provincial del Agua del Chaco (APA), dado que esta provincia posee la mayor superficie en la zona de estudio. Las principales estaciones pluviométricas principales de la APA son 68, uno por cada municipio, y poseen registros desde el año 1954 la mayoría de ellas..

### 2.2.2 Datos de suelo

En Argentina, se utiliza el sistema de clasificación americano “Soil Taxonomy”. Las categorías del sistema, desde los más altos son:

- Orden
- Suborden
- gran grupo
- subgrupo
- familia
- serie.

Las diferencias entre los distintos órdenes (12 clases), está en los procesos formadores de los suelos. Existen cinco factores formadores de suelo: clima, material original, relieve, biota y edad. En la categoría suborden – aproximadamente 58 clases – se subdividen los órdenes por la presencia o ausencia de humedad, material madre y regímenes de humedad

del suelo. La subdivisión de subórdenes en grandes grupos, se realiza fundamentalmente en base a clase, ordenamiento y grado de expresión de los horizontes, niveles de bases y regímenes de temperatura. Los subgrupos indican inter-gradaciones a otros grandes grupos, subórdenes y ordenes, y extra-gradaciones a “no suelos”. En la categoría familia, las diferencias se encuentran en distintas propiedades para el crecimiento de las plantas. Finalmente, en la series, las características diferenciadoras se encuentran en color, textura, estructura, propiedades químicas y mineralógicas de los horizontes principalmente.

Los tipos de suelo en el área de estudio, se caracterizan por una importante variabilidad espacial. Al respecto, la Figura 2.4 muestra los tipos de suelo de las provincias de Chaco, Santa Fe y Santiago del Estero, publicados por el INTA en escala 1:500.000, donde se aprecian los ordenes principales de la clasificación adoptada. Estos mapas poseen numerosos atributos asociados. En algunas zonas los mapas se encuentran en escala 1:50.000, e incluyen cartas taxonómicas y cartas de aptitud de uso de suelo.

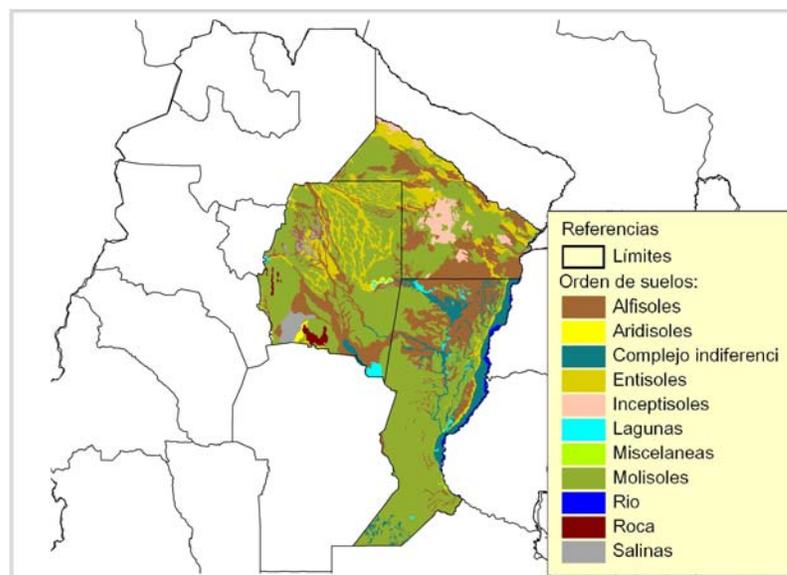
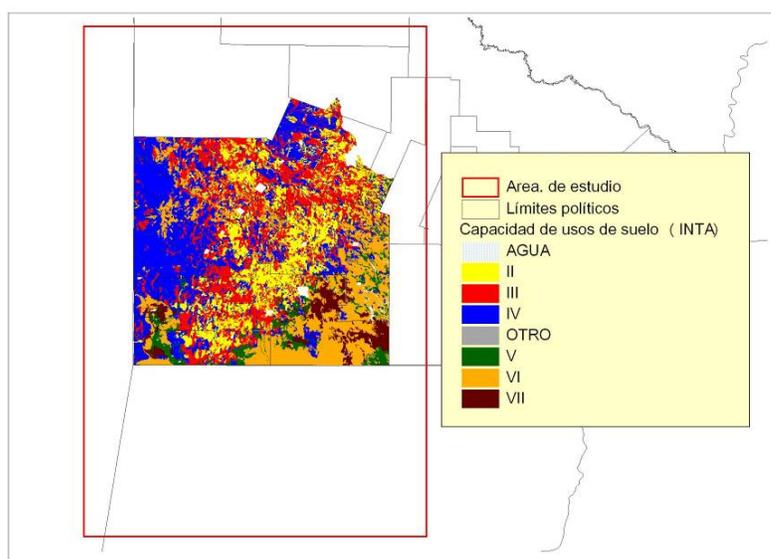
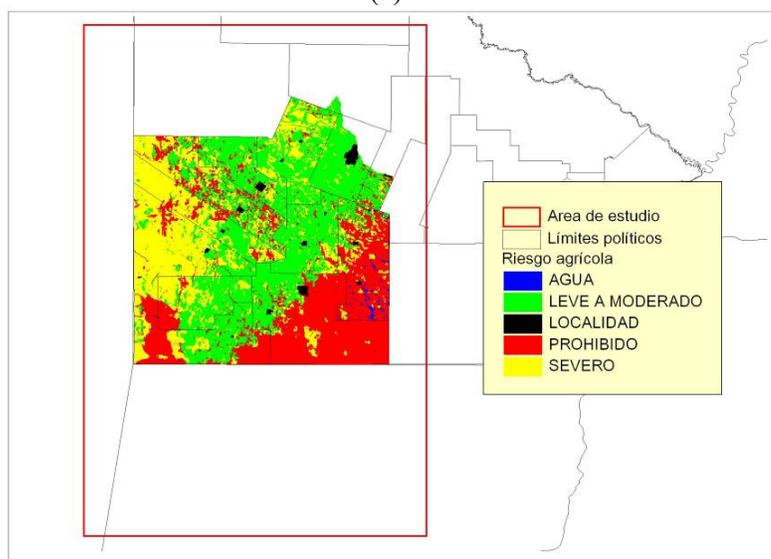


Figura 2.4. Mapas de suelos escala 1:500.000; orden principal de los suelos– (Fuente: INTA)

Los estudios de Riesgo Hídrico (Estudios Básicos - APA, 2004, 2005 y 2007), que incluyen cartografía en escala 1:50000 como mapa de capacidad de uso de los suelos (Figura 2.5a) y mapa de riesgo agrícola (Figura 2.5b) muestran la importancia de los eventos extremos en la región.



(a)



(b)

Figura 2.5. (a) Mapa de Capacidad de Uso de suelos del INTA; (b). Mapa de Riesgo Agrícola. (Fuente: Dirección de Estudios Básicos – APA, 2004)

La clasificación por capacidad de uso de los suelos que utiliza el INTA, consiste en un agrupamiento de suelos según su aptitud para ser explotados, teniendo en cuenta el tipo y grado de limitación permanente. El INTA estableció ocho clases con limitaciones que van en aumento. La zona de estudio no presenta clases I y VIII, que están asociadas a suelos con condiciones ideales para el desarrollo de la actividad agrícola, y suelos con las mayores limitantes para la actividad agrícola-ganadera, respectivamente. Las clases II, III y IV con posibilidad de cultivos, difieren en el grado de sus limitaciones hídricas y eólicas, siendo ligeras en la clase II a severas en la IV. La reducción de los rendimientos de cultivos por falta de humedad es ocasional en la II a muy frecuente en la IV. La clase VI presenta limitaciones moderadas para pasturas o forestales, mientras que la VII presenta severas. La clase V asociada a suelos aptos para ganadería, es muy escasa.

En líneas generales, la zona centro y oeste del área de estudio, presenta suelos aptos para cultivo con restricciones en aumento hacia el oeste (Figura 2.5a), mientras que en el este, los suelos sólo permiten la actividad ganadera. La carta de suelos presenta una fuerte relación con el mapa de riesgo agrícola (Figura 2.5b), que indica un riesgo severo al oeste, leve a moderado en el centro y prohibido en el este.

### 2.2.3 Imágenes Satelitales

En esta tesis se trabajó con imágenes del producto MOD021KM – Level 1B Calibrated Radiances, para el período 2001 – 2009. La resolución espacial para todas las bandas de estas imágenes es de 1Km. La selección de imágenes se ha efectuado revisando las imágenes de los 3240 días que conforman el período de estudio a fin de detectar la

presencia o no de nubes, y se ha llegado a obtener hasta 35 escenas libres de nubes en los años más secos como 2008 y en el orden de las 20 para los más húmedos. La Tabla 2.4 presenta el listado de imágenes trabajadas hasta la fecha de presentación de esta propuesta.

Gregoriano	Juliano	Gregoriano	Juliano	Gregoriano	Juliano
12/01/2001	2001,012	01/01/2004	2004,001	01/01/2007	2007,001
10/03/2001	2001,069	06/02/2004	2004,037	11/02/2007	2007,042
18/04/2001	2001,108	07/05/2004	2004,128	27/04/2007	2007,117
28/07/2001	2001,209	31/07/2004	2004,213	19/07/2007	2007,200
09/10/2001	2001,282	14/10/2004	2004,288	19/10/2007	2007,292
30/10/2001	2001,303	21/11/2004	2004,326	07/11/2007	2007,311
08/01/2002	2002,008	15/12/2004	2004,350	07/01/2008	2008,007
04/02/2002	2002,035	05/01/2005	2005,005	12/02/2008	2008,043
10/05/2002	2002,130	15/02/2005	2005,046	02/05/2008	2008,123
21/09/2002	2002,264	29/04/2005	2005,119	17/07/2008	2008,199
26/10/2002	2002,299	20/07/2005	2005,201	09/10/2008	2008,283
11/11/2002	2002,315	11/10/2005	2005,284	17/11/2008	2008,322
13/01/2003	2003,013	31/10/2005	2005,304	05/01/2009	2009,005
09/03/2003	2003,045	08/01/2006	2006,008	13/02/2009	2009,044
21/04/2003	2003,111	16/02/2006	2006,047	02/04/2009	2009,092
24/05/2003	2003,144	09/03/2006	2006,129	03/05/2009	2009,123
31/07/2003	2003,212	19/07/2006	2006,200	24/07/2009	2009,205
15/10/2003	2003,288	13/10/2006	2006,286	30/08/2009	2009,242
13/11/2003	2003,317	12/11/2006	2006,316	12/10/2009	2009,285

Tabla 2.4 Listado de imágenes MODIS analizadas del área de estudio

El primer satélite del programa Earth Observing System (EOS), EOS-Terra, fue puesto en órbita en diciembre de 1999, con el sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) entre los 5 sensores a bordo. El satélite EOS-Terra orbita a una altitud de 705 Km y recorre la Tierra varias veces al día. MODIS proporciona información en 36 bandas espectrales en el rango de longitudes de onda de 0,4 - 14,385  $\mu\text{m}$  (visible a infrarrojo térmico), con una resolución espacial que varía entre los 250 m a los 1000 m, y un ancho de barrido de 2330 km. En la actualidad se distribuyen 44 productos derivados de las 36 bandas, los que se dividen en las siguientes categorías: Calibración, Atmosféricos, Superficiales, Criósfera y Oceánicos (<http://modis.gsfc.nasa.gov>). La resolución temporal es de dos imágenes por día, una diurna y nocturna la restante.

### **3. ANÁLISIS ANTECEDENTE: INDICE DE PALMER (PDSI)**

Con el fin de poder analizar la eficiencia en la detección y monitoreo de sequías mediante metodologías de teledetección, se desarrolló el PDSI a las estaciones del INTA (Tabla 2.3).

El PDSI tiene su origen en un balance hídrico en el perfil del suelo. Este balance consiste básicamente en comparar los montos actuales de precipitación con los montos de precipitación necesarios para mantener las condiciones de humedad en el perfil del suelo, dentro de los valores normales, con salidas en forma de índices. La Tabla 3.1 muestra las categorías del PDSI.

Valor de PDSI	Categoría
4.00 o mayor	Humedad Extrema
3.00 a 3.99	Humedad Severa
2.00 a 2.99	Humedad Moderada
1.00 a 1.99	Humedad Ligera
0.50 a 0.99	Humedad Incipiente
0.49 a -0.49	Normal
-0.50 a -0.99	Sequía Incipiente
-1.00 a -1.99	Sequía Ligera
-2.00 a -2.99	Sequía moderada
-3.00 a 3.99	Sequía Severa
-4.00 o menor	Sequía Extrema

Tabla 3.1 Categorías PDSI según Palmer (1965)

### 3.1 Consideraciones sobre el PDSI

La evaluación de sequías a escala regional, requiere la aplicación de metodologías objetivas que permitan analizar la severidad de la misma. El PDSI es una de las pocas metodologías estandarizadas disponibles en la evaluación de sequías permitiendo realizar comparaciones tanto espaciales como temporales.

El propósito original de Palmer fue el desarrollo de un índice meteorológico. Sin embargo, el método involucra la precipitación, evapotranspiración y las condiciones de humedad del suelo, que son necesarias en la determinación de sequías hidrológicas (Alley, 1984).

El PDSI no es ajeno a críticas. Una ellas, es la consideración arbitraria de determinadas relaciones empíricas que involucra el método, habiendo utilizado en su desarrollo, registros de solo nueve estaciones.

Alley (1984), plantea diversas limitaciones en el uso de balances hídricos, necesario en el cálculo del PDSI. Una de ellas es la aplicación del método de Thornthwaite en el cálculo de la evapotranspiración potencial, teniendo en cuenta la posibilidad de la utilización de otros. Bautista et al. (2009) sugieren la implementación de la ecuación de Hargreaves en sustitución de la de Thornthwaite, en zonas con escasos datos. Alley (1984), además critica, que el balance mantiene constante la capacidad de almacenamiento de agua en el perfil del suelo, cuando debería, tener en cuenta las variaciones estacionales, especialmente en zonas de cultivos. La ausencia de tiempo de retardo entre la generación del exceso de agua y la aparición del escurrimiento, es probablemente, la mayor deficiencia del balance de Palmer hasta ahora publicada.

La designación arbitraria de las clases de sequía mostradas en la Tabla 3.1, se menciona cómo el problema potencial más serio del método, especialmente por la utilización de registros de sólo dos estaciones meteorológicas localizadas en los estados de Iowa y Kansas – USA (Alley, 1984).

Wells et. al. (2004), modificaron algunos procedimientos en el cálculo del PDSI, denominándose al índice “self-calibrating Palmer drought severity index” (SC-PDSI). Las principales diferencias con respecto al PDSI están, en la utilización de datos propios de la estación en la calibración de distintos parámetros del método. Por otro lado, asocia un

tiempo de recurrencia a la sequía y a la humedad extrema – magnitudes (+)4 y (-)4 - y ajustar así, los valores del índice en todo el período.

En la Argentina, Sacchi, et. al. (2008), compararon los resultados del PDSI original y el SC-PDSI para la localidad de Zavalla – provincia de Santa Fe. Se encontró que el SC-PDSI posee mayor sensibilidad a las condiciones climáticas de esa zona, con mayor asignación de la intensidad a las situaciones de deficiencias hídricas.

En este trabajo se desarrolló el Índice de Palmer con las modificaciones propuestas por Wells et. al. (2004), y utilizando la ecuación de Hargreaves – Samani (Samani, 2000) para la estimación de la evapotranspiración potencial.

### 3.2 Metodología

Para la obtención del índice de Palmer se realizó primeramente un balance hídrico a paso mensual, con la finalidad de estimar los valores mensuales reales de evapotranspiración potencial (PE), la recarga (R), la pérdida (L) y el escurrimiento (RO), así como también los valores potenciales de la recarga potencial (PR), la pérdida potencial (PL) y el escurrimiento potencial (PRO), para finalmente determinar el valor de evapotranspiración real (ET).

La capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (AWC) es muy importante para el balance. La misma está dividida en dos capas, la superior (AWCu) que se asume igual a 25mm y la inferior como la diferencia con respecto a la total, la cual depende de las características de la zona que se estudia. La humedad de la capa inferior no puede ser

removida o recargada, hasta que toda la humedad disponible de AWCu haya sido removida o recargada.

Como se mencionó, en la estimación de la PE se utilizó la ecuación de Hargreaves – Samani (Samani, 2000). El método de Thornthwaite, utilizado por Palmer (1965), para estimar la evapotranspiración potencial, ha sido objeto de numerosas críticas por no reflejar una buena correlación con la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), normalmente observada tanto en tanques de evaporación con la calculada por el método FAO Penman (Bautista et. al., 2009).

La ecuación de Hargreaves – Samani para la determinación de la evapotranspiración está dada por la ecuación (3.1):

$$ET_o = 0.0135 \times KT \times Ra \times TD^{0.5} \times (TC + 17.8) \quad (3.1)$$

donde:

TD = diferencia entre los promedios diarios de temperatura máxima y mínima (°C),

TC = temperatura media diaria (°C),

Ra = radiación extraterrestre (mm/día),

KT = coeficiente empírico.

En la literatura científica, existen diversas ecuaciones que permiten ajustar KT (Samani, 2000; Allen, 1996). En aquellos lugares en que se cuente además con información de radiación solar, como es nuestro caso particular, se puede deducir KT de la ecuación (3.2):

$$R_s = K_T \times R_a \times TD^{0.5} \quad (3.2)$$

donde:

$R_s$  = radiación solar global.

$TD$  = diferencia entre los promedios diarios de temperatura máxima y mínima ( $^{\circ}C$ ).

$R_a$  = radiación extraterrestre (mm/día).

Cada término del balance es necesario para la determinación de los coeficientes de escurrentía ( $\alpha$ ), recarga ( $\beta$ ), pérdida ( $\delta$ ) y escurrimiento ( $\gamma$ ), según se observa en la ecuación (3.3)

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \frac{\overline{ET}_i}{\overline{PE}_i} & \beta_i &= \frac{\overline{R}_i}{\overline{PR}_i} \\ \gamma_i &= \frac{\overline{RO}_i}{\overline{PRO}_i} & \delta_i &= \frac{\overline{Li}}{\overline{PL}_i} \end{aligned} \quad (3.3)$$

donde el subíndice  $i$  indica un valor para cada mes del año, y la barra en cada término indica valores medios en el período de estudio.

Estos coeficientes caracterizan las condiciones climáticas existentes y nos permiten determinar, para cada mes, la precipitación característica  $P^{\wedge}$  según la ecuación (3.4), la cual representa el monto de precipitación necesario para mantener la humedad del suelo en valores normales, (Palmer, 1965).

$$P^{\wedge} = (\alpha_i P E + \beta_i P R + \gamma_i P R O + \delta_i P L) \quad (3.4)$$

La diferencia entre la precipitación real de un mes y la determinada como característica (D) es un primer indicador del déficit o exceso en la humedad del suelo. Sin embargo, un mismo valor de D, tendrá distintos significados para diferentes climas y diferentes localidades, (Palmer, 1965).

Para corregir esto se calcula lo que se denomina el “índice de anomalía de humedad”, Z.

$$Z = D \times K \quad (3.5)$$

El coeficiente de K se calcula con la ecuación (3.6). Se lo denomina factor de peso o característica climática. K surge de una primera aproximación de k', que representa una primera aproximación de las características climáticas de una localidad.

$$K_i = \left( \frac{17.6}{\sum_{i=1}^{12} \bar{D}_i K_i'} \right) K_i' \quad (3.6)$$

$$K_i' = 1.5 \log_{10} \left[ \frac{\left( \frac{\bar{P} \bar{E}_i + \bar{R}_i + \bar{R} \bar{O}_i}{\bar{P}_i + \bar{L}_i} i + 2.8 \right)}{\bar{D}_i} \right] + 0.5 \quad (3.7)$$

El coeficiente K, es calculado para ajustar el valor de d, de manera de poder realizar comparaciones tanto espaciales como temporales. El valor 17.6 de la ecuación (3.6) es una

constante obtenida por Palmer, utilizando datos de nueve localidades de los Estados Unidos (Palmer, 1965). El valor 17.6 puede ser modificado aplicando una calibración para la zona en estudio. Finalmente, el valor de PDSI se obtiene a partir de  $Z$  con la fórmula:

$$PDSI_i = 0.897 PDSI_{i-1} + \frac{1}{3} Z_i \quad (3.8)$$

Los continuos trabajos de investigación en el tema y el desarrollo de la informática, han permitido contar en la actualidad con otras metodologías para optimizar la calibración de la característica climática, sustituyéndose la ecuación original de  $K$  por las ecuaciones (3.9) y (3.10) (Wells et al., 2004).

$$K_i = \left\{ \frac{PDSI \text{ promedio esperado}}{PDSI \text{ promedio observado}} \right. \quad (3.9)$$

$$K_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{PDSI \text{ esperado del percentil } fe}{PDSI \text{ observado del percentil } fe} \\ \frac{PDSI \text{ esperado del percentil } (100 - fe)}{PDSI \text{ observado del percentil } (100 - fe)} \end{array} \right. \quad (3.10)$$

Suponiendo, arbitrariamente, que una sequía extrema es un evento que ocurre una vez cada 50 años, se implementó un valor de confianza de 0.16 en la ecuación (3.11) para la determinación de la característica climática.

$$K_i = \begin{cases} k' (-4.00/0.166 \text{ percentil}) & \text{si } d < 0 \\ k' (4.00/99.998 \text{ percentil}) & \text{si } d > 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

El PDSI es un índice acumulativo, es decir, que cada valor está basado en su predecesor. Un valor dado de PDSI es la suma de valores ponderados entre el PDSI del mes anterior y el índice de anomalía de humedad “ $Z$ ”. Los coeficientes 0,897 y 1/3 de la ecuación (3.8) son denominados factores de duración que deberían ser calibrados para las condiciones locales. Palmer (1965), en su revisión de los factores de duración, implementó

la utilización de tres valores de PDSI,  $X_1$  (período húmedo con incidencia a establecerse),  $X_2$  (período de sequía con incidencia a establecerse) y  $X_3$  (período húmedo o seco ya establecido).

Así, llegamos a una generalización de la ecuación (3.8) de la siguiente forma:

$$PDSI_i = p \times PDSI_{i-1} + q \times Z \quad (3.12)$$

Palmer (1965) determinó sus factores de duración en función de una relación lineal entre las intensidades de sequía más extremas y sus respectivas duraciones, pudiendo determinarse  $p$  y  $q$  por las ecuaciones (3.13) y (3.14):

$$p = \left(1 - \frac{m}{m+b}\right) \quad (3.13)$$

$$q = \left(\frac{C}{m+b}\right) \quad (3.14)$$

donde:

$m$  = pendiente de la línea de ajuste

$b$  = valor donde la recta interseca  $y$ .

$C$  = valor de calibración del índice (entre -4 y +4)

La modificación de Wells, et. al. (2004), radica en el cálculo de dos valores de PDSI,  $X_1$  para períodos secos y  $X_2$ , para períodos húmedos, obteniéndose así, un par de valores  $p - q$  para cada uno de ellos, mediante las ecuaciones (3.13) y (3.14). Como

ejemplo, en la Figura 3.1 se muestra la forma de obtener los valores  $m$  y  $b$  para cada  $X_i$ . Primeramente, se procede a seleccionar separadamente los valores húmedos y secos más extremos de  $Z$  acumulados, así como sus respectivas duraciones. Luego se determina la ecuación de la recta de regresión entre ambas variables. Wells, et. al (2004) plantea el ajuste para las condiciones más extremas y por ello desplaza la recta hacia arriba o hacia abajo, según corresponda, manteniendo la pendiente, como se observa en la Figura 3.1. De este modo se tienen tres valores de PDSI para cada mes,  $X_{\text{original}}$  (obtenido con la ecuación 3.8) y  $X_1$  y  $X_2$  (para períodos secos y húmedos respectivamente, obtenidos mediante 3.12). La obtención del valor final de PDSI, se realizó analizando el valor de PDSI del mes anterior; si el valor se encuentra entre  $-1$  y  $+1$  (humedad o sequía incipiente) entonces permanece el  $X_{\text{original}}$ ; caso contrario,  $X_1$  o  $X_2$  según corresponda.

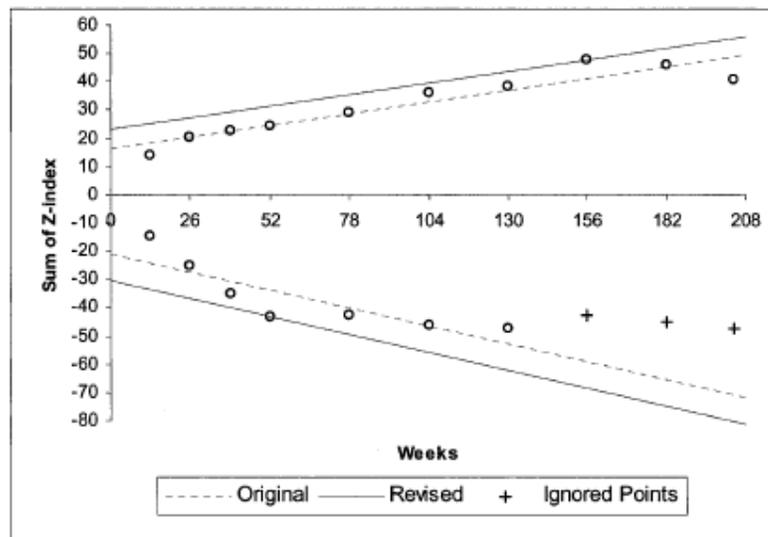


Figura 3.1. Ajuste de los factores de duración. Fuente: Wells, et. al. (2004)

En resumen, los pasos para la determinación de PDSI fueron:

- a) La determinación del balance hídrico, determinando valores reales y potenciales de los distintos componentes del mismo.
- b) El cálculo de los coeficientes y de la precipitación característica mediante las expresiones (3.3) y (3.4)
- c) El cálculo de las anomalías de humedad mediante las expresiones (3.5) y (3.6)
- d) El cálculo del PDSI mediante la expresión (3.8), con los resultados obtenidos en los pasos b) y c).
- e) La obtención del 99.998th y 0.166th percentil de los valores de PDSI
- f) El re-cálculo de la expresión (3.5) utilizando (3.11)
- g) La determinación de  $X_1$  y  $X_2$  mediante la expresión (3.12), con las ecuaciones (3.13) y (3.14)
- h) La obtención del PDSI.

De aquí en adelante, se hará referencia como PDSI a la metodología descrita en el punto 3.2.

El PDSI se aplicó a las estaciones del INTA de Reconquista, Las Breñas y Santiago del Estero, indicadas en la tabla (2.3).

### 3.3 Resultados del PDSI

En la Figura 3.2 se muestran los valores históricos del PDSI de cada localidad analizada.

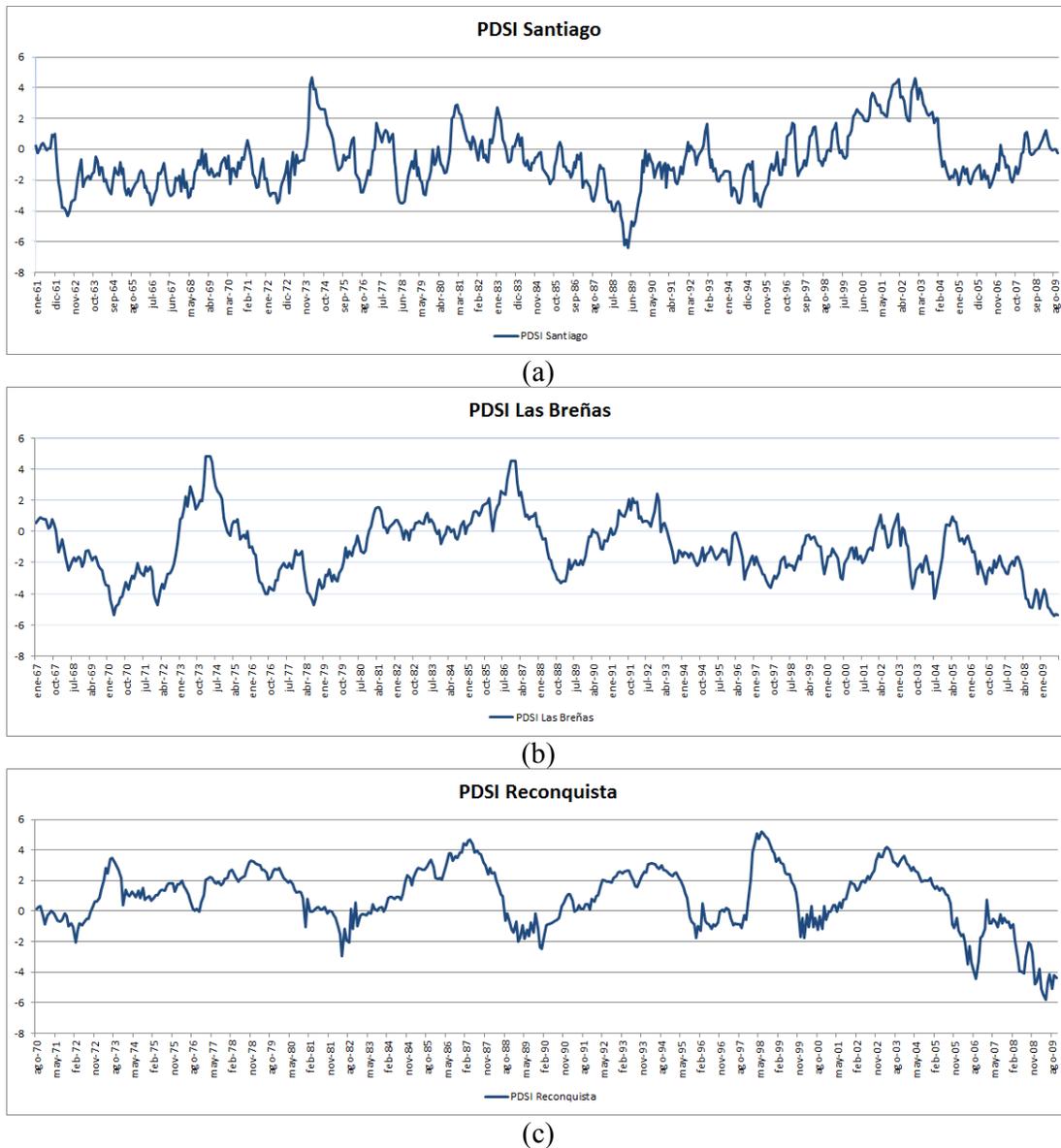


Figura 3.2. Valores de PDSI para: (a) Santiago del Estero; (b) Las Breñas y (c) Reconquista

Los valores encontrados mostraron que tanto las estaciones de Las Breñas como Santiago del Estero presentan aproximadamente igual cantidad de períodos húmedos seguidos de secos (o viceversa); mientras que, Reconquista se caracteriza por ser una zona con excesos hídricos la mayor parte del tiempo, salvo en los últimos dos años donde se observa una sequía extrema.

En toda la zona, la última sequía posee rangos de severa a extremadamente severa. El análisis del registro histórico, indicó que para la zona Este del área estudiada, la sequía de los últimos años tuvo un carácter de excepcional por ser la primera vez que se alcanzan valores extremos. Se destaca que tanto el centro como el oeste han experimentado en años anteriores períodos de sequía importantes. Esto es evidente al analizar la distribución de la precipitación en la zona como se describió en el punto 2.1 “Descripción del Área de Estudio”. Las isohietas poseen una disminución de Este – Oeste, y en el centro cerca de la localidad de Las Breñas, se encontraría el equilibrio entre la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial media anual, en base a observaciones de generación de escurrimiento y condiciones de humedad en el perfil del suelo. Sumado esto a la estacionalidad de la precipitación (noviembre – abril), es razonable obtener valores de PDSI negativos durante años húmedos.

Los resultados del PDSI indican que, en el período 1967-2009, las sequías que duran varios años, son frecuentes en la región. Si bien la última sequía se registró entre severa y extrema, no fue excepcional ni uniforme en el espacio (Szymula et. al.,2010).

La Figura 3.3 muestra los resultados del PDSI para la última década en las tres localidades de la región analizada, apreciándose disparidad en los valores para algunos períodos, especialmente en Santiago del Estero que pertenece al centro del país. En líneas generales, el PDSI indica que la región, tuvo un período húmedo hasta el año 2003. A partir de este momento, los valores empiezan a caer – valores de sequía extrema en algunos momentos, como el caso de Las Breñas – hasta mediados del 2006 donde se produce una ligera recuperación – Valores de sequía incipiente a moderada -. A partir del año 2008, las

estaciones de Reconquista y Las Breñas, acusan hasta el final, una sequía extrema, mientras que Santiago posee valores de humedad normal.

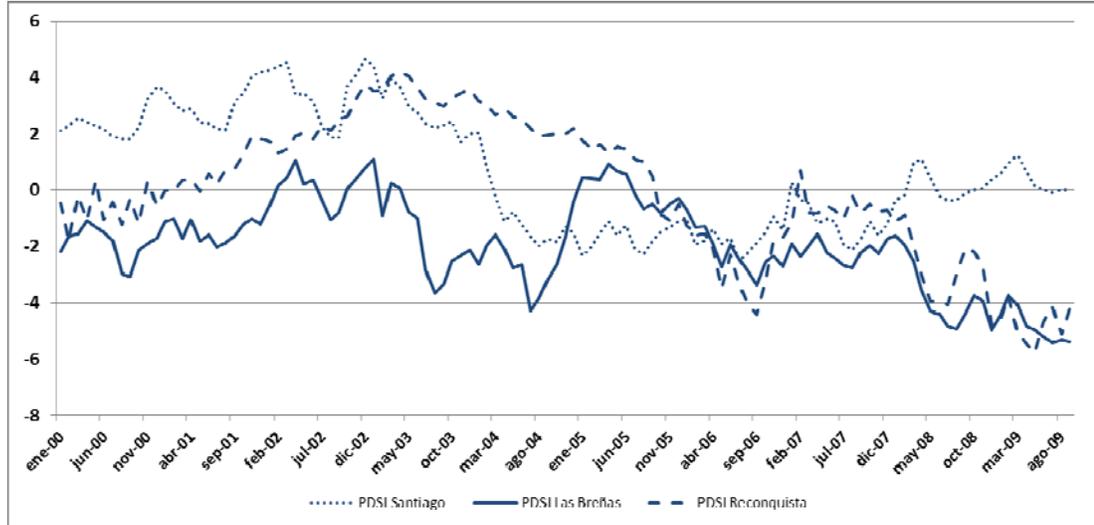


Figura 3.3. Valores de PDSI de la última década en estaciones del noreste argentino

El comportamiento del PDSI en las tres localidades si bien indica una tendencia en el incremento del déficit hídrico en la última década, sugiere, una variabilidad espacial significativa. Este es una cuestión a analizar debido a que los resultados del PDSI son puntuales y pueden no reflejar el comportamiento de toda la región. Tal como se propuso en los objetivos de esta tesis, se exploran acá, otras metodologías que permitan realizar un análisis regional más exhaustivo.

#### **4. INDICES DE VEGETACIÓN**

Existen muchas aplicaciones de los IVs en la literatura científica. La mayoría se basa en el índice de vegetación “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI) y del índice “Normalized Difference Water Index” (NDWI). En general se concluye que las

variaciones temporales de los mismos, son compatibles con las variaciones de humedad del ambiente, y por lo tanto, podrían utilizarse para analizar el comienzo y evolución de una sequía. El NDVI y NDWI, reflejan el contenido de clorofila el primero y la cantidad de agua en la estructura interna de la planta el segundo. Ambos, pueden ser determinados a partir de imágenes satelitales provenientes de sensores que capturen información en longitudes de onda correspondiente al rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) y medio (SWIR). La combinación de estas bandas da lugar a las ecuaciones (4.1) y (4.2).

$$\text{NDVI} = [\text{NIR} - \text{R}] / [\text{NIR} + \text{R}] \quad (4.1)$$

$$\text{NDWI} = [\text{NIR} - \text{SWIR}] / [\text{NIR} + \text{SWIR}] \quad (4.2)$$

Las primeras menciones del NDVI datan de la década de 1970`s a través de John Rouse y Compton Tucker (Schott, 2007, Gu et. al., 2007) entre otros. En la actualidad este índice sigue siendo uno de los más divulgados en numerosas aplicaciones (Piao, et. al., 2003, Wang, et. al., 2000, Song, et. al., 2008). El NDWI fue publicado por Gao en 1996 con la finalidad de encontrar un índice complementario al NDVI y con menor sensibilidad a los efectos atmosféricos que este último (Gao, 1996). Ambos índices varían de -1 a 1 según las diferentes características de la superficie. Por ejemplo, un suelo desnudo tendrá un NDVI entre 0 y 0,15 mientras que un bosque o cultivo desarrollado 0,8 a 0,7. El agua arrojará valores negativos del NDVI. Por lo contrario, el NDWI responderá con valores altos, próximos a 1 cuanto mayor es el contenido de agua (en la vegetación o en el suelo). El NDWI será negativo para aquellas plantas sin humedad en las hojas o para suelo secos. Los primeros trabajos donde aparece el NDWI (Gao, 1996) utiliza una banda ubicada en el rango en los 1240nm que representaría la banda 5 (1230nm-1250nm)) del sensor MODIS. Sin embargo, este rango estaría muy próxima al denominado infrarrojo cercano, por lo que

se decidió trabajar con otra banda, la 7 que está ubicada en el rango del infrarrojo medio, según lo propuesto por Gu et al. (2007). Por otra parte, la porción del infrarrojo medio comprendida en la banda 7 (2105nm-2155nm) es menos afectada por gases atmosféricos (Chandrasekar, K., et al., 2008).

En general, para el cálculo del NDVI y NDWI se utilizaran las bandas 1 (620nm – 679nm), 2 (841nm – 876nm) y 7 (2105nm - 2155nm) del sensor MODIS a bordo del satélite EOS Terra con las ecuaciones (4.3) y (4.4).

$$\text{NDVI} = [\Gamma(841-876) - \Gamma(620-679)] / [\Gamma(841-876) + \Gamma(620-679)] \quad (4.3)$$

$$\text{NDWI} = [\Gamma(841-876) - \Gamma(2105-2155)] / [\Gamma(841-876) + \Gamma(2105-2155)] \quad (4.4)$$

donde  $\Gamma(i - j)$  es la reflectancia de la banda comprendida entre las longitud de onda  $i$  y  $j$ , en nanómetros.

Las imágenes utilizadas para el cálculo de los índices fueron descargadas del sitio <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>. El proceso de selección de imágenes consistió en la inspección visual de las mismas para el período 2001-2009. Sólo se trabajará con aquellas con nubosidad inferior a 20% en la región.

El procesamiento de las imágenes consistió en georreferenciarlas con coordenadas geográficas latitud y longitud, recortándose el sector de la zona de estudio. Luego se procedió a enmascarar los píxeles que se identificaron como nubes. Para esto, se utilizó las imágenes de temperatura de las bandas 31 (10780nm - 11280nm) y 32 (11770nm -

12270nm), enmascarando en caso de ser necesario aquellos píxeles con temperatura inferior a 275° K. Finalmente, se aplicaron las ecuaciones (4.3) y (4.4), generándose así, una serie de imágenes NDVI y NDWI que permitieron realizar el análisis temporal y espacial de estos IV(s) en la identificación y monitoreo de sequías.

El estudio de la variabilidad temporal comprendió el análisis por meses y por año de las imágenes NDVI y NDWI.

Se investigó la variabilidad de los índices de vegetación por periodos específicos en el año, teniendo en cuenta las características climáticas de la zona, especialmente la estacionalidad de la precipitación y temperatura como se describe en área de estudio. Esto permitió disminuir las incertidumbres asociadas a los ciclos fenológicos de los distintos tipos de cobertura vegetal. Para ello se consideraron cuatro periodos. Uno de ellos enero, de manera de evaluar la zona en plena estación húmeda, coincidente con uno de los meses de mayores temperaturas. Otro período considerado fue abril, que representa el último mes de la estación húmeda, y por lo tanto, estaríamos evaluando la zona de estudio con la mayor humedad antecedente del año. El tercer período del año fue julio. En este mes, la zona de estudio se encuentra en plena estación seca, coincidente con uno de los meses de menor temperatura. Finalmente, se analizó octubre. Si bien en octubre la precipitación antecedente es escasa, las temperaturas son adecuadas para el desarrollo de la vegetación.

A modo de ejemplo en la Tabla 4.1 se presenta la serie de enero. Para los otros meses seleccionados hay aproximadamente igual número de escenas (Tabla 2.4).

Gregoriano	Juliano
12-Jan-2001	2001.012
8-Jan-2002	2002.008
13-Jan-2003	2003.013
1-Jan-2004	2004.001
5-Jan-2005	2005.005
8-Jan-2006	2006.008
1-Jan-2007	2007.001
7-Jan-2008	2008.007
5-Jan-2009	2009.005

Tabla 4.1. Escenas disponibles de la serie enero

La variabilidad de cobertura vegetal asociada a distintos tipos de suelo, hace suponer la existencia de variaciones espaciales importantes en los valores de los índices de vegetación. Por esta razón, se analizaron resultados de áreas con igual tipo y uso de suelo, es decir, homogéneas, comprendidas dentro del área de estudio. En este punto, se utilizaron, por un lado las cartas de suelo del INTA descritas en el punto 2. El uso de suelo de las áreas específicas se mantiene invariante en todo el período de estudio 2001 – 2009. Esto se corroboró mediante un análisis visual de distintas escenas de imágenes Landsat 5 y 7 a lo largo del período. Cada área específica consiste aproximadamente de 35 píxeles. La Figura 4.1 muestra la ubicación de estas áreas específicas, mientras que la Tabla 4.2, las características de las mismas. Estas áreas específicas se seleccionaron en zonas con información en escala 1:50000.

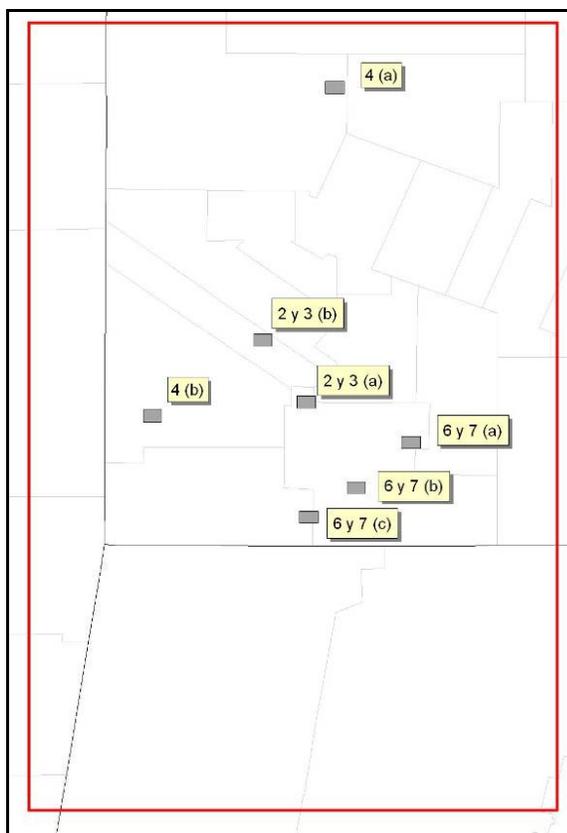


Figura 4.1. Ubicación de áreas homogéneas de tipo y uso de suelos a analizar

Nombre	Cobertura	Capacidad de Uso	Riesgo Agrícola	Riesgo Ganadero
2 y 3 (a)	Cultivo	II, III	Leve a Moderado	Leve a Moderado
2 y 3 (b)	Cultivo	II, III	Leve a Moderado	Leve a Moderado
4 (a)	Cultivo	IV	Severo	Leve a Moderado
4 (b)	Monte	IV	S/D	S/D
6 y 7 (a)	Pastizal	VI, VII	Prohibido	Severo
6 y 7 (b)	Pastizal	VI, VII	Prohibido	Leve a Moderado
6 y 7 (c)	Pastizal	VI, VII	Prohibido	Leve a Moderado

Tabla 4.2. Descripción de áreas específicas. Capacidad de uso de suelo según INTA, tipo de cobertura vegetal y riesgos agrícolas y ganaderos asociados

En un área extensa como la nuestra, un valor medio regional de toda la zona, no necesariamente refleja el comportamiento real de la misma. La evaluación de áreas homogéneas con tipo y uso de suelos distintos, constituye un complemento importante al análisis temporal de valores medios regionales. Sin embargo, se consideró apropiado, analizar los cambios en los histogramas de frecuencia de los índices así como también su uso como una herramienta más para el monitoreo de sequías. El procedimiento consiste en obtener de cada imagen de índice de vegetación calculado, el histograma de frecuencia. Para cada período analizado – enero, abril, julio y octubre – en un gráfico x – y, con valores del índice de vegetación en abscisas (-1 a +1) y número/cantidad de píxeles en ordenadas, se grafican todos los histogramas del período y se realiza el análisis temporal.

## **5. RESULTADOS**

### 5.1 Valores Medios Regionales

La Figura (5.1) muestra los valores medios regionales para el NDVI (Figura 5.1a) y para el NDWI (Figura 5.1b) para las escenas de la tabla (2.4). En estos gráficos se aprecia la influencia que la estacionalidad que la precipitación y temperatura poseen sobre los índices. Los IV(s) exhiben una clara tendencia a disminuir a lo largo del período de estudio, con una recuperación parcial en los meses húmedos y una caída más abrupta en los meses secos.

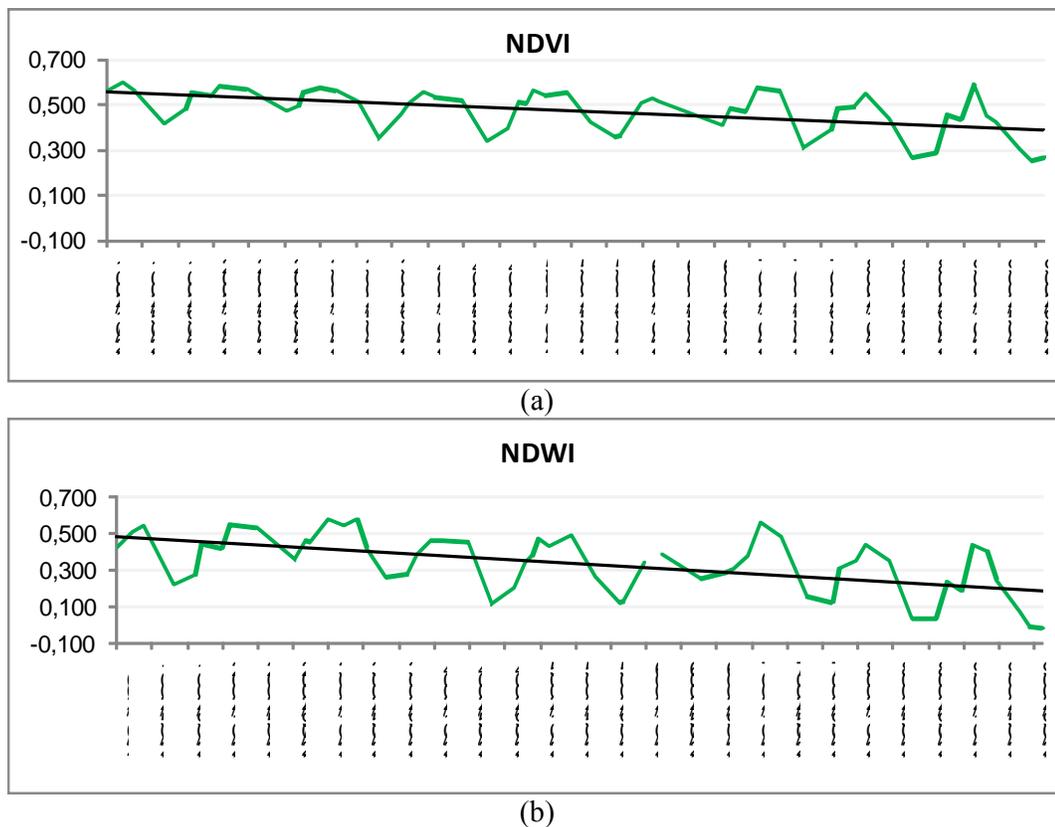


Figura 5.1. Valores medios regionales en el período analizado: (a) NDVI; (b) NDWI

En el período analizado, para el NDVI se aprecian valores superiores a 0,5 entre 2001 y 2003. A partir de 2004, se evidencia una paulatina caída de los valores medios durante la estación seca, llegando a valores medios de aproximadamente 0,3 en 2009. El NDWI muestra un comportamiento similar al NDVI, pero con mayor contraste entre los valores de principio y final del período analizado, con valores entorno a los 0,5 para comienzos del período y valores negativos en 2009.

Los análisis temporales del NDVI y/o NDWI son útiles como indicativos generales de la evolución de los mismos en un determinado período de estudio. Sin embargo, variaciones en los valores de los IV(s) entre dos escenas cualquiera puede ser consecuencia de la propia estacionalidad de variables ambientales, y no necesariamente

debido a una sequía. Por esa razón, el estudio temporal en períodos específicos del año, permite eliminar o al menos atenuar esta cuestión.

La Figura (5.2) muestra la serie temporal correspondiente a principios de enero. En esta época de año, plena estación húmeda y uno de los meses de máxima temperatura, se aprecia muy poca variación de valores del NDVI en todo el período de estudio, oscilando entre 0,6 y 0,4. El NDWI en cambio con valores de 0,6 en 2003, va disminuyendo ligeramente hasta el 2009 donde cae abruptamente a valores de 0,2.

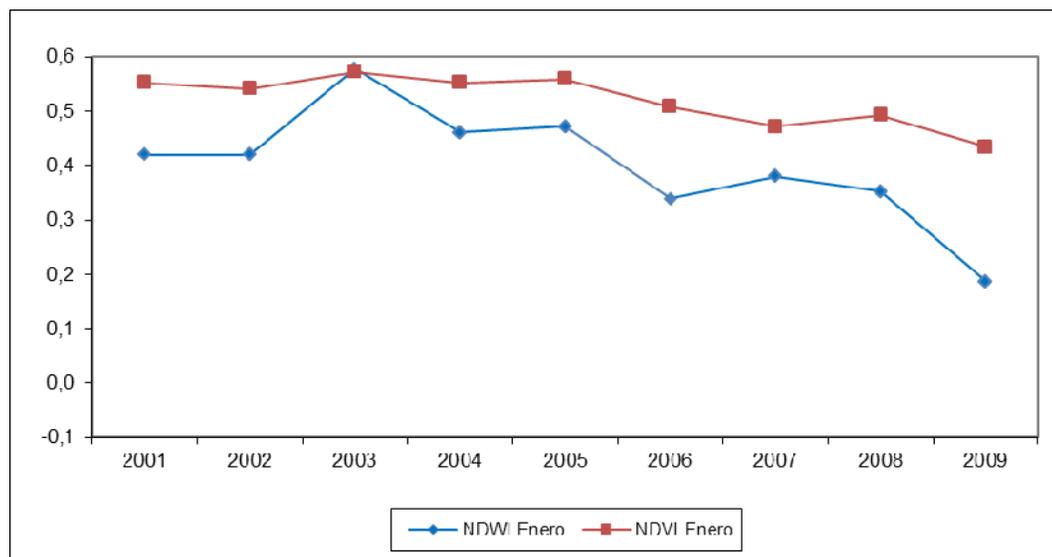


Figura 5.2 – Valores medios regionales de NDVI y NDWI para enero.

En la figura (5.3) se observa la serie de valores medios regionales de NDVI y NDWI de fines de abril o comienzos de mayo.

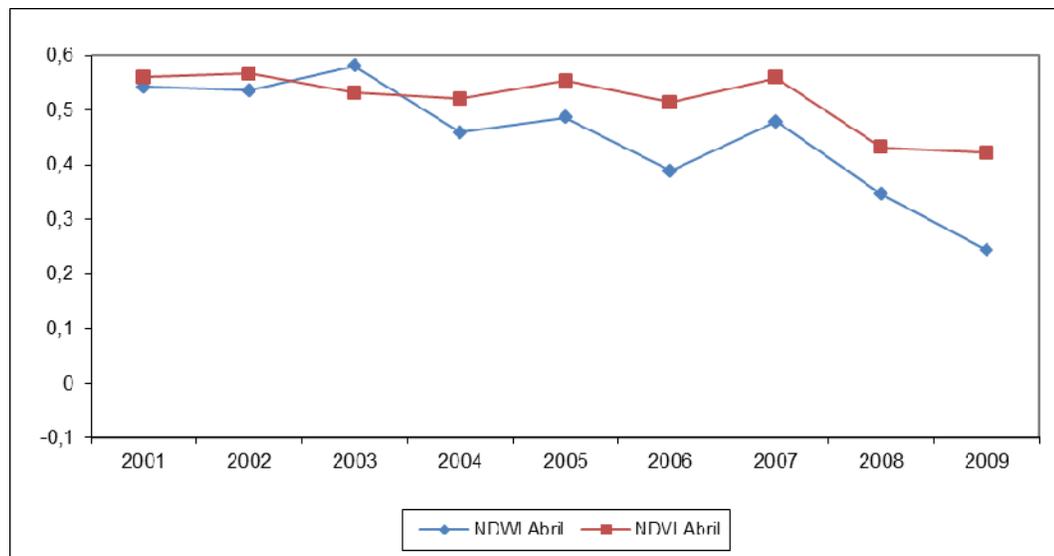


Figura 5.3 – Valores medios regionales de NDVI y NDWI para abril.

En abril NDVI y NDWI prácticamente no varían hasta el 2007 con valores entorno a los 0,5. Sin embargo, a partir del año 2008, se observa una pronunciada caída de los valores medios regionales, especialmente del NDWI, llegando a valores cercanos a 0,4 el NDVI y 0,2 el NDWI.

Abril es el último mes de la estación húmeda en la zona de estudio, lo que teóricamente permite, analizar el comportamiento de los IV(s) con el mayor contenido de humedad anual. También se debe considerar que las temperaturas del aire en abril, aún son adecuadas para el desarrollo de la vegetación. Por ello, es esperable en líneas generales, que los IV(s) posean valores más altos en el mes de abril que a comienzos de enero.

La Figura (5.4) muestra la serie temporal correspondiente a mediados de julio, período en plena estación seca y uno de los meses de menor temperatura. En esta estación no hay disponible escenas aceptables para este estudio durante el año 2002.

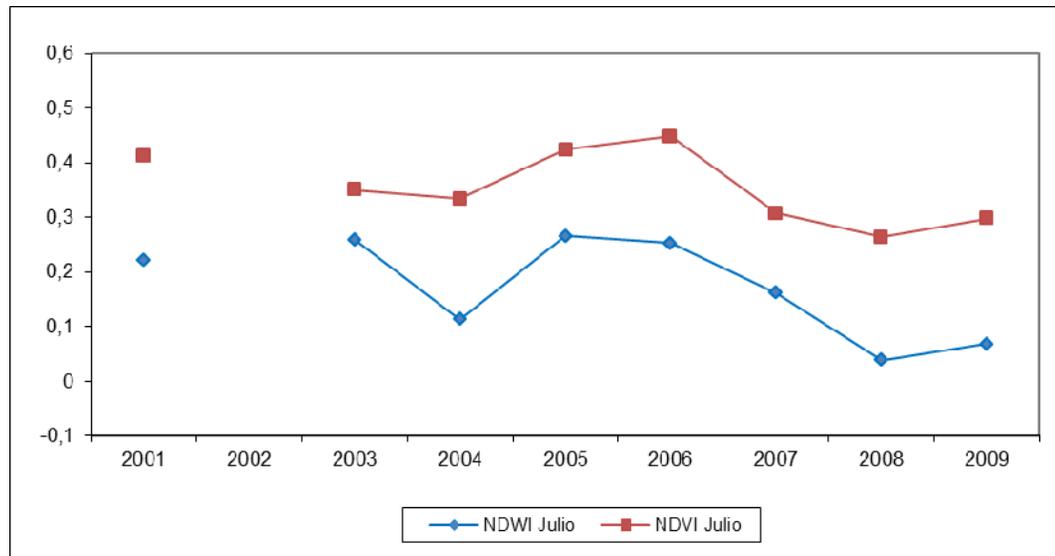


Figura 5.4 – Valores medios regionales de NDVI y NDWI para julio.

El NDWI no supera los 0,3 en todo el período analizado, mientras que el NDVI no baja de 0,3. En este período, se da una disminución importante en los valores medios regionales en 2004, especialmente del NDWI con valores de 0,11. Los IV(s) reflejan una recuperación del sistema durante los años 2005 y 2006 con valores próximos al año 2001. A partir del 2007, los valores medios regionales caen considerablemente, llegando a 0,3 el NDVI y 0,1 el NDWI.

Las series de NDVI y NDWI correspondiente al mes de octubre - Figura (5.5) - muestran una clara tendencia a disminuir desde el 2001 al 2009. El NDVI pasa de un valor de 0,5 a 0,2 y el NDWI varía de 0,5 a -0,1. Se debe tener en cuenta que normalmente octubre no es un mes en el que se observen precipitaciones importantes, sin embargo la temperaturas suele ser adecuada para que la vegetación comience a desarrollarse. La disminución pronunciada de los valores medios de NDVI y NDWI podría estar asociada a una disminución de la humedad disponible para la vegetación.

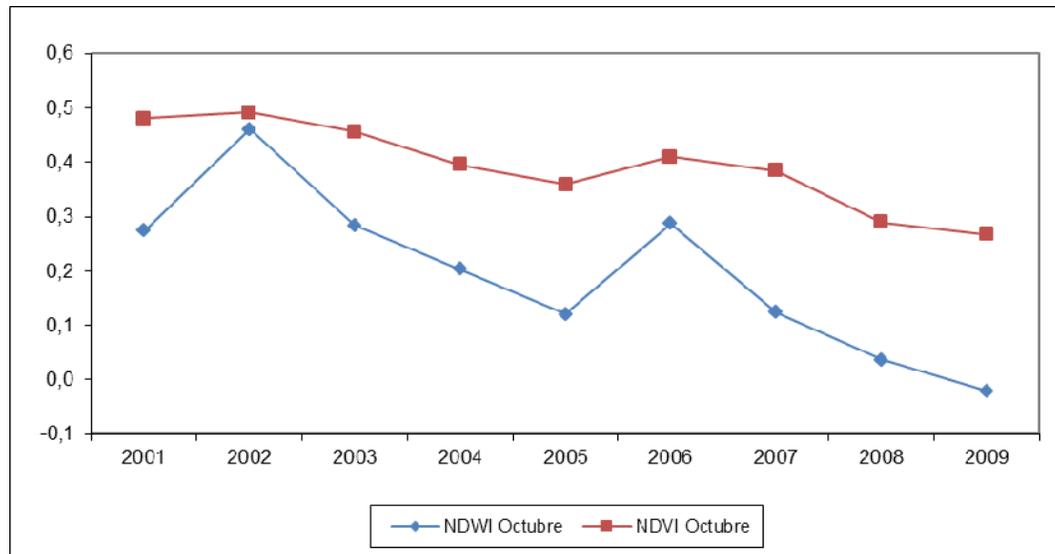


Figura 5.5 – Valores medios regionales de NDVI y NDWI para octubre.

En los meses de octubre y julio, y en menor medida en enero y abril, los resultados indican un aumento importante en los valores de los índices durante el año 2006, fundamentalmente del NDWI. Este comportamiento es coherente con el presentado por el PDSI como se aprecia en la Figura (3.3).

## 5.2 Análisis de los valores medios en áreas con igual tipo y cobertura de suelos.

Sin duda, valores bajos o negativos en los IV(s) son producto de un déficit hídrico en el suelo – especialmente en valores de NDWI – pero debemos remarcar que una zona con déficit hídrico, no necesariamente está en sequía.

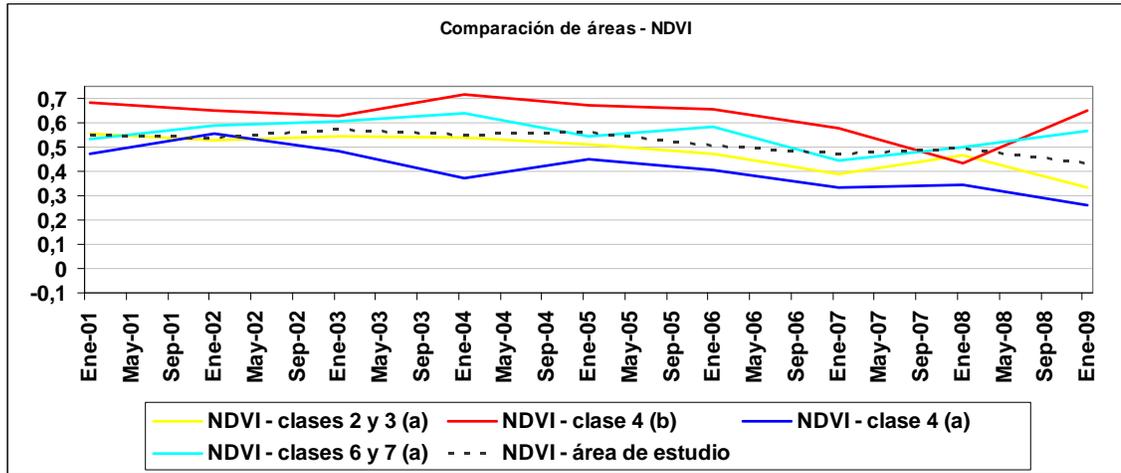
Al estudiar un área extensa, es probable que se comprendan cobertura vegetal y tipos de suelos heterogéneos como pasa en el área de estudio, según se describió en el punto 2. Esto puede condicionar la interpretación de la distribución espacial de los IV(s), dado que variaciones importantes de los mismos en una escena, no necesariamente es

debido a una sequía sectorizada, sino a una diferencia natural del tipo de suelo y/o cobertura vegetal. Por ello, si bien, el interés principal de esta tesis es el estudio de sequías a escala regional, es necesario analizar las posibles variaciones entre los distintos grupos de cobertura y/o tipo de suelo.

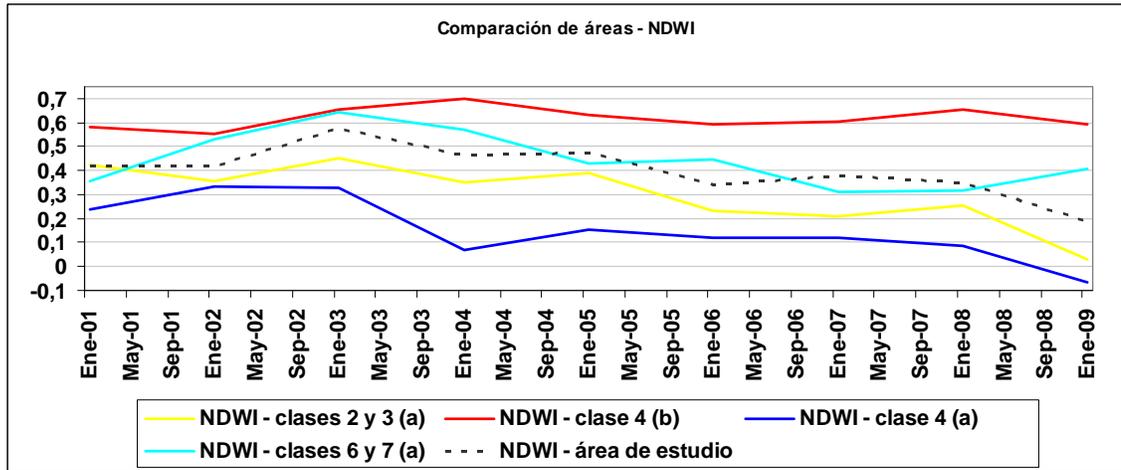
Se analizó el comportamiento de todas las áreas específicas propuestas en la metodología (Tabla (4.2) y Figura (4.1)). Para los grupos correspondientes a cultivo sobre suelos tipo II y III (2 y 3 (a); 2 y 3 (b)) y las áreas correspondientes a pastizal sobre suelos tipo VI y VII (6 y 7 (a); 6 y 7 (b); 6 y 7 (c)) los resultados de NDVI y NDWI han sido muy similares. Es por eso que en este trabajo se detallaran los resultados obtenidos para las áreas 2 y 3 (a) y 6 y 7 (a) como representativa de los dos grupos.

La Figura 5.6 muestra la serie temporal de los valores medios de los IV(s) en las áreas específicas correspondiente al mes de enero. En general, existe una tendencia decreciente de los valores de los IV(s) para todas las clases, pero muy ligera en este período. Es notoria la diferencia de valores de NDVI y NDWI entre un área de vegetación nativa como el monte y un área cultivada en suelos con restricciones (áreas identificadas como 4(b) y 4(a) respectivamente. Se resaltan los resultados de NDWI para el monte (4(b)) que prácticamente presenta valores uniformes entorno a los 0,6. En contraste, el cultivo en un suelo clase IV (4(a)) al comienzo del período presenta valores de NDWI superiores a 0,3 que caen a valores negativos en 2009. La vegetación nativa tipo pastizal sobre suelos clase VI y VII (6 y 7(a)) y las zonas cultivadas en suelos clase II y III (2 y 3 (a)) presentan un comportamiento intermedio, y los valores medios de toda el área de estudio se encuentran en el orden de estas dos últimas. El pastizal nativo (6 y 7(a)) presenta resultados bastante uniformes, con valores entre 0,5 y 0,6 para ambos índices al comienzo

del período, y valores de 0,4 en el año 2009 para el NDWI. En las zonas cultivadas en suelos clase II y III (2 y 3 (a)), el NDVI refleja muy poca variación con valores cercanos a los 0,5. En cambio, el NDWI disminuye de 0,4 a valores cercanos a cero en 2009.



(a)

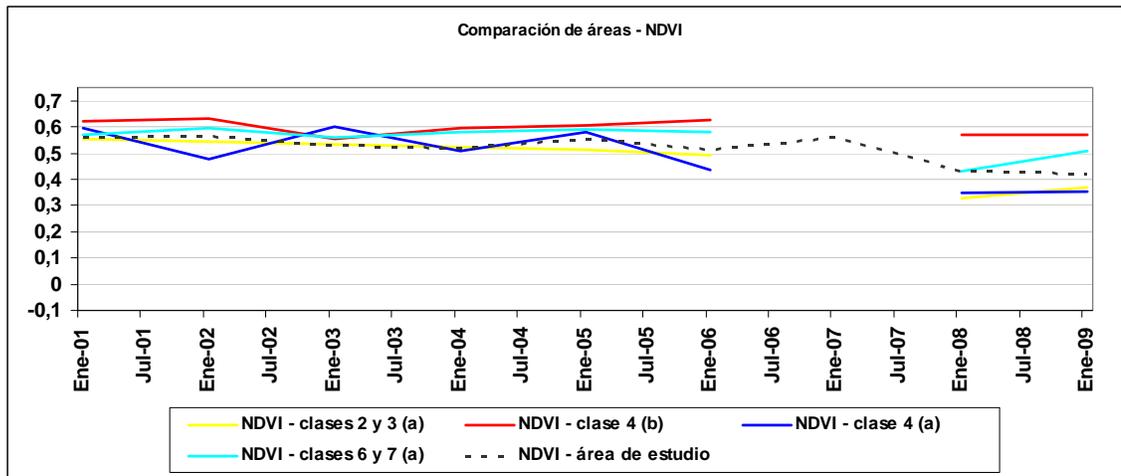


(b)

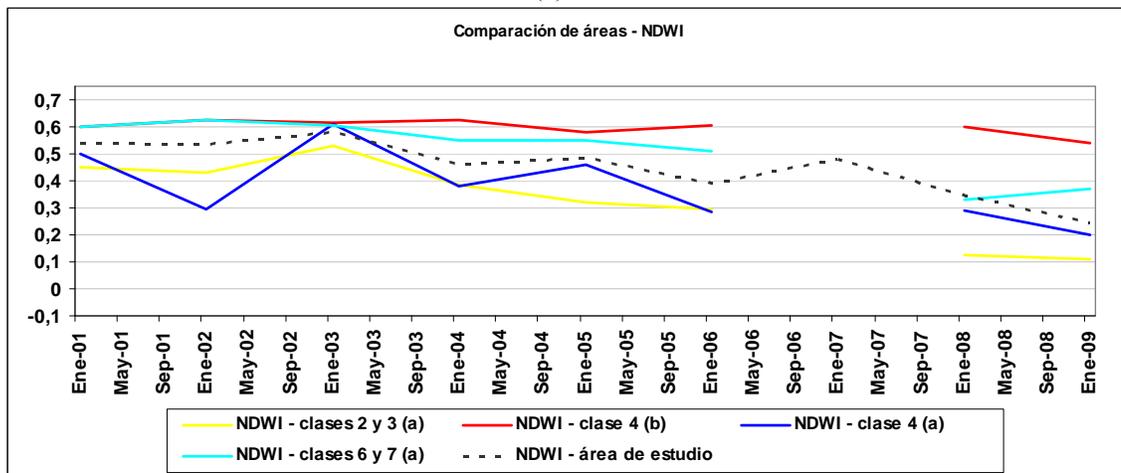
Figura 5.6. Valores medios de áreas específicas del mes de enero para (a) NDVI; (b) NDWI

En el mes de abril – Figura 5.7 – las distintas áreas específicas no presentan valores de IV(s) muy diferentes entre sí hasta el año 2006, donde el monte nativo (4(b)) y en menor medida los pastizales nativos (6 y 7 (a)) mantienen sus valores medios, mientras que las áreas de cultivo empiezan a decaer. El monte nativo posee valores cercanos a 0,6

para ambos IV(s). Las áreas de cultivo en suelos con restricciones severas (4(a)) y áreas de cultivos con restricciones leves (2 y 3 (a)) poseen para ambos índices valores cercanos a 0,6 a principios del período, con valores cercanos a 0,4 de NDVI y 0,3 de NDWI al final del mismo. El NDVI en el pastizal nativo prácticamente no varía en el orden de 0,6, mientras que el NDWI alcanza valores de 0,6 en 2003 disminuyendo a 0,4 en 2009.



(a)

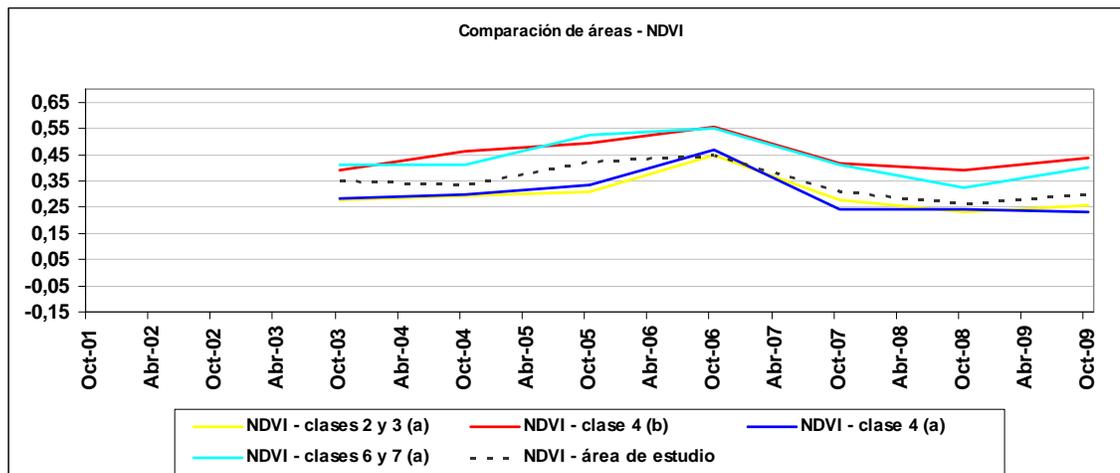


(b)

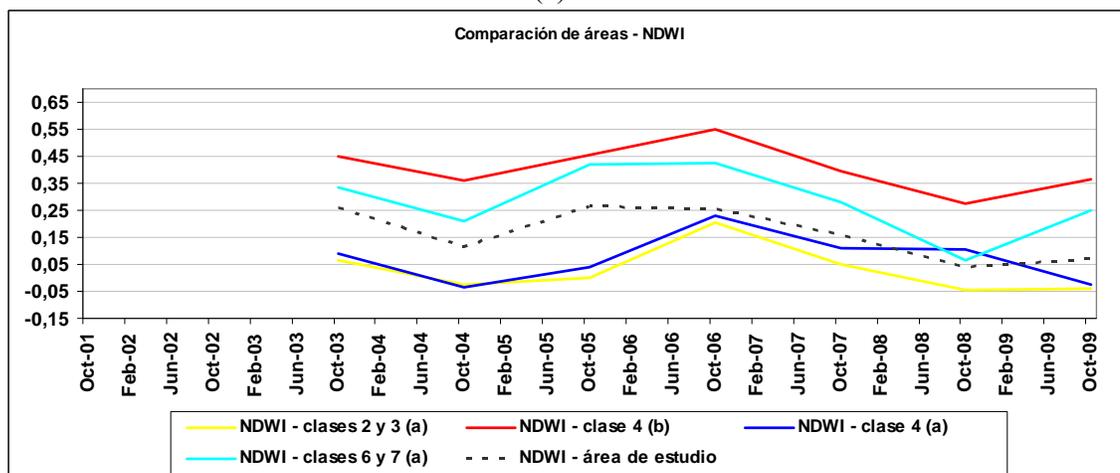
Figura 5.7. Valores medios de áreas específicas del mes de abril para (a) NDVI; (b) NDWI

La Figura 5.8, muestra las series correspondiente a julio. En este mes, las variaciones temporales son significativas, especialmente en el NDWI. Se aprecia un

comportamiento similar en los valores de los IV(s) en la vegetación nativa – monte y pastizal – con un importante contraste respecto a las áreas de cultivo – en suelos con restricción severa y leve -. Las áreas de cultivos – 2 y 3 (a) y 4(b) – poseen valores de NDWI del orden de 0,5 a principios del período, decayendo a valores cercanos a 0,1 en 2009. El NDVI se encuentra cercano a 0,6 entre el 2001 y a partir del 2005 empieza a disminuir hasta valores cercanos a 0,3. El área de monte nativo (4(a)) posee, en todo el período, valores próximos a 0,6 para ambos índices. Hasta el año 2006, el pastizal nativo – área 6 y 7(a) – posee valores del orden de 0,6 para ambos índices, cayendo a valores de 0,5 de NDVI y 0,4 de NDWI.



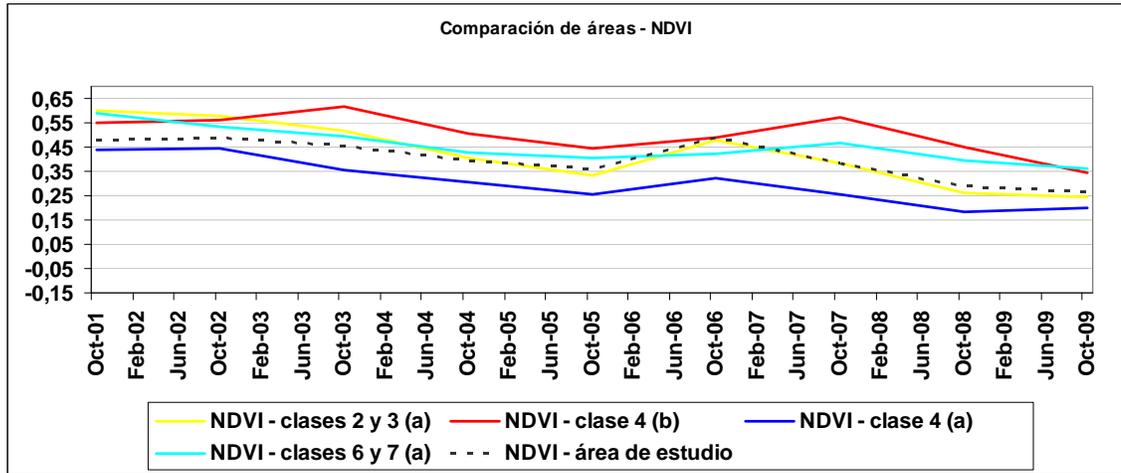
(a)



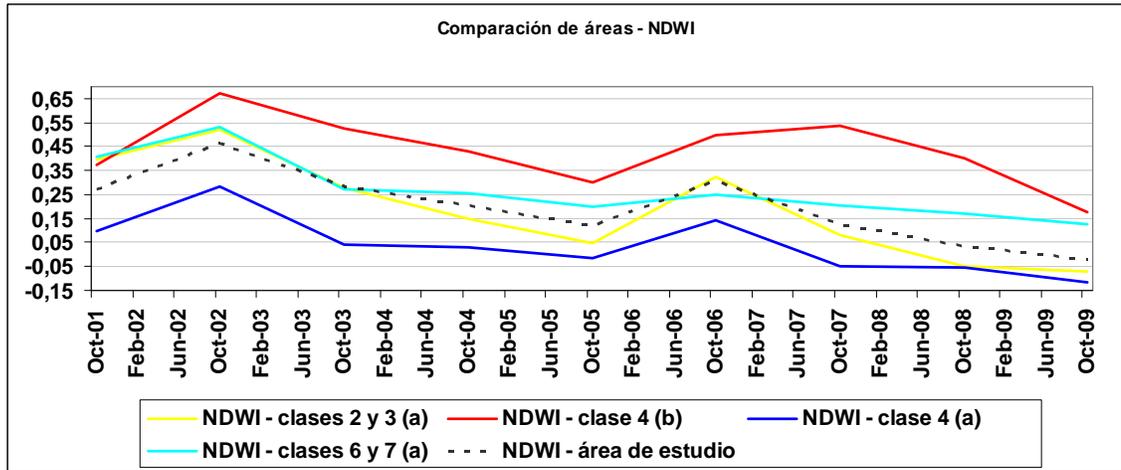
(b)

Figura 5.8. Valores medios de áreas específicas del mes de julio para (a) NDVI; (b) NDWI

El mes de octubre muestra variaciones significativas en las series de NDVI y NDWI (Figuras (5.9a) y (5.9b) respectivamente) en el período 2001-2009.



(a)



(b)

Figura 5.9. Valores medios de áreas específicas del mes de octubre para (a) NDVI; (b) NDWI

En octubre, el área de monte (4(b)) presenta al comienzo del período valores de 0,6 de NDVI y 0,7 de NDWI, mientras que al final del mismo decaen a 0,3 para el NDVI y 0,2 de NDWI. El área de cultivo sobre suelo tipo IV (4(b)) posee valores de 0,5 de NDVI y 0,3 de NDWI en el año 2002, mientras que en el año 2009 se reducen a 0,2 de NDVI y -0,11

de NDWI. En las áreas de cultivo sobre suelo tipo II y III (2 y 3 (a)) el NDVI posee entre el 2001 y 2003 valores de 0,6 disminuyendo a 0,25 en 2009, mientras que el NDWI posee valores de 0,5 en 2002 llegando a valores negativos en 2009. En los pastizales en suelo VI y VII (6 y 7 (a)), ambos índices poseen valores próximos a 0,6 a comienzos del período, disminuyendo a valores de 0,4 de NDVI y 0,3 de NDWI en 2009.

### 5.3 Análisis de los Histogramas de frecuencia

En áreas extensas, los valores medios regionales enmascaran la heterogeneidad de la región. Sin bien son muy prácticos y expeditivos, no son suficientes para un análisis detallado de un área heterogénea en términos climáticos y de cobertura vegetal. Es por esto que se realizó un análisis de los histogramas de frecuencia para cada imagen de la zona en estudio. Los resultados de los histogramas permitieron por un lado, corroborar lo observado con los valores medios, y por otro lado, permitieron apreciar la homogeneidad y/o heterogeneidad de los IVs en la región.

En la Figura (5.10) se observan los histogramas correspondientes a Enero del NDVI (5.10a) y NDWI (5.10b). Se destaca lo descripto para los valores medios, es decir, en este mes del año no se observa un desplazamiento sensible de los histogramas hacia cero o valores negativos en el período 2001-2008. El histograma correspondiente a enero del 2009 se desplaza, hacia los valores negativos indicando un cambio importante respecto a los otros años. Histogramas empuntados, como los del 2003 indican una mayor homogeneidad en los IV(s) con valores próximos al medio. Un “amesetamiento” en los histogramas como en 2009, implica una mayor heterogeneidad en los valores de los índices. Para este mes se destaca el histograma del NDWI del año 2004, año en que

empieza a manifestarse la sequía en la región, donde una parte del área de estudio evidencia valores altos de NDWI similares a los del año 2003 en el entorno de 0,7, mientras que la otra zona posee valores cercanos a 0,4 o inferiores.

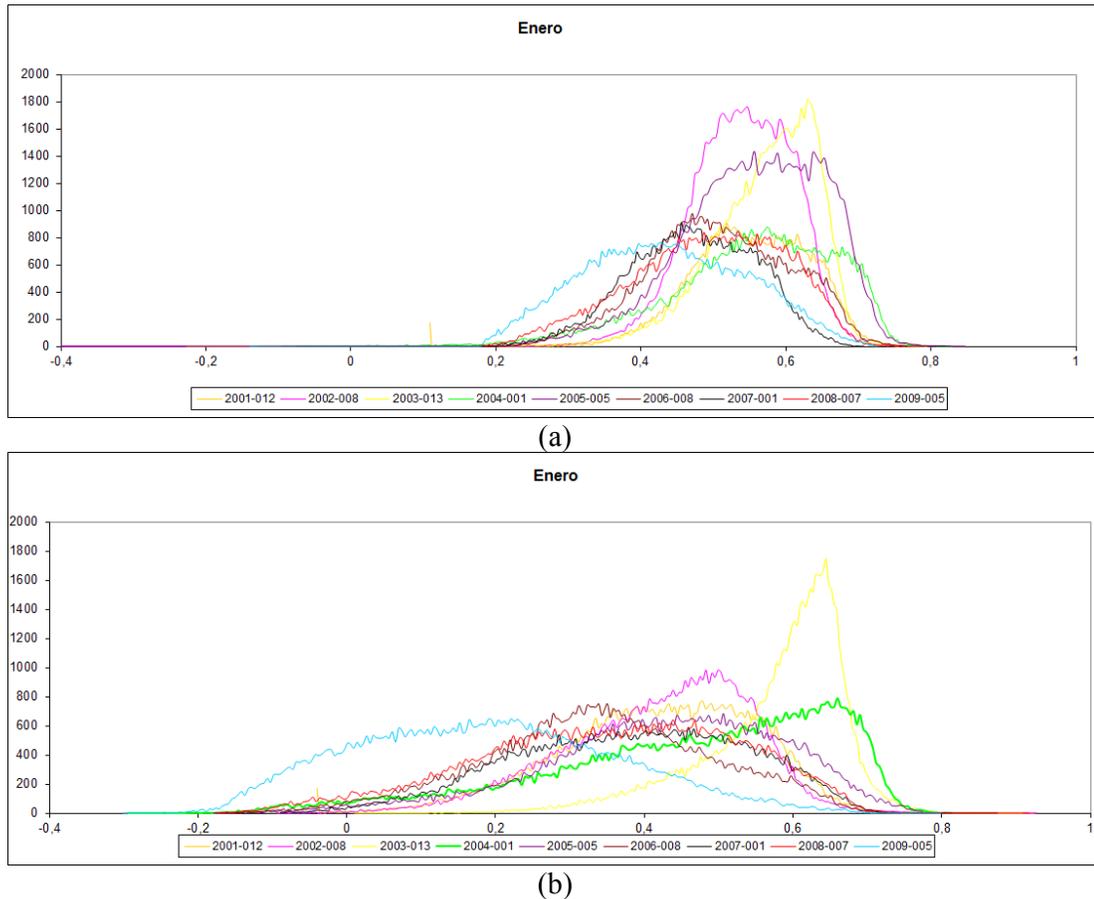


Figura 5.10. Histogramas del mes de enero correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI

En el mes de abril, los histogramas reflejan una mayor homogeneidad en los valores de los índices que en enero, como lo indican las Figuras (5.11a) para el NDVI y (5.11b) para el NDWI. En este mes, la mayor humedad antecedente, generaría una mayor uniformidad en los valores de lo IV(s) con respecto a enero. Sin embargo, en años secos como 2008 y 2009, la heterogeneidad en los valores de los IV(s) es muy marcada. Esto se

refleja si analizamos el histograma del NDWI del año 2004, observándose que ya no es extendido como en enero.

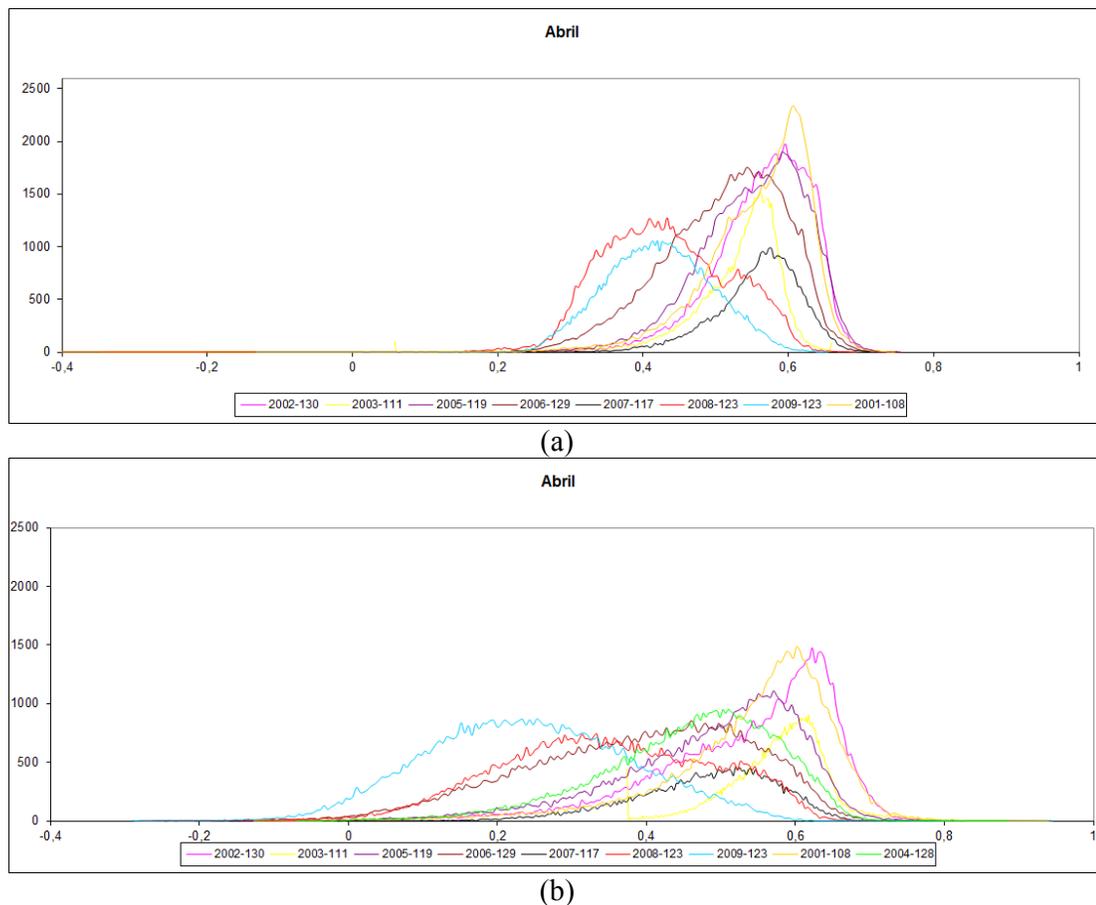


Figura 5.11. Histogramas del mes de abril correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI

El análisis de los histogramas del mes de abril, indican que en este mes, a partir del año 2008, se produce un corrimiento apreciable de los histogramas hacia el cero. Sin embargo, el histograma del 2008, refleja dos áreas bien definidas, una con valores similar a los años anteriores entorno a los 0,5, mientras que la otra posee valores entorno a los 0,3 para el NDWI y 0,4 para el NDVI.

La Figura (5.12) muestra los histogramas correspondiente a julio, para NDVI (5.12(a)), y NDWI (5.12(b)). En este mes, se observa claramente un desplazamiento hacia el cero o valores negativos a medida que se profundiza el déficit hídrico. Las bajas

temperaturas en este período, generan la menor actividad en la vegetación, reflejando valores bajos en los IVs, como se vio en los valores medios regionales. En este período podemos destacar una recuperación importante en los años 2005 y 2006, respecto al año 2004.

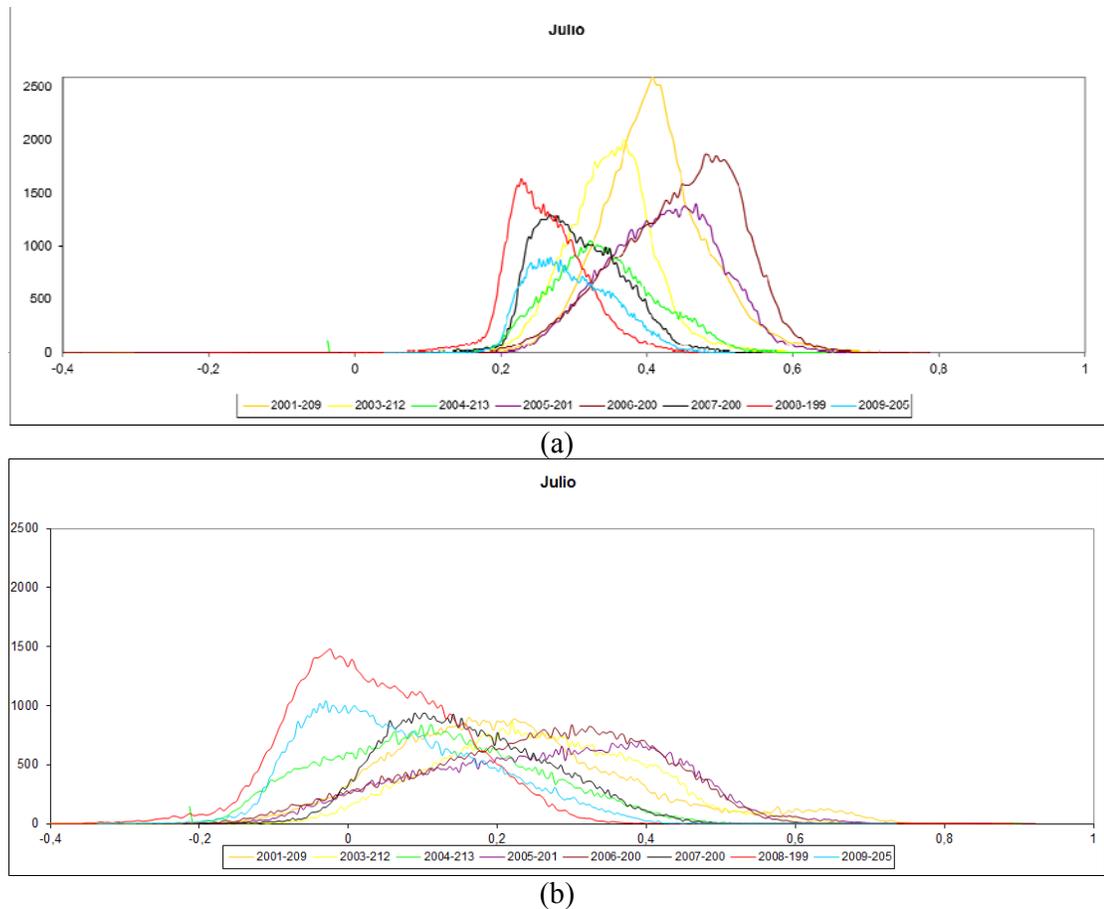


Figura 5.12. Histogramas del mes de julio correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI

Durante el mes de octubre, los histogramas se van desplazando paulatinamente hacia el cero del 2003 en adelante como se muestra en la Figura (5.13a) para el NDVI y (5.13b) para el NDWI. A diferencia de los meses de enero y abril, los histogramas muestran una mayor heterogeneidad en los años húmedos que en el resto del período. Se destacan los histogramas del año 2006. En el mes de junio de ese año, un sector del noreste

de la zona de estudio, tuvo precipitaciones intensas, muy por encima de lo normal para dicho mes, dando lugar a histogramas de doble pico como se puede apreciar en la Figura 5.13. En este período, se aprecia claramente el desplazamiento hacia valores decrecientes del histograma del año 2003 con respecto al 2002. Esto corrobora al año hidrológico 2002/2003, como fin del período húmedo en la zona de estudio, como se estableció en los resultados del PDSI.

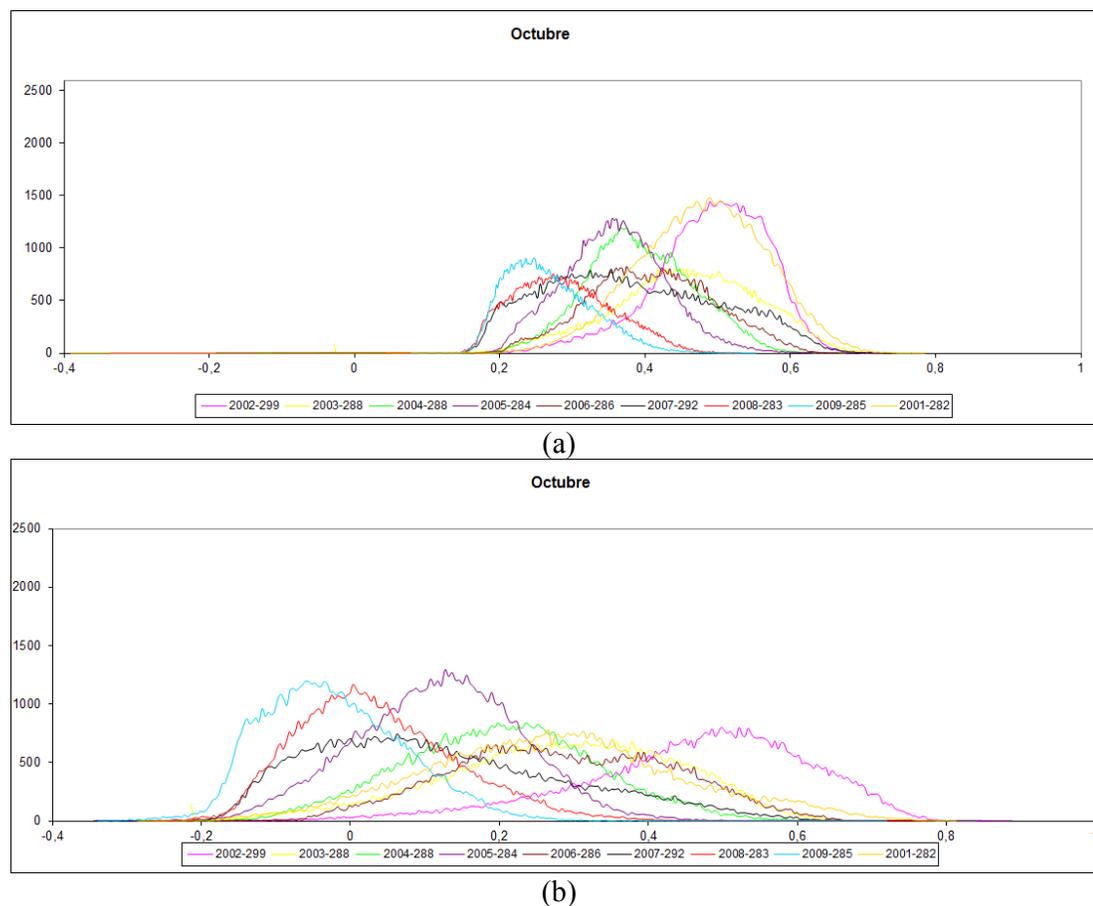


Figura 5.13. Histogramas del mes de octubre correspondiente a (a) NDVI, (b) NDWI

En general, los histogramas del NDWI muestran un corrimiento hacia valores negativos cuando la humedad en la región comienza a disminuir, mientras que el NDVI no acusa tan claramente un cambio en la vegetación. De hecho, el NDWI responde casi

exclusivamente a cambios en el contenido de humedad en el pixel mientras que el NDVI responde a cambios en la cantidad de clorofila.

#### 5.4 Análisis de la distribución espacial de los Índices de Vegetación

Se presenta la distribución espacial del NDVI y NDWI de las escenas utilizadas correspondientes a la Tabla (2.4).

En líneas generales, la distribución regional de los IV(s), responde a la distribución de los usos y tipos de suelos, descritos en el capítulo 2. Se observa en todas las escenas que el norte, con cobertura de monte nativo, presenta los valores más altos de IV(s), mientras que en la zona agrícola del oeste, con suelos más pobres destacan valores bajos.

En el mes de enero, la zona presenta valores altos de NDVI hasta el año 2005 (Figura 5.14). A Partir del 2006, el NDVI disminuye en el oeste, permaneciendo el este y norte, con valores altos. El NDWI (Figura 5.15), en el oeste, ya presenta valores bajos en los años húmedos 2001 a 2003. A medida que avanza el período, los valores de NDWI se reducen hacia el este, observándose en el 2009, sólo algunos sectores del norte con valores altos.

El NDVI correspondiente a abril (Figura 5.16), presenta valores altos en toda la zona hasta el año 2007. En este mes se aprecia que a partir del 2008, se produce una ligera reducción de los valores de NDVI en el oeste y sur este. Para el NDWI (Figura 5.17), se observa en abril, que las áreas con valores bajos se incrementan levente hasta el 2008. En este mes, las áreas con valores bajos de NDWI (Figura 5.17) se incrementan levente hasta

el 2008, fundamentalmente en el oeste. En el 2009 se observa que salvo el norte, casi la totalidad de la zona presenta valores bajos.

En julio, el NDVI (Figura 5.18) presenta valores altos en toda la zona hasta el 2003. Se destaca un importante descenso de los valores en el 2004, con un importante aumento hasta el año 2006. A partir del año 2007, el oeste presenta una disminución paulatina del NDVI. El NDWI (Figura 5.19), posee valores bajos en gran porcentaje de la zona en todas las escenas analizadas de julio. Dado que julio se encuentra dentro de la estación seca, es esperable valores bajos de NDWI en gran parte de la zona, incluso, en años húmedos. Esto genera que en este mes, la distribución regional del NDVI refleje mejor la variación de los valores medios regionales de la Figura 5.4

En octubre, el NDVI (Figura 5.20) posee valores altos en toda la zona hasta el 2002. A partir del año 2003, el oeste ya experimenta sectores con valores bajos, que se van incrementando progresivamente hacia el este a medida que avanza el período. En 2009 todo el centro y oeste de la zona, posee valores bajos de NDVI. El comportamiento del NDWI (Figura 5.21) es similar. El oeste ya presenta valores bajos en 2001 y también en el resto de los años. En los años 2008 y 2009, toda la zona acusa valores bajos de NDWI. Se observa además que en el año 2006, el noreste destaca una recuperación en los valores de los IV(s).

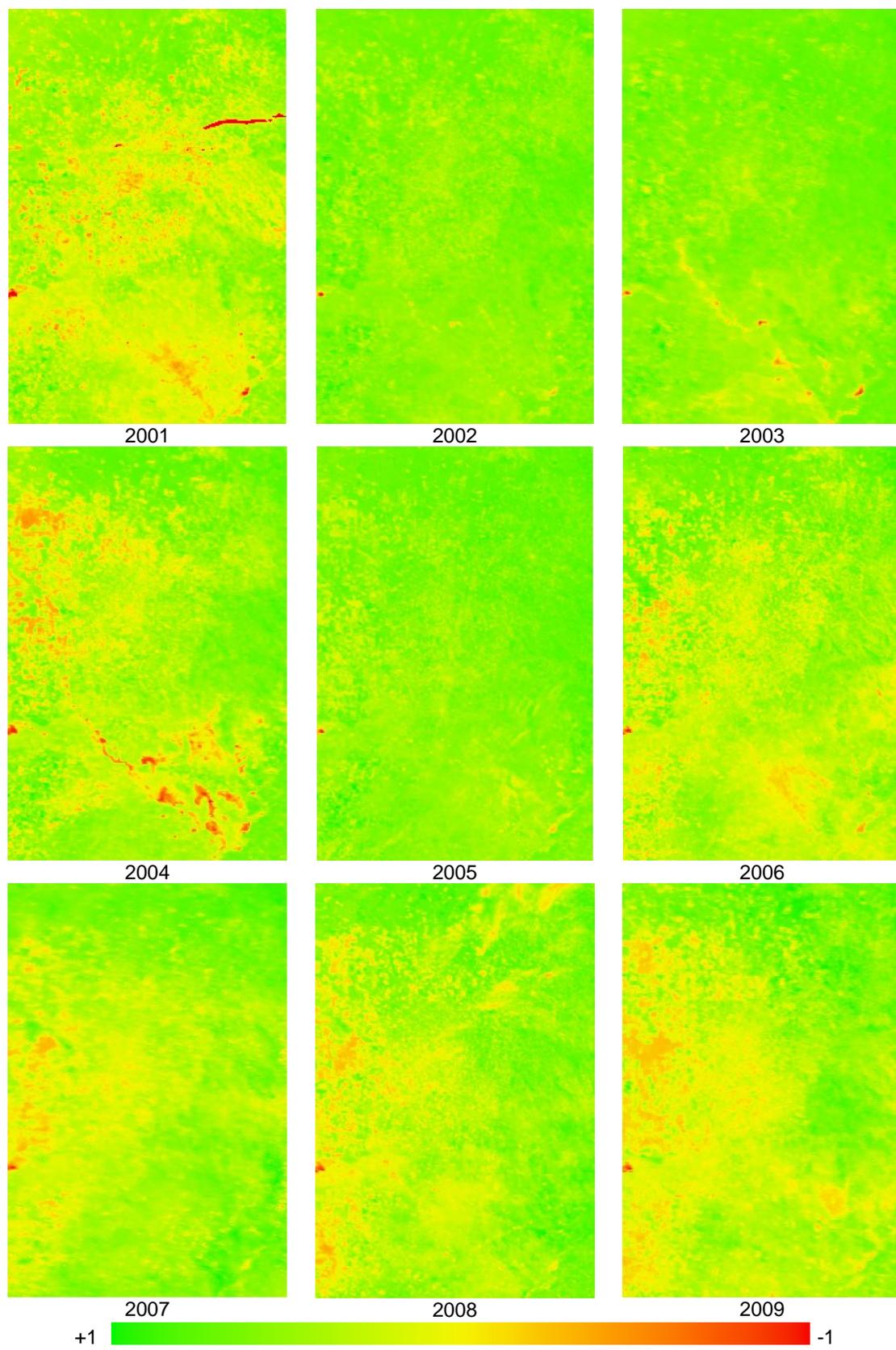


Figura 5.14. Secuencia del NDVI para el mes de enero

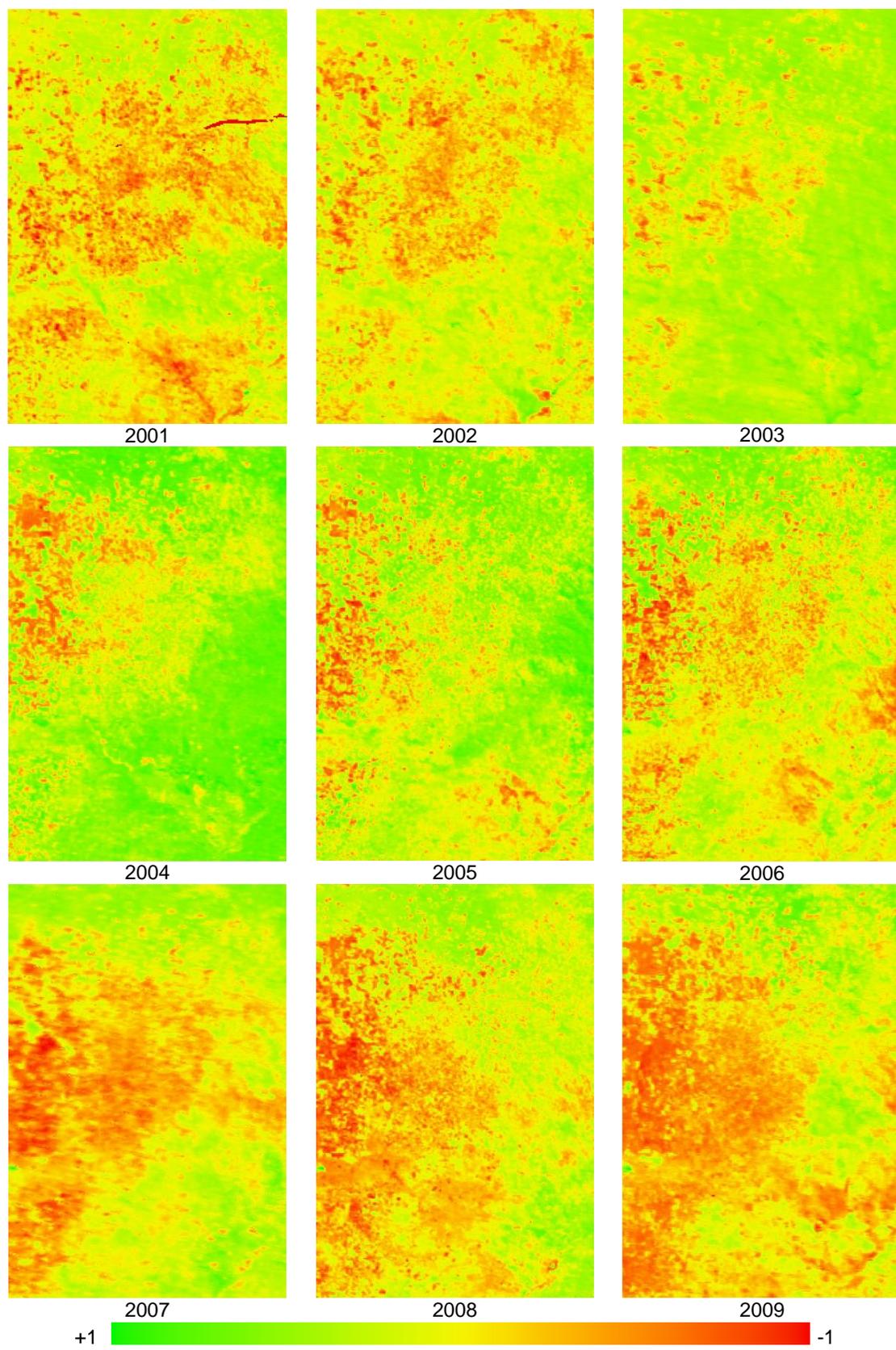


Figura 5.15. Secuencia del NDWI para el mes de enero

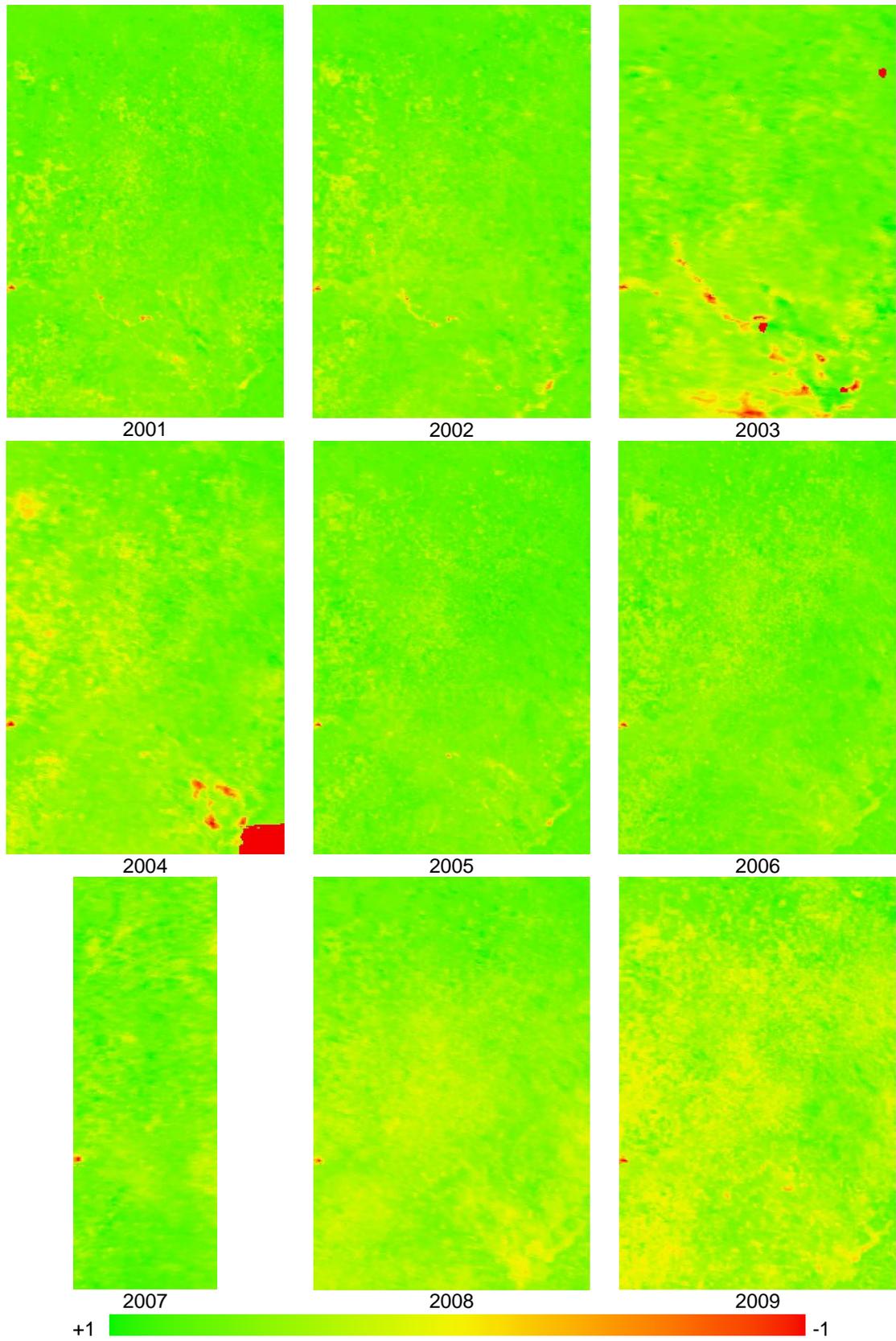


Figura 5.16. Secuencia del NDVI para el mes de abril

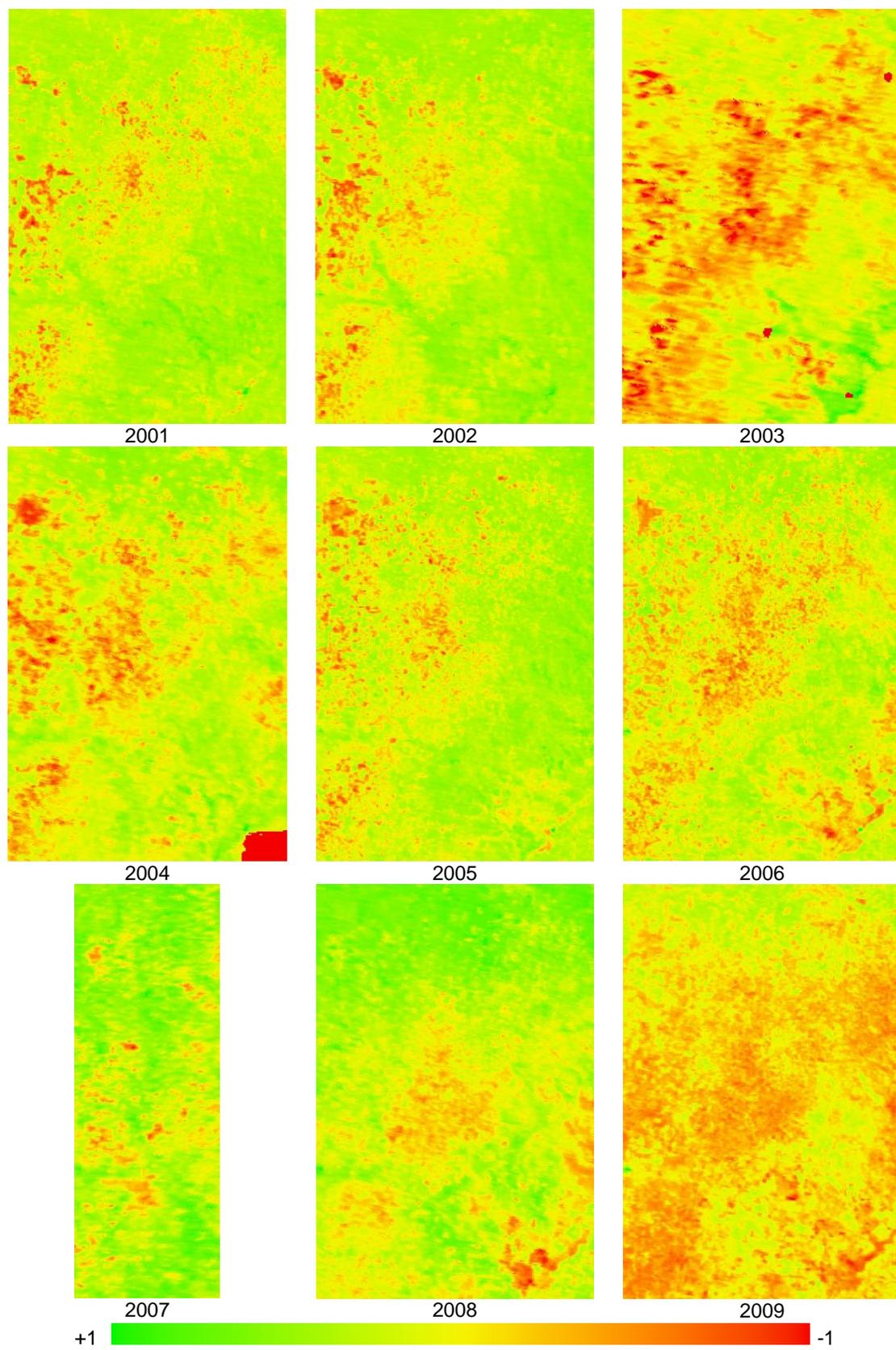


Figura 5.17. Secuencia del NDWI para el mes de abril

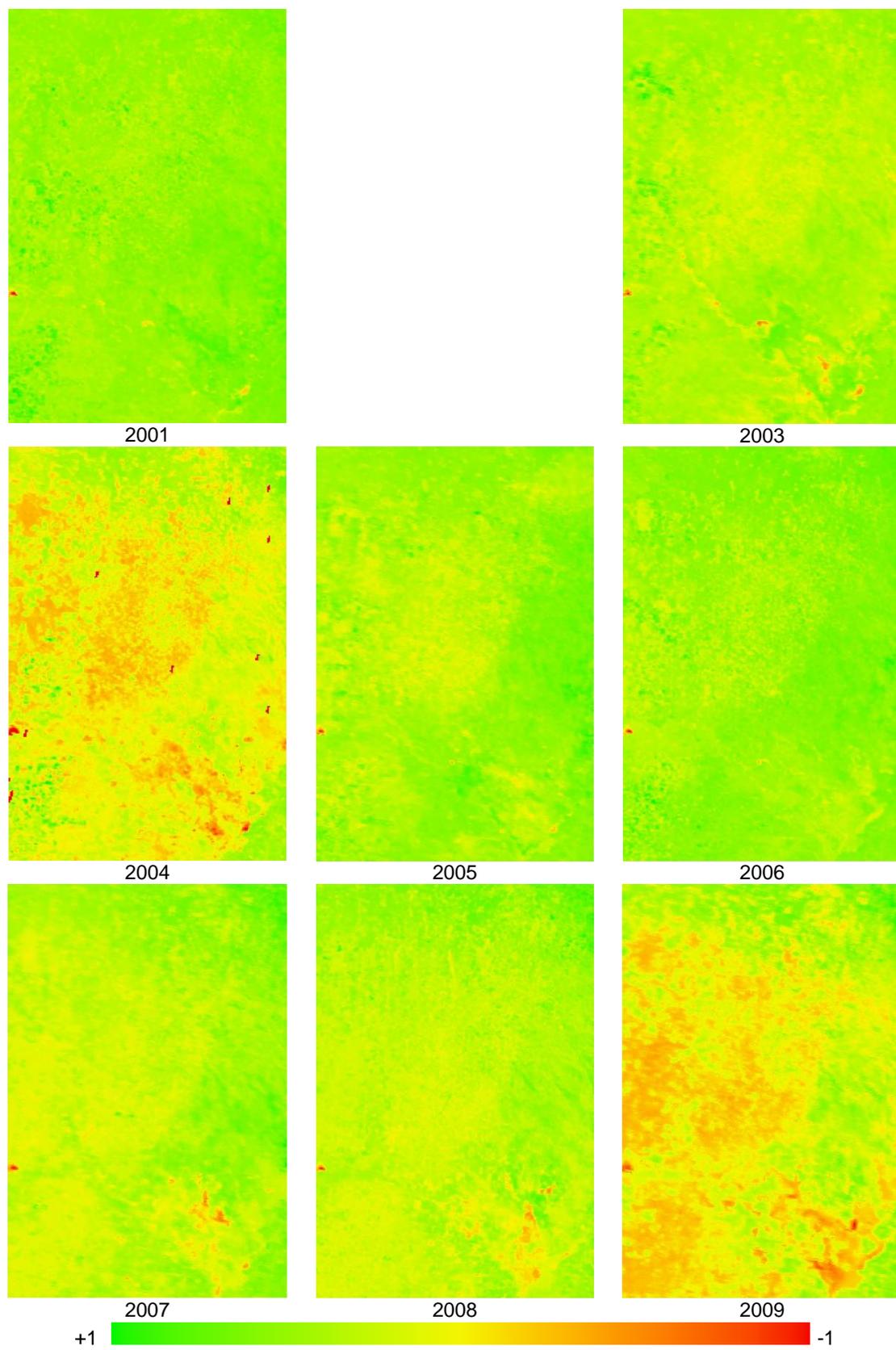


Figura 5.18. Secuencia del NDVI para el mes de julio

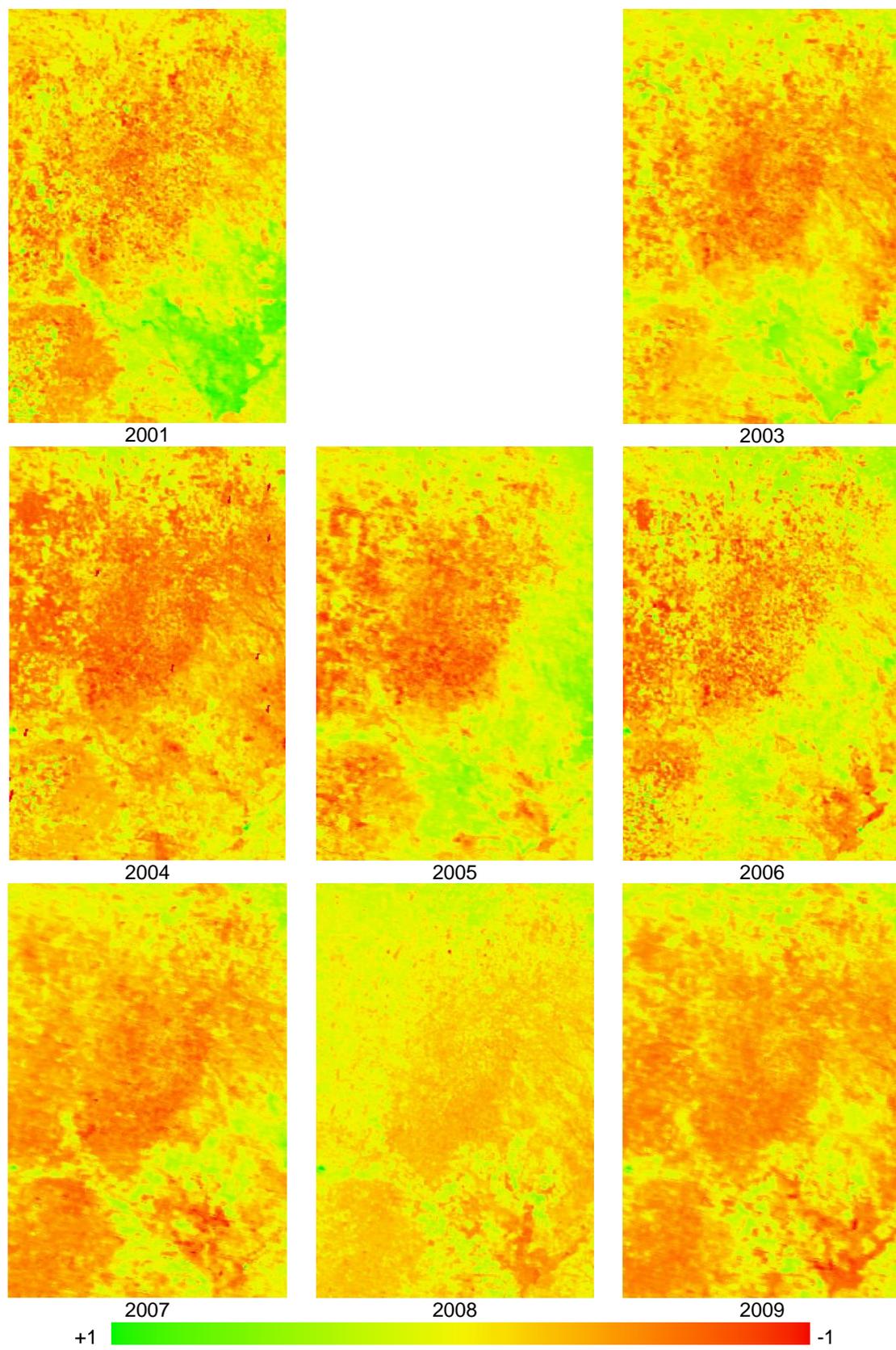


Figura 5.19. Secuencia del NDWI para el mes de julio

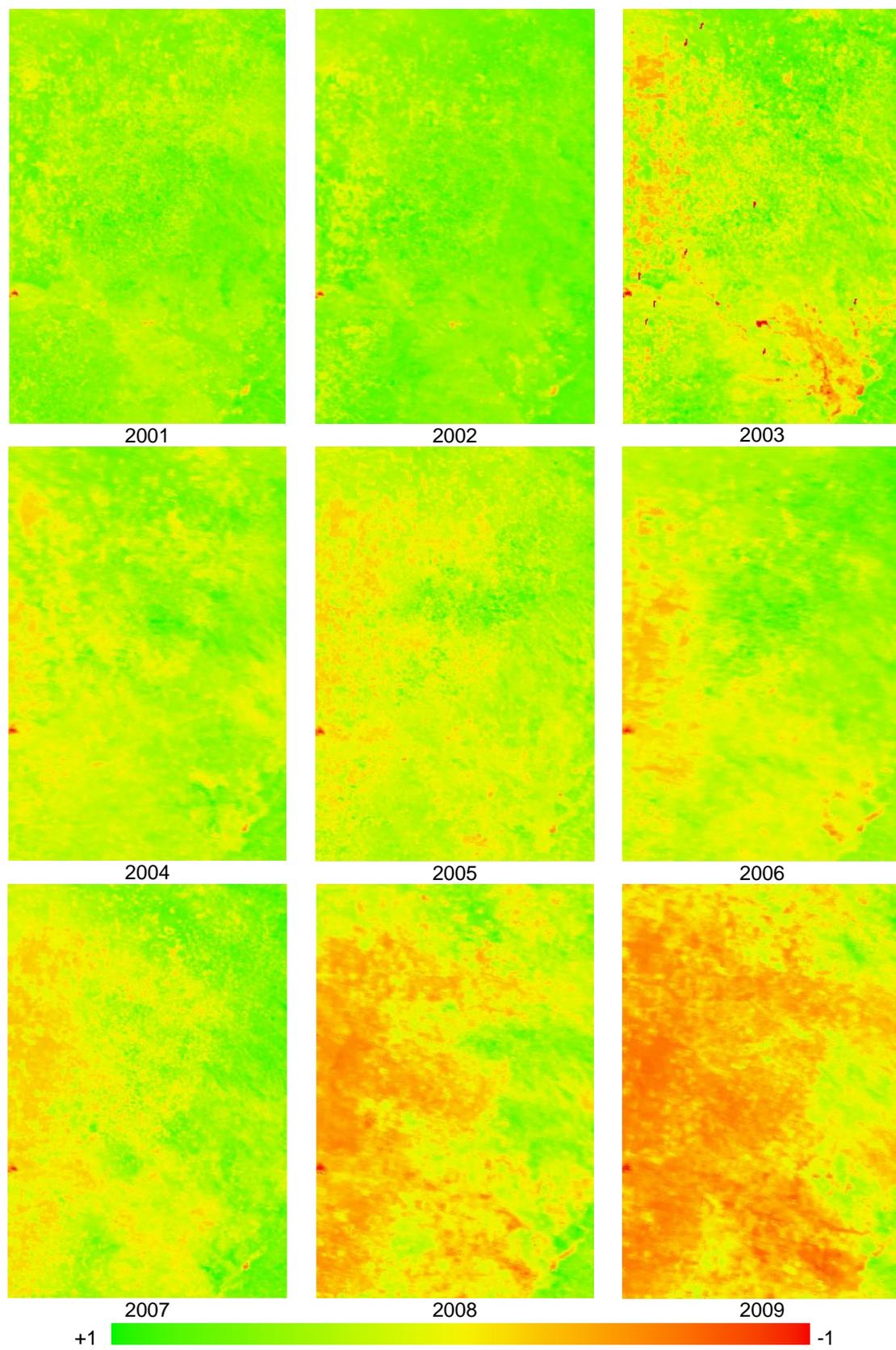


Figura 5.20. Secuencia del NDVI para el mes de octubre

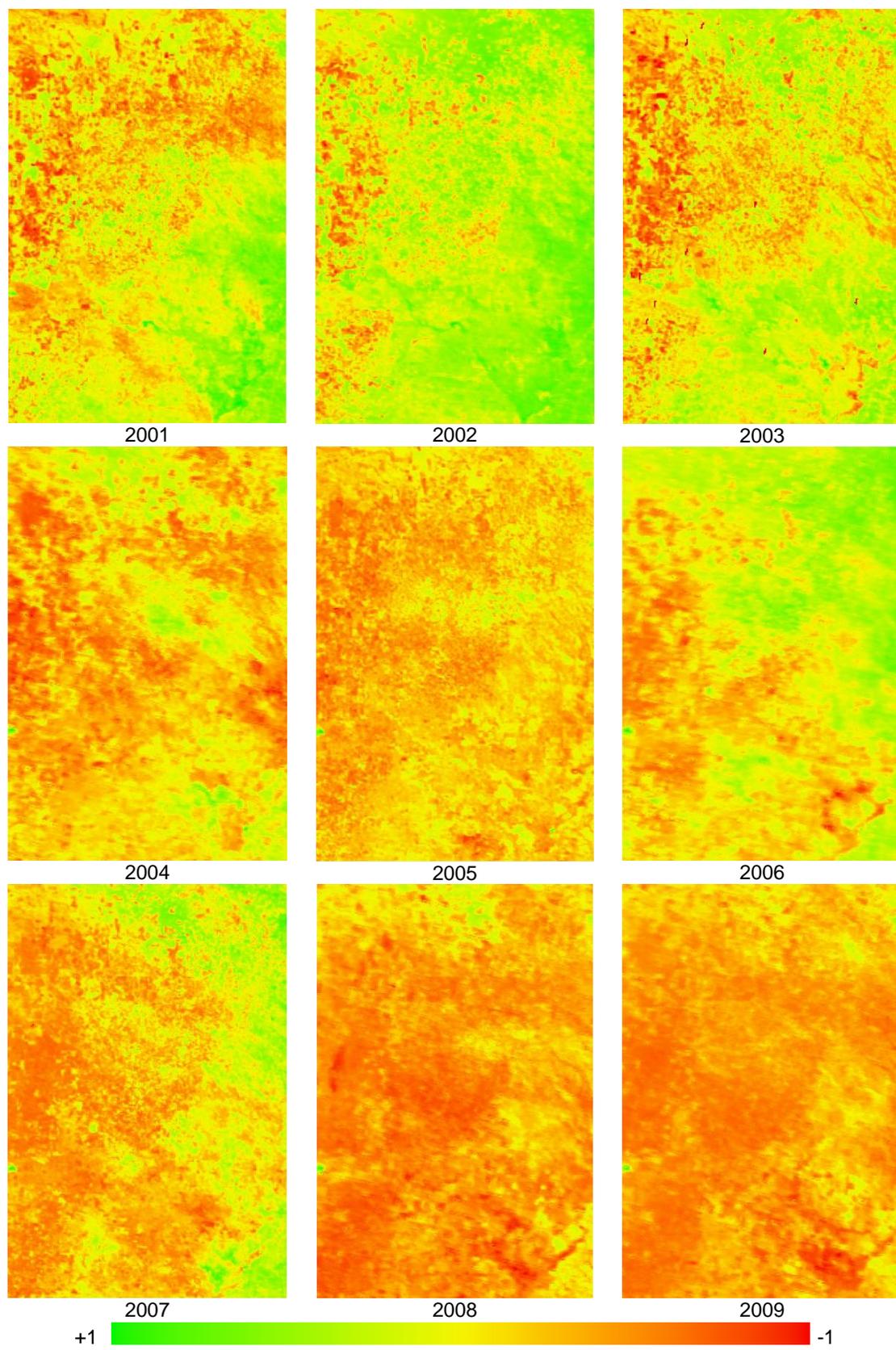


Figura 5.21. Secuencia del NDWI para el mes de octubre

## **6. DISCUSION**

Las diferencias de escalas espaciales que tiene el PDSI (puntual) y los IVs (regional) aquí utilizadas, son importantes a la hora de evaluar las similitudes y diferencias de los resultados. En la aplicación realizada en esta tesis, el PDSI se obtiene para 3 estaciones meteorológicas, cuya cobertura es de 10m aproximadamente, mientras que cada píxel de las imágenes de los IV(s) tienen 1Km<sup>2</sup>. Además de las diferencias espaciales entre ambas metodologías, hay que tener presente que los IV(s) representan un instante de tiempo, mientras que un valor de PDSI, es representativo del mes.

En líneas generales, en todos los períodos analizados se observa que las variaciones temporales de los IV(s), son coherentes a las presentadas por el PDSI que se muestra en la Figura (3.3). A fin de realizar un análisis de mayor detalle, se disgregaron los resultados del PDSI en períodos similares a los realizados para los IVs. Cabe remarcar nuevamente, que la serie de Las Breñas es la única dentro de la zona de estudio, y por lo tanto, se le dio mayor peso en el análisis que a Reconquista y Santiago del Estero.

La Figura (6.1) muestra los valores de PDSI para el período de enero. Las variaciones temporales de los IVs según la Figura (5.2) reproducen con fidelidad las variaciones del PDSI, especialmente el NDWI. En ambas metodologías se refleja un aumento de la humedad de la zona hasta el año 2003, produciéndose una caída significativa en 2004. Entre el 2005 y 2007, se observa una ligera tendencia a incrementar el déficit hídrico, con una caída abrupta en los valores a partir del año 2008.

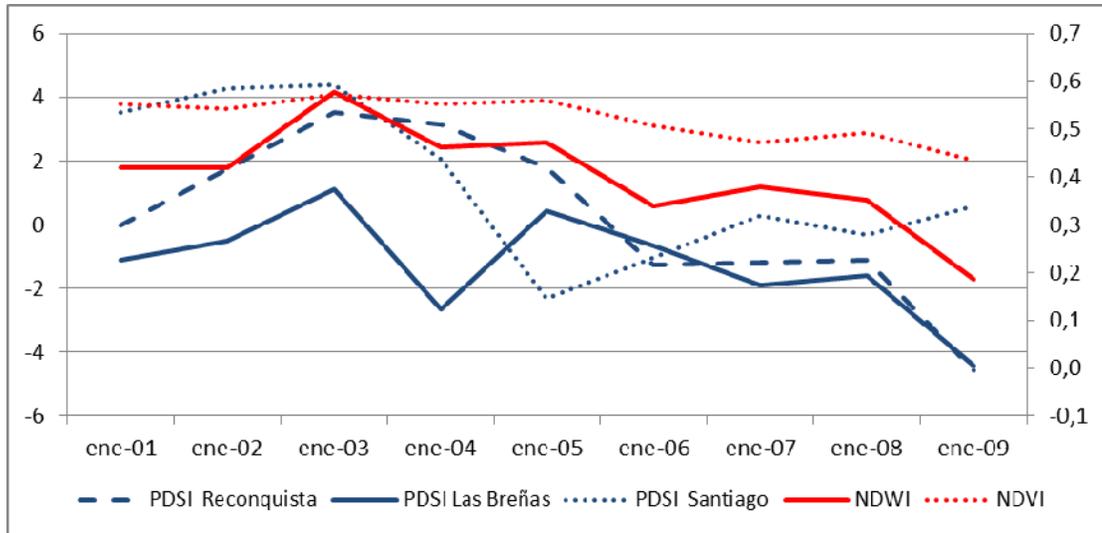


Figura 6.1. Valores de PDSI e IVs para el período de enero

Los valores del PDSI para el período de abril se muestran en la Figura (6.2). Los resultados de los IVs presentados en la Figura (5.3) reflejan consistentemente, las variaciones del estado hídrico del sistema. Las series de los IVs reproducen el incremento de humedad en el sistema en los años 2002, 2005 y 2007, así como la disminución pronunciada de la misma en el año 2009, que se refleja en las series de PDSI de Las Breñas y Reconquista. En este período se observa nuevamente que el NDWI responde mejor a las variaciones de humedad que el NDVI.

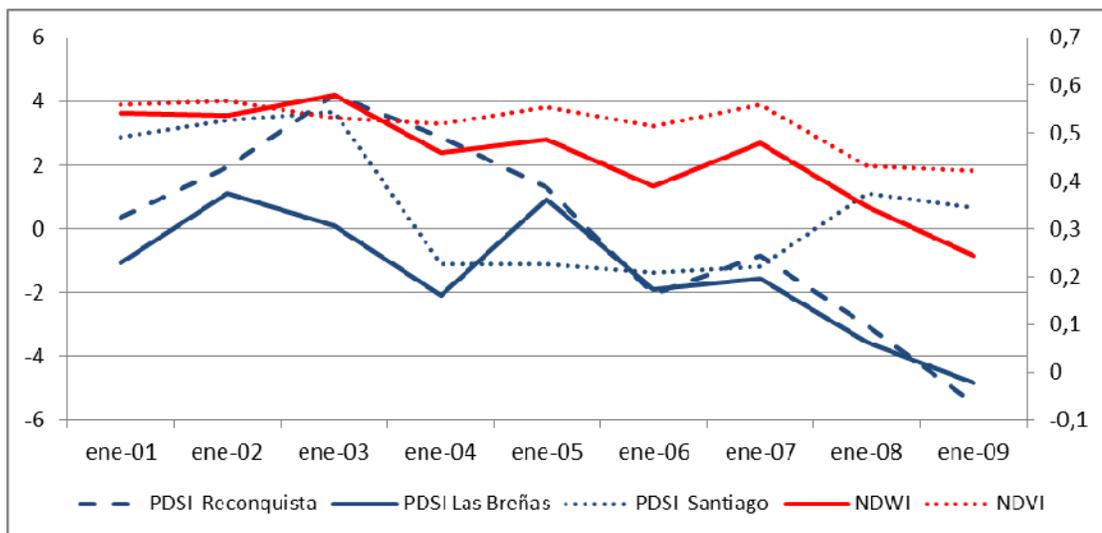


Figura 6.2. Valores de PDSI e IVs para el período de abril

La Figura (6.3) muestra los valores de PDSI para el mes de julio. En este período nuevamente se observa una buena correlación con los resultados de los IVs (Figura (5.4)), especialmente con la serie de PDSI de Las Breñas. Ambas metodologías reproducen un déficit hídrico importante en el año 2004. El sistema se recupera parcialmente durante los años 2005 y 2006, comenzando una caída significativa a partir del 2007.

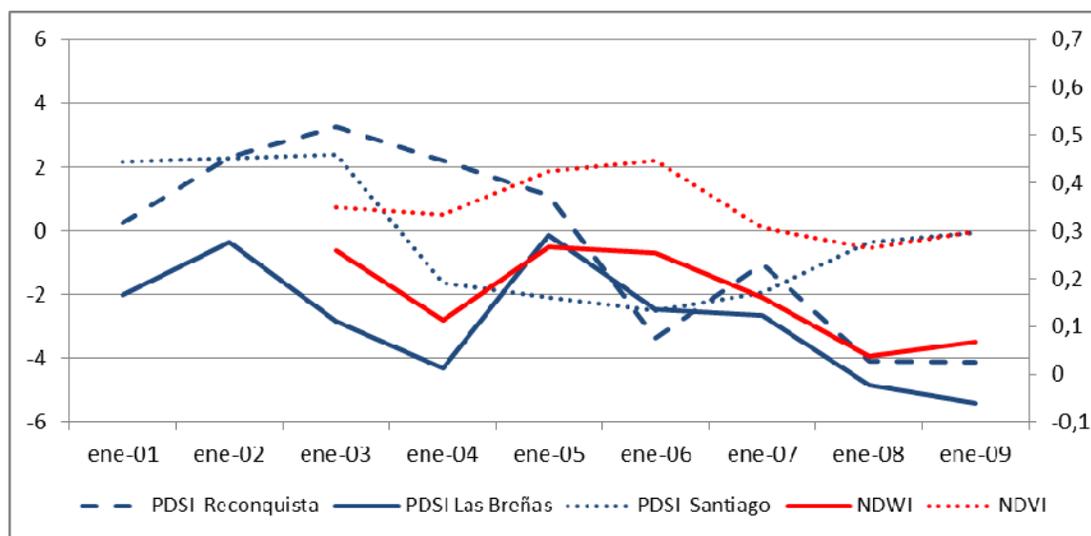


Figura 6.3. Valores de PDSI e IVs para el período de julio

Las series temporales de IVs correspondiente al mes de octubre (Figura (5.5)) poseen también una correlación buena con las serie de PDSI (Figura (6.4)). Sin embargo, en este período, los IVs, reflejan una recuperación importante en la humedad del sistema en el año 2006, que no se ve reflejada en el PDSI. Las precipitaciones intensas en el mes de junio de 2006, registradas por varias estaciones de la APA, son la causa del repunte en los valores de los IVs. En este punto, se visualizan diferencias entre ambas metodologías. La humedad antecedente de varios meses incide fuertemente en el valor del PDSI, y es improbable que un mes aislado pueda revertir una situación de sequía. En cambio, un

monto de precipitación adecuado, puede, al menos temporalmente, mejorar notablemente, el valor de un IV.

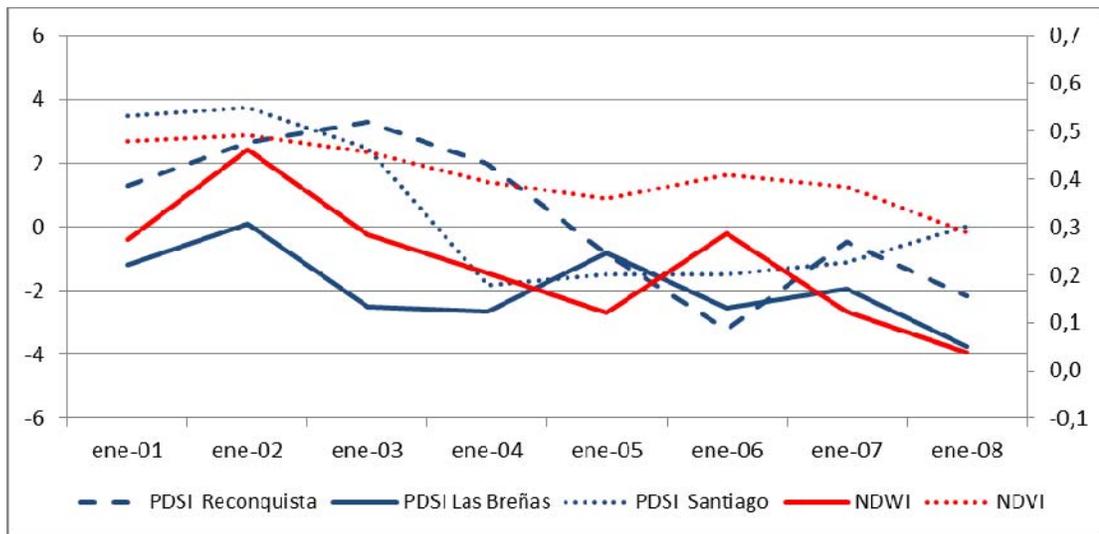


Figura 6.4. Valores de PDSI e IVs para el período de octubre

En principio El PDSI reflejaría mejor las variaciones de la reserva total de agua del sistema, mientras que los valores de los IVs estarían asociados a la disponibilidad de humedad para las necesidades actuales de la vegetación.

Es destacable que las mayores variaciones temporales de los IVs, se observaron en los períodos de principio y fin del año hidrológico, correspondiente a la estación seca. Por el contrario, el PDSI en el período analizado, es mas sensible en los meses de enero y abril, y no tanto en octubre, especialmente si observamos la serie de Las Breñas (Figura (6.4)). En octubre, cuando reservas de agua son mínimas y las precipitaciones bajas, el PDSI detecta con dificultad las sequías. A su vez, durante los meses de noviembre y abril, aunque las precipitaciones no lleguen a ser suficientes para recuperar los niveles normales de almacenamiento de agua, pueden satisfacer parte de los requerimientos de agua para el desarrollo de la vegetación.

## **7. CONCLUSIONES**

En esta tesis se analizó fundamentalmente la evolución temporal de dos índices de vegetación, el NDVI y el NDWI, obtenidos con imágenes satelitales del sensor MODIS, con el objeto de identificar y monitorear las condiciones de humedad durante los períodos de sequía. Los resultados de los IV(s), fueron comparados posteriormente con el PDSI desarrollado a tres estaciones meteorológicas. La zona de estudio corresponde a una región del noreste argentino, profundamente afectada por la última sequía registrada en el período 2003-2010 (Szymula et. al., 2010).

De acuerdo al PDSI, desarrollado a series de datos meteorológicos de aproximadamente 40 años de longitud, se concluye que en toda la zona, la última sequía fue de severa a extremadamente severa. El registro histórico, indica que para la zona este del área estudiada, la sequía de los últimos años tuvo un carácter de excepcional por ser la primera vez que se alcanzan valores extremos. Se destaca que el centro y oeste han experimentado en años anteriores períodos de sequía importantes.

Los valores de PDSI indican que las estaciones de Las Breñas y Santiago del Estero presentan períodos húmedos seguidos de secos (o viceversa) en igual porcentaje; mientras que, Reconquista se caracteriza por ser una zona con problemas de excesos hídricos la mayor parte del tiempo, salvo en los últimos dos años donde se observa una sequía extrema.

Las desventajas que se atribuyen al PDSI, son, por un lado, que puede dificultar la identificación de sequías emergentes y por otro, que las relaciones empíricas se

determinaron con observaciones de solo 9 estaciones (Alley, 1984). Al respecto, la propuesta de Wells et al. (2004) permite ajustar parte de las relaciones empíricas del método con datos propios de cada estación.

El PDSI es una metodología ampliamente usada en la evaluación de sequías. Sin embargo, la escasa densidad de estaciones meteorológicas y/o con registros suficientemente amplios en el noreste argentino sugiere la necesidad de contar con otras herramientas y/o metodologías que permitan evaluar con mayor detalle la variabilidad espacial del fenómeno.

Metodologías basadas en teledetección como las desarrolladas en este trabajo, permiten un análisis apropiado de la espacialidad de los déficits. Sin embargo, los resultados son cualitativos y no cuantitativos, y por lo tanto, requieren, de evaluaciones complementarias de otras metodologías.

Los resultados obtenidos muestran que la variación del NDVI y NDWI son compatibles con la variación de humedad del ambiente, más precisamente del píxel y por lo tanto, pueden ser utilizados para analizar el comienzo y evolución de las sequías. En el período analizado el NDWI resulta más sensible a los efectos del estrés hídrico que el NDVI, lo que es lógico dada la génesis del índice.

La variación del NDVI y NDWI en el área de estudio no solo son compatibles con la variación de precipitación y temperatura (Szymula y Venturini, 2011) sino también por la distribución de sus suelos y las prácticas que se realizan sobre los mismos.

Se destaca que en este estudio se utilizaron imágenes MODIS cuyos píxeles tienen  $1 \text{ km}^2$ . Esto implica que hay píxeles mixtos (por ejemplo, suelo desnudo + suelo vegetado + agua libre) en todas las escenas analizadas. Por lo que se puede suponer que las áreas definidas como cultivos, tengan mezcla de suelo desnudo y cultivo. Esta señal electromagnética captada en un píxel proviene de diferentes elementos, que van a resumirse en un valor de NDVI y NDWI. Sin duda la resolución espacial influye en la distribución regional de los índices y se sumaría al efecto que tiene la distribución del tipo y uso de suelo sobre los mismos.

Los valores de los índices de vegetación de las áreas de cultivos estarán condicionados a los ciclos fenológicos de los mismos. Los principales cultivos de la zona – girasol, algodón, soja y maíz – tienen su período de siembra entre septiembre y noviembre. La etapa de cosecha también es variable y se extiende desde mediados de enero hasta el mes de abril inclusive. Las incertidumbres asociadas a las fases fenológicas de los cultivos se reflejarían más en variaciones del NDVI que de NDWI. De hecho, el NDVI responde a cambios de cantidad de clorofila en el píxel, mientras que el NDWI responde a cambios en el contenido de humedad del píxel. Sin embargo, un estudio más detallado que involucre las clases de cultivos debe ser realizado.

El análisis de los valores medios regionales de los índices en la zona, muestran que los meses de primavera, caracterizados en general por montos de precipitación escasos, son más apropiados para analizar el comienzo de una sequía, ya que manifiestan un decaimiento marcado al comienzo de la misma, asociado a la disminución de la humedad disponible para el rebrote de la vegetación. Sin embargo, un valor promedio puede no indicar el comportamiento general de una zona, sobretodo si la misma es extensa como el

área de estudio de este trabajo. La heterogeneidad de la cobertura vegetal asociada a la variabilidad espacio-temporal de los factores que afectan los índices, especialmente la precipitación, puede generar una sequía localizada que no se manifiesta en los valores medios regionales.

El análisis de los histogramas de frecuencia, mostro ser una herramienta apropiada para evaluar el inicio y seguimiento de una sequía, y fundamentalmente para determinar la homogeneidad o heterogeneidad de la misma en la zona de estudio.

En general podemos decir que la distribución espacial de los índices de vegetación responde a patrones climáticos y fisiográficos, como es de esperar. Esto explicaría el corrimiento, y la forma, que se observa en los histogramas de frecuencia del NDWI a medida que se profundiza una sequía (Szymula y Venturini, 2011). En efecto, primero se agota la humedad en los suelos pobres, esto genera un cambio en los histogramas de los índices que se amplifica a medida que otras clases de suelos se van secando.

La aplicación de los índices de vegetación, al igual que otras metodologías como el PDSI, reflejaría la estacionalidad de la precipitación, apreciándose durante una sequía una recuperación parcial del sistema en los meses de verano y una caída cada vez más pronunciada en el resto del año a medida que avanza la misma. Sin embargo, un estudio comparativo más detallado al respecto debe ser realizado.

Se concluye del análisis conjunto de los resultados obtenidos con el PDSI, que la zona en estudio en condiciones normales, presenta valores medios regionales de

aproximadamente 0,5 de NDVI y 0,4 NDWI para el mes de enero (verano), mientras que valores medios regionales inferiores a 0,4 para NDVI y 0,3 para el NDWI, indicaría una sequía severa a extrema.

En el período de abril, valores medios regionales, tanto de NDVI como de NDWI en el orden de 0,5, indicaría una situación normal, mientras que con valores inferiores a 0,3 para el NDWI y 0,4 del NDVI, estaríamos en una sequía severa o extrema.

En julio, se dificulta la identificación de un rango de valores que me indique la sequía para el NDVI. En cambio, el NDWI, presentaría una situación hídrica normal con valores en torno a 0,2. Valores inferiores a 0,1 reflejaría una sequía severa a extrema.

Para los meses de primavera (octubre), la zona debería presentar valores promedios en 0,4 para el NDVI y 0,3 para el NDWI en una situación normal, e inferiores a 0,3 para el NDVI y 0,1 de NDWI durante una sequía severa.

Se considera aplicable la utilización de IV(s) en la identificación y monitoreo de sequías. Sin embargo, se necesita más investigación para determinar la utilidad de los IV(s) en el monitoreo de períodos húmedos, de manera de poder evaluar todas las situaciones posibles como el PDSI.

El PDSI permite evaluar las sequías meteorológicas e hidrológicas, con importante influencia de la situación antecedente. Metodologías basadas en IV(s), son apropiadas para evaluar las sequías agrícolas, donde los valores obtenidos, están asociados a la

disponibilidad de agua para el desarrollo de las plantas, y la situación antecedente influye en un corto plazo.

Existen muchas metodologías, que permiten evaluar las sequías. Las mismas, se manifiestan en distintos ambientes, tanto antrópicos, como naturales, y podemos encontrarnos con sequías meteorológicas, hidrológicas, agrícolas o socio-económicas. No existe, al menos hoy, una metodología que tenga en cuenta todos los aspectos de una sequía, y por lo tanto, no se puede recomendar una. En su selección, habrá que plantearse primeramente qué es lo que se quiere evaluar y qué información hay disponible para hacerlo.

## **8. ANEXOS**

### 8.1 Índice de Palmer

En este punto, se presenta información referente al PDSI desarrollado en el punto 3. Para las tres estaciones, se describen, las características del suelo y parámetros del mismo utilizados en el balance hídrico. Se muestran también los coeficientes mensuales de escorrentía ( $\alpha$ ), recarga ( $\beta$ ), pérdida ( $\delta$ ) y escurrimiento ( $\gamma$ ), así como el coeficiente  $k'$ . Finalmente, se muestran los valores del PDSI que se presentaron en la tabla (3.2)

En las Tablas (8.1), (8.4) y (8.7) se presentan las características del suelo utilizadas, donde:

Amax = Capacidad de almacenamiento máximo del suelo (mm)

CC = Capacidad de Campo (mm)

MP = Marchitez permanente (mm)

AWC = Agua Útil (mm)

AWCs = Agua útil del estrato superior (mm)

AWCu = Agua útil del estrato inferior (mm)

### 8.1.1 Reconquista

AWC	105
Amax	472
CC	232
MP	127
CC-MP	105
AWCs	25
AWCu	80

Tabla 8.1 Parámetros del suelo para Reconquista

Mes	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$k'$
Enero	0,67	0,08	0,01	0,36	0,73
Febrero	0,45	0,24	0,03	0,21	0,58
Marzo	0,61	0,22	0,05	0,10	0,54
Abril	0,70	0,27	0,06	0,15	0,47
Mayo	0,84	0,08	0,00	0,30	0,90
Junio	0,65	0,09	0,02	0,39	1,11
Julio	0,83	0,03	0,00	0,46	1,21
Agosto	0,72	0,01	0,00	0,54	1,42
Septiembre	0,54	0,03	0,00	0,33	1,18
Octubre	0,50	0,17	0,02	0,23	0,60
Noviembre	0,70	0,14	0,03	0,21	0,64
Diciembre	0,76	0,09	0,01	0,29	0,76

Tabla 8.2. Coeficientes del método para Reconquista

Fecha	PDSI	Fecha	PDSI	Fecha	PDSI	Fecha	PDSI
ago-70	0,1	jun-80	1,8	abr-90	-0,9	feb-00	-1,8
sep-70	0,3	jul-80	1,4	may-90	-0,8	mar-00	-0,2
oct-70	0,3	ago-80	1,2	jun-90	-0,8	abr-00	-1,0
nov-70	-0,3	sep-80	1,3	jul-90	-0,7	may-00	0,3
dic-70	-0,9	oct-80	1,2	ago-90	-0,6	jun-00	-1,1
ene-71	-0,3	nov-80	0,9	sep-90	-0,4	jul-00	-0,4
feb-71	-0,1	dic-80	-1,0	oct-90	0,3	ago-00	-1,2
mar-71	0,0	ene-81	0,8	nov-90	0,5	sep-00	-0,3
abr-71	-0,2	feb-81	0,0	dic-90	0,9	oct-00	-1,2
may-71	-0,4	mar-81	0,0	ene-91	1,1	nov-00	0,3
jun-71	-0,6	abr-81	0,0	feb-91	1,1	dic-00	-0,5
jul-71	-0,7	may-81	0,2	mar-91	0,7	ene-01	0,0
ago-71	-0,6	jun-81	0,3	abr-91	0,0	feb-01	0,0
sep-71	-0,2	jul-81	0,1	may-91	0,1	mar-01	0,4
oct-71	-0,3	ago-81	0,1	jun-91	0,4	abr-01	0,4
nov-71	-1,0	sep-81	0,3	jul-91	0,2	may-01	-0,1
dic-71	-0,8	oct-81	-0,2	ago-91	0,2	jun-01	0,6
ene-72	-1,1	nov-81	0,0	sep-91	0,4	jul-01	0,2
feb-72	-2,0	dic-81	0,0	oct-91	0,4	ago-01	0,7
mar-72	-1,3	ene-82	-0,3	nov-91	0,1	sep-01	0,8
abr-72	-0,8	feb-82	-0,4	dic-91	0,8	oct-01	1,3
may-72	-0,9	mar-82	-1,0	ene-92	0,6	nov-01	1,9
jun-72	-0,7	abr-82	-1,5	feb-92	1,0	dic-01	1,8
jul-72	-0,5	may-82	-2,9	mar-92	1,0	ene-02	1,7
ago-72	-0,5	jun-82	-1,2	abr-92	1,7	feb-02	1,3
sep-72	-0,1	jul-82	-1,9	may-92	2,0	mar-02	1,5
oct-72	0,3	ago-82	-2,0	jun-92	2,0	abr-02	2,0
nov-72	0,6	sep-82	0,1	jul-92	1,9	may-02	2,0
dic-72	0,6	oct-82	-1,1	ago-92	1,9	jun-02	1,8
ene-73	0,8	nov-82	0,6	sep-92	1,9	jul-02	2,3
feb-73	1,4	dic-82	-1,0	oct-92	2,2	ago-02	2,1
mar-73	2,0	ene-83	-0,3	nov-92	2,3	sep-02	2,5
abr-73	2,8	feb-83	-0,2	dic-92	2,5	oct-02	2,6
may-73	2,5	mar-83	-0,2	ene-93	2,6	nov-02	3,3
jun-73	3,4	abr-83	-0,2	feb-93	2,5	dic-02	3,8
jul-73	3,5	may-83	-0,1	mar-93	2,6	ene-03	3,5
ago-73	3,2	jun-83	-0,1	abr-93	2,6	feb-03	3,6
sep-73	2,9	jul-83	0,4	may-93	2,7	mar-03	4,0
oct-73	2,7	ago-83	0,1	jun-93	2,3	abr-03	4,2
nov-73	2,2	sep-83	0,0	jul-93	2,0	may-03	4,0

dic-73	0,4	oct-83	0,2	ago-93	1,7	jun-03	3,6
ene-74	1,4	nov-83	0,3	sep-93	1,6	jul-03	3,2
feb-74	1,1	dic-83	-0,1	oct-93	2,0	ago-03	3,1
mar-74	1,0	ene-84	0,2	nov-93	2,3	sep-03	3,0
abr-74	1,3	feb-84	0,9	dic-93	2,6	oct-03	3,3
may-74	1,1	mar-84	0,9	ene-94	2,5	nov-03	3,5
jun-74	0,9	abr-84	0,9	feb-94	3,0	dic-03	3,6
jul-74	1,3	may-84	0,8	mar-94	3,1	ene-04	3,1
ago-74	0,9	jun-84	0,9	abr-94	3,1	feb-04	3,0
sep-74	1,5	jul-84	0,9	may-94	3,1	mar-04	2,7
oct-74	0,7	ago-84	0,7	jun-94	2,9	abr-04	2,9
nov-74	0,8	sep-84	1,1	jul-94	2,8	may-04	2,6
dic-74	1,0	oct-84	2,0	ago-94	3,0	jun-04	2,5
ene-75	0,7	nov-84	2,4	sep-94	2,7	jul-04	2,2
feb-75	0,8	dic-84	2,2	oct-94	2,7	ago-04	1,9
mar-75	1,0	ene-85	1,7	nov-94	2,5	sep-04	2,0
abr-75	1,1	feb-85	2,2	dic-94	2,4	oct-04	2,0
may-75	1,3	mar-85	2,7	ene-95	2,3	nov-04	2,0
jun-75	1,4	abr-85	2,8	feb-95	2,5	dic-04	2,2
jul-75	1,3	may-85	2,8	mar-95	2,5	ene-05	1,8
ago-75	1,6	jun-85	2,7	abr-95	2,1	feb-05	1,4
sep-75	1,8	jul-85	2,7	may-95	2,0	mar-05	1,6
oct-75	1,8	ago-85	2,9	jun-95	1,6	abr-05	1,3
nov-75	1,8	sep-85	3,2	jul-95	1,1	may-05	1,5
dic-75	1,3	oct-85	3,4	ago-95	0,9	jun-05	1,5
ene-76	1,7	nov-85	2,9	sep-95	-0,4	jul-05	1,1
feb-76	1,8	dic-85	2,2	oct-95	-0,7	ago-05	1,0
mar-76	2,0	ene-86	2,1	nov-95	-0,9	sep-05	0,5
abr-76	1,6	feb-86	2,2	dic-95	-1,8	oct-05	-0,8
may-76	1,5	mar-86	2,1	ene-96	-1,0	nov-05	-1,1
jun-76	1,1	abr-86	2,6	feb-96	-1,3	dic-05	-0,5
jul-76	0,7	may-86	3,1	mar-96	0,5	ene-06	-1,3
ago-76	0,1	jun-86	3,8	abr-96	-0,6	feb-06	-1,6
sep-76	0,0	jul-86	3,8	may-96	-0,8	mar-06	-1,5
oct-76	0,1	ago-86	3,3	jun-96	-0,8	abr-06	-2,1
nov-76	0,0	sep-86	3,6	jul-96	-1,2	may-06	-3,5
dic-76	0,6	oct-86	3,5	ago-96	-0,9	jun-06	-2,3
ene-77	1,0	nov-86	3,9	sep-96	-1,0	jul-06	-3,4
feb-77	2,0	dic-86	3,8	oct-96	-0,7	ago-06	-4,0
mar-77	2,1	ene-87	4,4	nov-96	0,0	sep-06	-4,4
abr-77	2,2	feb-87	4,3	dic-96	0,1	oct-06	-3,2

may-77	2,2	mar-87	4,6	ene-97	-0,1	nov-06	-1,8
jun-77	1,8	abr-87	4,7	feb-97	0,2	dic-06	-1,6
jul-77	1,8	may-87	4,4	mar-97	0,1	ene-07	-1,2
ago-77	1,9	jun-87	3,9	abr-97	-0,5	feb-07	0,7
sep-77	1,7	jul-87	3,9	may-97	-0,9	mar-07	-0,8
oct-77	1,8	ago-87	3,8	jun-97	-0,8	abr-07	-0,8
nov-77	2,1	sep-87	3,7	jul-97	-0,9	may-07	-0,5
dic-77	2,2	oct-87	3,2	ago-97	-0,8	jun-07	-0,7
ene-78	2,6	nov-87	3,0	sep-97	-1,1	jul-07	-1,0
feb-78	2,7	dic-87	2,4	oct-97	-0,3	ago-07	-0,2
mar-78	2,5	ene-88	2,8	nov-97	-0,6	sep-07	-0,8
abr-78	2,2	feb-88	2,4	dic-97	0,6	oct-07	-0,5
may-78	1,9	mar-88	2,5	ene-98	2,0	nov-07	-0,7
jun-78	2,1	abr-88	2,0	feb-98	3,8	dic-07	-0,7
jul-78	2,2	may-88	1,5	mar-98	4,3	ene-08	-1,1
ago-78	2,3	jun-88	1,1	abr-98	5,1	feb-08	-0,9
sep-78	2,7	jul-88	1,0	may-98	4,7	mar-08	-1,9
oct-78	3,2	ago-88	-0,6	jun-98	5,2	abr-08	-3,0
nov-78	3,3	sep-88	-0,1	jul-98	5,1	may-08	-4,0
dic-78	3,2	oct-88	-0,5	ago-98	4,9	jun-08	-4,0
ene-79	3,1	nov-88	-1,2	sep-98	4,7	jul-08	-4,1
feb-79	3,0	dic-88	-1,4	oct-98	4,4	ago-08	-3,0
mar-79	3,0	ene-89	-0,7	nov-98	4,0	sep-08	-2,1
abr-79	2,7	feb-89	-2,0	dic-98	3,8	oct-08	-2,2
may-79	2,7	mar-89	-1,8	ene-99	3,3	nov-08	-2,7
jun-79	2,5	abr-89	-0,9	feb-99	3,5	dic-08	-4,8
jul-79	2,1	may-89	-1,8	mar-99	3,2	ene-09	-4,6
ago-79	2,2	jun-89	-1,2	abr-99	3,0	feb-09	-3,8
sep-79	2,6	jul-89	-1,6	may-99	2,5	mar-09	-5,1
oct-79	2,8	ago-89	-0,8	jun-99	2,4	abr-09	-5,5
nov-79	2,7	sep-89	-1,4	jul-99	2,4	may-09	-5,8
dic-79	2,8	oct-89	-0,2	ago-99	1,9	jun-09	-4,7
ene-80	2,4	nov-89	-1,2	sep-99	1,6	jul-09	-4,1
feb-80	2,2	dic-89	-2,4	oct-99	1,2	ago-09	-5,1
mar-80	2,0	ene-90	-2,5	nov-99	0,3	sep-09	-4,2
abr-80	1,9	feb-90	-1,5	dic-99	-1,7	oct-09	-4,4
may-80	2,0	mar-90	-0,9	ene-00	-0,4		

Tabla 8.3. Valores de PDSI para Reconquista

## 8.1.2 Las Breñas

AWC	17,7
Amax	472
CC	232
MP	127
CC-MP	105
AWCs	1,0
AWCu	16,7

Tabla 8.4. Parámetros del suelo para Las Breñas

Mes	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$k'$
Enero	0,54	0,04	0,00	0,23	0,73
Febrero	0,63	0,06	0,02	0,26	0,92
Marzo	0,59	0,10	0,00	0,20	0,64
Abril	0,56	0,12	0,01	0,13	0,87
Mayo	0,82	0,02	0,00	0,44	0,93
Junio	0,49	0,01	0,01	0,34	1,45
Julio	0,61	0,00	0,00	0,48	1,25
Agosto	0,43	0,00	0,00	0,45	1,42
Septiembre	0,31	0,00	0,00	0,32	1,59
Octubre	0,45	0,01	0,00	0,28	1,02
Noviembre	0,55	0,03	0,00	0,19	0,82
Diciembre	0,66	0,03	0,00	0,27	0,82

Tabla 8.5. Coeficientes del método para Las Breñas

Fecha	PDSI	Fecha	PDSI	Fecha	PDSI	Fecha	PDSI
ene-67	0,5	oct-77	-1,9	jul-88	-1,9	abr-99	-0,2
feb-67	0,8	nov-77	-1,2	ago-88	-2,4	may-99	-0,5
mar-67	0,9	dic-77	-1,5	sep-88	-2,7	jun-99	-0,4
abr-67	0,8	ene-78	-1,5	oct-88	-3,1	jul-99	-0,3
may-67	0,8	feb-78	-1,3	nov-88	-3,1	ago-99	-0,7
jun-67	0,8	mar-78	-2,4	dic-88	-3,3	sep-99	-0,9
jul-67	0,2	abr-78	-3,1	ene-89	-3,2	oct-99	-1,0
ago-67	0,3	may-78	-3,9	feb-89	-3,2	nov-99	-2,0
sep-67	0,8	jun-78	-4,0	mar-89	-2,7	dic-99	-2,7
oct-67	0,5	jul-78	-4,4	abr-89	-1,8	ene-00	-2,2

nov-67	0,0	ago-78	-4,7	may-89	-2,4	feb-00	-1,6
dic-67	-1,3	sep-78	-4,3	jun-89	-2,2	mar-00	-1,5
ene-68	-1,0	oct-78	-3,6	jul-89	-1,9	abr-00	-1,1
feb-68	-0,5	nov-78	-3,1	ago-89	-2,2	may-00	-1,3
mar-68	-1,1	dic-78	-3,7	sep-89	-2,1	jun-00	-1,5
abr-68	-1,7	ene-79	-3,5	oct-89	-1,9	jul-00	-1,8
may-68	-2,5	feb-79	-2,8	nov-89	-2,2	ago-00	-3,0
jun-68	-2,2	mar-79	-2,8	dic-89	-1,6	sep-00	-3,1
jul-68	-1,9	abr-79	-2,4	ene-90	-0,9	oct-00	-2,1
ago-68	-1,7	may-79	-3,2	feb-90	-0,3	nov-00	-1,9
sep-68	-1,9	jun-79	-2,8	mar-90	-0,3	dic-00	-1,7
oct-68	-1,6	jul-79	-3,1	abr-90	0,1	ene-01	-1,1
nov-68	-1,7	ago-79	-3,2	may-90	0,0	feb-01	-1,0
dic-68	-2,2	sep-79	-2,7	jun-90	-0,1	mar-01	-1,7
ene-69	-2,0	oct-79	-2,4	jul-90	-0,5	abr-01	-1,1
feb-69	-1,3	nov-79	-1,9	ago-90	-1,1	may-01	-1,8
mar-69	-1,2	dic-79	-1,0	sep-90	-1,1	jun-01	-1,6
abr-69	-1,6	ene-80	-1,7	oct-90	-0,6	jul-01	-2,0
may-69	-1,8	feb-80	-1,3	nov-90	-0,6	ago-01	-1,8
jun-69	-1,7	mar-80	-1,6	dic-90	-0,2	sep-01	-1,6
jul-69	-1,6	abr-80	-1,1	ene-91	0,2	oct-01	-1,2
ago-69	-2,2	may-80	-0,8	feb-91	-0,2	nov-01	-1,0
sep-69	-2,4	jun-80	-0,3	mar-91	-0,1	dic-01	-1,2
oct-69	-2,5	jul-80	-0,7	abr-91	0,4	ene-02	-0,5
nov-69	-3,1	ago-80	-1,3	may-91	1,4	feb-02	0,1
dic-69	-3,5	sep-80	-1,4	jun-91	1,1	mar-02	0,4
ene-70	-3,5	oct-80	-1,2	jul-91	1,0	abr-02	1,1
feb-70	-4,3	nov-80	-0,4	ago-91	0,9	may-02	0,2
mar-70	-4,8	dic-80	0,1	sep-91	1,5	jun-02	0,4
abr-70	-5,3	ene-81	0,3	oct-91	2,1	jul-02	-0,3
may-70	-4,8	feb-81	1,1	nov-91	1,4	ago-02	-1,0
jun-70	-4,7	mar-81	1,5	dic-91	2,1	sep-02	-0,8
jul-70	-4,3	abr-81	1,6	ene-92	1,8	oct-02	0,1
ago-70	-4,2	may-81	1,5	feb-92	1,9	nov-02	0,4
sep-70	-3,7	jun-81	1,3	mar-92	0,8	dic-02	0,8
oct-70	-3,3	jul-81	0,3	abr-92	1,0	ene-03	1,1
nov-70	-3,7	ago-81	0,3	may-92	0,6	feb-03	-0,9
dic-70	-3,2	sep-81	-0,1	jun-92	0,7	mar-03	0,2
ene-71	-2,8	oct-81	0,3	jul-92	0,7	abr-03	0,1
feb-71	-3,0	nov-81	0,4	ago-92	0,5	may-03	-0,8
mar-71	-2,6	dic-81	0,5	sep-92	0,3	jun-03	-1,0

abr-71	-2,0	ene-82	0,7	oct-92	0,8	jul-03	-2,8
may-71	-2,6	feb-82	0,7	nov-92	1,3	ago-03	-3,7
jun-71	-2,7	mar-82	0,5	dic-92	2,4	sep-03	-3,3
jul-71	-2,9	abr-82	0,2	ene-93	2,0	oct-03	-2,5
ago-71	-2,3	may-82	-0,5	feb-93	-0,1	nov-03	-2,3
sep-71	-2,5	jun-82	0,1	mar-93	0,4	dic-03	-2,1
oct-71	-2,2	jul-82	-0,1	abr-93	0,6	ene-04	-2,6
nov-71	-2,6	ago-82	-0,6	may-93	0,0	feb-04	-1,9
dic-71	-4,0	sep-82	0,0	jun-93	-0,4	mar-04	-1,6
ene-72	-4,4	oct-82	0,1	jul-93	-0,8	abr-04	-2,1
feb-72	-4,8	nov-82	0,5	ago-93	-1,3	may-04	-2,7
mar-72	-3,8	dic-82	0,5	sep-93	-2,1	jun-04	-2,6
abr-72	-3,4	ene-83	0,6	oct-93	-1,9	jul-04	-4,3
may-72	-3,7	feb-83	0,6	nov-93	-1,2	ago-04	-3,9
jun-72	-3,2	mar-83	0,5	dic-93	-1,4	sep-04	-3,2
jul-72	-2,7	abr-83	0,9	ene-94	-1,6	oct-04	-2,6
ago-72	-2,7	may-83	1,2	feb-94	-1,3	nov-04	-1,6
sep-72	-2,5	jun-83	0,6	mar-94	-1,5	dic-04	-0,4
oct-72	-2,1	jul-83	0,8	abr-94	-1,7	ene-05	0,4
nov-72	-1,5	ago-83	0,5	may-94	-1,4	feb-05	0,4
dic-72	-0,8	sep-83	0,1	jun-94	-1,5	mar-05	0,4
ene-73	0,7	oct-83	-0,2	jul-94	-1,9	abr-05	0,9
feb-73	0,9	nov-83	0,1	ago-94	-2,2	may-05	0,7
mar-73	1,4	dic-83	-0,8	sep-94	-2,0	jun-05	0,6
abr-73	2,2	ene-84	-0,3	oct-94	-1,6	jul-05	-0,1
may-73	1,6	feb-84	-0,1	nov-94	-1,1	ago-05	-0,7
jun-73	2,9	mar-84	0,3	dic-94	-1,9	sep-05	-0,5
jul-73	2,5	abr-84	0,2	ene-95	-1,5	oct-05	-0,8
ago-73	2,1	may-84	0,0	feb-95	-1,3	nov-05	-0,5
sep-73	1,4	jun-84	0,2	mar-95	-1,0	dic-05	-0,3
oct-73	1,6	jul-84	-0,4	abr-95	-1,2	ene-06	-0,7
nov-73	2,0	ago-84	-0,5	may-95	-1,6	feb-06	-1,3
dic-73	1,9	sep-84	-0,2	jun-95	-1,8	mar-06	-1,3
ene-74	3,0	oct-84	0,4	jul-95	-1,6	abr-06	-1,9
feb-74	4,8	nov-84	0,7	ago-95	-1,4	may-06	-2,7
mar-74	4,8	dic-84	-0,2	sep-95	-1,1	jun-06	-1,9
abr-74	4,8	ene-85	0,3	oct-95	-1,3	jul-06	-2,5
may-74	4,5	feb-85	0,4	nov-95	-1,2	ago-06	-2,9
jun-74	3,4	mar-85	0,5	dic-95	-2,2	sep-06	-3,4
jul-74	2,9	abr-85	1,2	ene-96	-1,8	oct-06	-2,5
ago-74	2,6	may-85	1,3	feb-96	-0,3	nov-06	-2,3

sep-74	2,3	jun-85	1,2	mar-96	-0,1	dic-06	-2,7
oct-74	2,0	jul-85	1,0	abr-96	-0,1	ene-07	-1,9
nov-74	0,9	ago-85	1,2	may-96	-0,7	feb-07	-2,4
dic-74	0,4	sep-85	1,6	jun-96	-1,2	mar-07	-2,0
ene-75	-0,1	oct-85	1,8	jul-96	-1,7	abr-07	-1,6
feb-75	-0,3	nov-85	1,8	ago-96	-3,1	may-07	-2,2
mar-75	0,4	dic-85	2,1	sep-96	-2,5	jun-07	-2,4
abr-75	0,6	ene-86	1,0	oct-96	-2,2	jul-07	-2,7
may-75	0,6	feb-86	0,0	nov-96	-1,8	ago-07	-2,8
jun-75	0,8	mar-86	1,2	dic-96	-1,5	sep-07	-2,2
jul-75	-0,5	abr-86	1,6	ene-97	-2,1	oct-07	-1,9
ago-75	-0,4	may-86	1,7	feb-97	-1,6	nov-07	-2,2
sep-75	-0,2	jun-86	2,6	mar-97	-2,1	dic-07	-1,7
oct-75	-0,4	jul-86	2,5	abr-97	-2,4	ene-08	-1,6
nov-75	0,0	ago-86	2,4	may-97	-2,7	feb-08	-1,9
dic-75	-1,1	sep-86	3,3	jun-97	-2,8	mar-08	-2,5
ene-76	-1,0	oct-86	4,0	jul-97	-3,1	abr-08	-3,6
feb-76	-1,4	nov-86	4,5	ago-97	-3,5	may-08	-4,3
mar-76	-1,5	dic-86	4,5	sep-97	-3,6	jun-08	-4,4
abr-76	-2,6	ene-87	4,5	oct-97	-3,2	jul-08	-4,8
may-76	-3,2	feb-87	3,1	nov-97	-2,8	ago-08	-4,9
jun-76	-3,4	mar-87	2,3	dic-97	-3,0	sep-08	-4,4
jul-76	-3,7	abr-87	2,5	ene-98	-2,7	oct-08	-3,7
ago-76	-4,0	may-87	1,9	feb-98	-1,9	nov-08	-3,9
sep-76	-4,0	jun-87	1,0	mar-98	-1,7	dic-08	-4,9
oct-76	-3,6	jul-87	1,1	abr-98	-1,6	ene-09	-4,4
nov-76	-3,8	ago-87	0,8	may-98	-2,3	feb-09	-3,7
dic-76	-3,8	sep-87	1,0	jun-98	-2,1	mar-09	-4,1
ene-77	-3,1	oct-87	1,0	jul-98	-2,2	abr-09	-4,8
feb-77	-3,1	nov-87	1,2	ago-98	-2,2	may-09	-4,9
mar-77	-2,5	dic-87	0,3	sep-98	-2,5	jun-09	-5,2
abr-77	-2,2	ene-88	0,3	oct-98	-2,1	jul-09	-5,4
may-77	-2,0	feb-88	-0,1	nov-98	-1,6	ago-09	-5,3
jun-77	-2,2	mar-88	-0,5	dic-98	-1,8	sep-09	-5,4
jul-77	-2,3	abr-88	-0,5	ene-99	-1,0		
ago-77	-2,1	may-88	-1,2	feb-99	-0,8		
sep-77	-2,4	jun-88	-1,7	mar-99	-0,3		

Tabla 8.6. Valores de PDSI para Las Breñas

## 8.1.3 Santiago del Estero

AWC	13,1
Amax	472
CC	232
MP	127
CC-MP	105
AWCs	1,0
AWCu	12,1
AWCs	1,0
AWCu	12,1

Tabla 8.7. Parámetros del suelo para Santiago del Estero

Mes	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$k'$
Enero	0,50	0,12	0,00	0,12	0,79
Febrero	0,74	0,07	0,07	0,23	0,90
Marzo	0,65	0,07	0,00	0,23	0,91
Abril	0,70	0,01	0,00	0,37	1,51
Mayo	0,50	0,00	0,00	0,34	1,31
Junio	0,35	0,00	0,00	0,31	1,98
Julio	0,40	0,00	0,00	0,43	1,12
Agosto	0,15	0,00	0,00	0,37	1,99
Septiembre	0,11	0,00	0,00	0,25	2,23
Octubre	0,19	0,01	0,00	0,16	1,32
Noviembre	0,32	0,02	0,00	0,15	1,16
Diciembre	0,42	0,05	0,00	0,11	0,95

Tabla 8.8. Coeficientes del método para Santiago del estero

Fecha	PDSI	Fecha	PDSI	Fecha	PDSI	Fecha	PDSI
ene-61	0,2	abr-73	-0,2	jul-85	-2,3	oct-97	-1,1
feb-61	-0,2	may-73	-1,7	ago-85	-2,0	nov-97	-0,3
mar-61	0,0	jun-73	-0,4	sep-85	-1,9	dic-97	0,8
abr-61	0,3	jul-73	-0,9	oct-85	-1,1	ene-98	1,0
may-61	0,4	ago-73	-0,8	nov-85	-0,7	feb-98	1,4
jun-61	0,1	sep-73	-0,7	dic-85	0,2	mar-98	1,5
jul-61	-0,1	oct-73	-0,7	ene-86	0,4	abr-98	0,4
ago-61	0,0	nov-73	-0,2	feb-86	0,1	may-98	-0,7

sep-61	0,1	dic-73	0,2	mar-86	-1,1	jun-98	-0,8
oct-61	0,9	ene-74	1,4	abr-86	-1,2	jul-98	-1,1
nov-61	0,8	feb-74	4,2	may-86	-1,4	ago-98	-0,6
dic-61	1,0	mar-74	4,7	jun-86	-1,4	sep-98	-0,7
ene-62	-0,8	abr-74	3,9	jul-86	-1,8	oct-98	-0,1
feb-62	-2,1	may-74	3,9	ago-86	-1,5	nov-98	0,0
mar-62	-2,8	jun-74	3,0	sep-86	-0,8	dic-98	-0,1
abr-62	-3,8	jul-74	2,7	oct-86	-1,2	ene-99	1,2
may-62	-3,8	ago-74	2,6	nov-86	-0,3	feb-99	1,3
jun-62	-4,0	sep-74	2,6	dic-86	-0,7	mar-99	1,7
jul-62	-4,3	oct-74	2,6	ene-87	-0,3	abr-99	0,4
ago-62	-4,0	nov-74	2,0	feb-87	-2,5	may-99	-0,2
sep-62	-3,4	dic-74	1,6	mar-87	-2,1	jun-99	-0,1
oct-62	-3,3	ene-75	1,4	abr-87	-2,0	jul-99	-0,4
nov-62	-3,3	feb-75	1,1	may-87	-2,2	ago-99	-0,6
dic-62	-2,3	mar-75	0,7	jun-87	-2,4	sep-99	-0,4
ene-63	-1,9	abr-75	-0,1	jul-87	-3,2	oct-99	0,8
feb-63	-1,2	may-75	-0,8	ago-87	-3,3	nov-99	1,0
mar-63	-0,6	jun-75	-1,3	sep-87	-2,9	dic-99	1,2
abr-63	-2,4	jul-75	-1,2	oct-87	-2,3	ene-00	2,1
may-63	-2,0	ago-75	-1,1	nov-87	-1,6	feb-00	2,3
jun-63	-1,8	sep-75	-0,4	dic-87	-1,0	mar-00	2,6
jul-63	-1,7	oct-75	-0,7	ene-88	-1,3	abr-00	2,5
ago-63	-1,9	nov-75	-0,4	feb-88	-1,2	may-00	2,3
sep-63	-1,6	dic-75	-0,5	mar-88	-2,1	jun-00	2,2
oct-63	-1,5	ene-76	0,1	abr-88	-3,2	jul-00	1,9
nov-63	-0,5	feb-76	0,6	may-88	-3,4	ago-00	1,8
dic-63	-0,8	mar-76	0,8	jun-88	-3,4	sep-00	1,8
ene-64	-1,6	abr-76	-1,5	jul-88	-4,0	oct-00	2,2
feb-64	-1,2	may-76	-1,8	ago-88	-4,0	nov-00	3,2
mar-64	-1,2	jun-76	-2,0	sep-88	-3,5	dic-00	3,7
abr-64	-2,1	jul-76	-2,8	oct-88	-3,4	ene-01	3,5
may-64	-1,9	ago-76	-2,8	nov-88	-3,6	feb-01	3,1
jun-64	-2,4	sep-76	-2,4	dic-88	-4,3	mar-01	2,8
jul-64	-2,7	oct-76	-2,0	ene-89	-4,8	abr-01	2,9
ago-64	-2,9	nov-76	-1,3	feb-89	-6,2	may-01	2,4
sep-64	-2,0	dic-76	-1,6	mar-89	-5,8	jun-01	2,4
oct-64	-1,2	ene-77	-0,7	abr-89	-6,4	jul-01	2,2
nov-64	-1,5	feb-77	-0,1	may-89	-5,5	ago-01	2,1
dic-64	-1,7	mar-77	0,0	jun-89	-4,6	sep-01	3,2
ene-65	-0,8	abr-77	1,7	jul-89	-5,0	oct-01	3,5

feb-65	-1,6	may-77	1,2	ago-89	-4,7	nov-01	4,1
mar-65	-1,3	jun-77	0,9	sep-89	-3,9	dic-01	4,2
abr-65	-2,6	jul-77	0,5	oct-89	-3,2	ene-02	4,3
may-65	-2,9	ago-77	1,0	nov-89	-2,7	feb-02	4,4
jun-65	-2,5	sep-77	1,2	dic-89	-0,7	mar-02	4,6
jul-65	-3,0	oct-77	1,2	ene-90	-1,5	abr-02	3,4
ago-65	-2,7	nov-77	0,5	feb-90	-0,1	may-02	3,4
sep-65	-2,4	dic-77	0,8	mar-90	-1,1	jun-02	3,2
oct-65	-2,2	ene-78	1,0	abr-90	-0,3	jul-02	2,3
nov-65	-2,1	feb-78	-0,8	may-90	-0,7	ago-02	1,9
dic-65	-1,6	mar-78	-1,2	jun-90	-0,9	sep-02	1,8
ene-66	-1,4	abr-78	-2,9	jul-90	-1,8	oct-02	3,8
feb-66	-1,6	may-78	-3,4	ago-90	-1,3	nov-02	4,1
mar-66	-2,5	jun-78	-3,5	sep-90	-1,0	dic-02	4,6
abr-66	-2,3	jul-78	-3,5	oct-90	-0,8	ene-03	4,4
may-66	-2,8	ago-78	-3,3	nov-90	-1,9	feb-03	3,3
jun-66	-2,9	sep-78	-2,5	dic-90	-1,1	mar-03	4,0
jul-66	-3,6	oct-78	-1,7	ene-91	-0,9	abr-03	3,7
ago-66	-3,4	nov-78	-1,2	feb-91	-2,5	may-03	3,0
sep-66	-2,9	dic-78	-0,7	mar-91	-1,0	jun-03	2,7
oct-66	-2,6	ene-79	-1,2	abr-91	-1,3	jul-03	2,4
nov-66	-1,6	feb-79	-0,1	may-91	-1,4	ago-03	2,2
dic-66	-1,6	mar-79	-1,7	jun-91	-1,2	sep-03	2,3
ene-67	-1,3	abr-79	-1,2	jul-91	-2,1	oct-03	2,5
feb-67	-0,9	may-79	-1,9	ago-91	-2,3	nov-03	1,7
mar-67	-1,8	jun-79	-2,1	sep-91	-1,8	dic-03	2,0
abr-67	-2,5	jul-79	-2,9	oct-91	-1,1	ene-04	2,0
may-67	-2,8	ago-79	-3,0	nov-91	-1,6	feb-04	0,8
jun-67	-3,0	sep-79	-2,1	dic-91	-0,8	mar-04	-0,2
jul-67	-3,0	oct-79	-1,9	ene-92	-0,3	abr-04	-1,1
ago-67	-2,8	nov-79	-1,4	feb-92	0,5	may-04	-0,8
sep-67	-1,8	dic-79	0,0	mar-92	-0,1	jun-04	-1,2
oct-67	-2,0	ene-80	-1,0	abr-92	0,2	jul-04	-1,6
nov-67	-1,7	feb-80	-0,7	may-92	0,0	ago-04	-2,0
dic-67	-2,7	mar-80	0,2	jun-92	-0,1	sep-04	-1,7
ene-68	-1,3	abr-80	-0,7	jul-92	-1,0	oct-04	-1,8
feb-68	-2,5	may-80	-1,0	ago-92	-0,5	nov-04	-1,3
mar-68	-2,1	jun-80	-1,1	sep-92	-0,2	dic-04	-1,5
abr-68	-3,1	jul-80	-1,5	oct-92	0,0	ene-05	-2,3
may-68	-3,0	ago-80	-1,5	nov-92	0,3	feb-05	-2,0
jun-68	-2,5	sep-80	-0,9	dic-92	1,2	mar-05	-1,5

jul-68	-2,5	oct-80	-0,1	ene-93	1,6	abr-05	-1,1
ago-68	-1,5	nov-80	2,0	feb-93	-0,2	may-05	-1,6
sep-68	-1,2	dic-80	2,2	mar-93	-1,2	jun-05	-1,2
oct-68	-0,7	ene-81	2,9	abr-93	-0,7	jul-05	-2,1
nov-68	-1,0	feb-81	2,9	may-93	-1,4	ago-05	-2,3
dic-68	0,0	mar-81	2,4	jun-93	-1,2	sep-05	-1,8
ene-69	-1,2	abr-81	2,2	jul-93	-2,0	oct-05	-1,5
feb-69	-0,3	may-81	1,7	ago-93	-2,0	nov-05	-1,3
mar-69	-1,4	jun-81	1,4	sep-93	-1,7	dic-05	-1,1
abr-69	-1,6	jul-81	1,0	oct-93	-1,6	ene-06	-1,0
may-69	-1,2	ago-81	0,6	nov-93	-1,4	feb-06	-1,9
jun-69	-1,5	sep-81	0,5	dic-93	-1,4	mar-06	-1,8
jul-69	-1,8	oct-81	0,0	ene-94	-1,4	abr-06	-1,4
ago-69	-1,7	nov-81	0,9	feb-94	-1,5	may-06	-1,9
sep-69	-1,5	dic-81	0,5	mar-94	-3,0	jun-06	-1,7
oct-69	-1,7	ene-82	-0,1	abr-94	-2,5	jul-06	-2,5
nov-69	-1,0	feb-82	-0,7	may-94	-2,6	ago-06	-2,2
dic-69	-0,7	mar-82	0,2	jun-94	-2,7	sep-06	-1,9
ene-70	-0,5	abr-82	0,6	jul-94	-3,4	oct-06	-1,5
feb-70	-1,2	may-82	-0,5	ago-94	-3,5	nov-06	-0,9
mar-70	-0,4	jun-82	-0,4	sep-94	-3,0	dic-06	-1,4
abr-70	-2,3	jul-82	-0,7	oct-94	-1,8	ene-07	0,3
may-70	-1,2	ago-82	-0,8	nov-94	-1,4	feb-07	-0,3
jun-70	-1,2	sep-82	0,6	dic-94	-1,0	mar-07	-0,5
jul-70	-1,7	oct-82	0,4	ene-95	-0,9	abr-07	-1,2
ago-70	-1,8	nov-82	1,0	feb-95	-1,3	may-07	-1,0
sep-70	-0,8	dic-82	2,0	mar-95	-0,8	jun-07	-1,1
oct-70	-1,3	ene-83	2,7	abr-95	-3,4	jul-07	-1,9
nov-70	-0,5	feb-83	2,3	may-95	-2,8	ago-07	-2,1
dic-70	-0,7	mar-83	1,9	jun-95	-2,9	sep-07	-1,7
ene-71	0,0	abr-83	0,7	jul-95	-3,6	oct-07	-1,1
feb-71	0,6	may-83	0,4	ago-95	-3,7	nov-07	-1,6
mar-71	0,0	jun-83	-0,1	sep-95	-3,1	dic-07	-1,2
abr-71	-0,6	jul-83	-0,8	oct-95	-2,7	ene-08	-0,3
may-71	-1,6	ago-83	-0,8	nov-95	-2,4	feb-08	-0,2
jun-71	-1,8	sep-83	-0,7	dic-95	-2,3	mar-08	1,0
jul-71	-2,5	oct-83	0,2	ene-96	-1,4	abr-08	1,1
ago-71	-2,4	nov-83	0,2	feb-96	-0,9	may-08	0,5
sep-71	-1,9	dic-83	0,6	mar-96	-1,4	jun-08	-0,2
oct-71	-1,1	ene-84	1,0	abr-96	-1,1	jul-08	-0,4
nov-71	-0,6	feb-84	0,2	may-96	-0,2	ago-08	-0,3

dic-71	-2,0	mar-84	0,8	jun-96	-1,4	sep-08	-0,1
ene-72	-1,9	abr-84	-0,8	jul-96	-1,6	oct-08	0,0
feb-72	-2,7	may-84	-1,1	ago-96	-1,7	nov-08	0,1
mar-72	-3,0	jun-84	-0,7	sep-96	-0,7	dic-08	0,4
abr-72	-2,8	jul-84	-1,3	oct-96	-1,0	ene-09	0,6
may-72	-2,8	ago-84	-1,4	nov-96	0,8	feb-09	1,0
jun-72	-2,8	sep-84	-0,9	dic-96	1,0	mar-09	1,3
jul-72	-3,5	oct-84	-0,9	ene-97	1,0	abr-09	0,7
ago-72	-3,3	nov-84	-0,5	feb-97	1,7	may-09	0,2
sep-72	-2,4	dic-84	-0,5	mar-97	1,6	jun-09	0,0
oct-72	-2,2	ene-85	-0,2	abr-97	-0,6	jul-09	-0,1
nov-72	-1,9	feb-85	-0,2	may-97	-1,7	ago-09	0,0
dic-72	-1,5	mar-85	-1,2	jun-97	-1,4	sep-09	0,0
ene-73	-0,8	abr-85	-1,4	jul-97	-1,3	oct-09	-0,2
feb-73	-2,8	may-85	-1,6	ago-97	-1,2		
mar-73	-1,2	jun-85	-1,8	sep-97	-0,7		

Tabla 8.9. Valores de PDSI para Santiago del Estero

## 8.2 Valores medios regionales de NDVI y NDWI

En este punto se presentan los resultados numéricos de los valores medios regionales y los respectivos desvíos estándares de los índices calculados en el punto 5 (Tabla (8.10)).

Fecha	NDVI	Desvío Estándar	NDWI	Desvío Estándar
12-Jan-2001	0,55	0,079	0,42	0,129
10-Mar-2001	0,59	0,076	0,51	0,094
18-Apr-2001	0,56	0,073	0,54	0,114
28-Jul-2001	0,41	0,073	0,22	0,163
9-Oct-2001	0,48	0,088	0,27	0,170
30-oct-01	0,56	0,088	0,45	0,165
8-Jan-2002	0,54	0,070	0,42	0,123
4-Feb-2002	0,58	0,051	0,55	0,081
10-May-2002	0,57	0,069	0,54	0,120
21-Sep-2002	0,47	0,080	0,36	0,135
26-Oct-2002	0,49	0,079	0,46	0,155

11-nov-02	0,56	0,100	0,45	0,162
13-Jan-2003	0,57	0,074	0,58	0,094
9-Mar-2003	0,56	0,077	0,54	0,095
21-Apr-2003	0,53	0,063	0,58	0,064
24-May-2003	0,51	0,100	0,42	0,172
31-Jul-2003	0,35	0,061	0,26	0,136
15-Oct-2003	0,46	0,100	0,28	0,155
13-Nov-2003	0,51	0,092	0,39	0,144
1-Jan-2004	0,55	0,116	0,46	0,193
6-Feb-2004	0,54	0,090	0,46	0,140
7-May-2004	0,52	0,072	0,46	0,117
31-Jul-2004	0,33	0,074	0,11	0,137
14-Oct-2004	0,40	0,073	0,20	0,130
21-Nov-2004	0,51	0,104	0,34	0,173
15-Dec-2004	0,51	0,091	0,38	0,149
5-Jan-2005	0,56	0,096	0,47	0,159
15-Feb-2005	0,54	0,080	0,43	0,128
29-Apr-2005	0,55	0,074	0,49	0,122
20-Jul-2005	0,42	0,076	0,27	0,160
11-Oct-2005	0,36	0,069	0,12	0,111
31-oct-05	0,37	0,074	0,14	0,108
8-Jan-2006	0,51	0,096	0,34	0,152
16-Feb-2006	0,53	0,105		
9-Mar-2006	0,51	0,084	0,39	0,148
19-Jul-2006	0,45	0,084	0,25	0,154
13-Oct-2006	0,41	0,085	0,29	0,146
12-Nov-2006	0,49	0,102	0,31	0,165
1-Jan-2007	0,47	0,086	0,38	0,154
11-Feb-2007	0,57	0,047	0,56	0,085
27-Apr-2007	0,56	0,061	0,48	0,095
19-Jul-2007	0,31	0,060	0,16	0,108
19-Oct-2007	0,38	0,118	0,12	0,170
07-nov-07	0,48	0,120	0,31	0,202
7-Jan-2008	0,49	0,104	0,35	0,174
12-Feb-2008	0,54	0,083	0,43	0,120
2-May-2008	0,43	0,085	0,35	0,142
17-Jul-2008	0,26	0,053	0,04	0,109
9-Oct-2008	0,29	0,067	0,04	0,106
17-Nov-2008	0,46	0,114	0,24	0,184
5-Jan-2009	0,43	0,111	0,19	0,175
13-Feb-2009	0,59	0,087	0,43	0,160

2-Apr-2009	0,45	0,070	0,40	0,134
3-May-2009	0,42	0,072	0,24	0,135
24-Jul-2009	0,30	0,058	0,07	0,119
30-Aug-2009	0,25	0,045	-0,01	0,087
12-Oct-2009	0,27	0,058	-0,02	0,094

Tabla 8.10. Valores medios regionales de NDVI y NDWI.

## **9. GLOSARIO**

- APA: “Administración Provincial de Agua” – Provincia del Chaco
- Amax = Capacidad de almacenamiento máximo del suelo (mm)
- AWC = Agua Útil (mm)
- AWCs = Agua útil del estrato superior (mm)
- AWCu = Agua útil del estrato inferior (mm)
- CC = Capacidad de Campo (mm)
- CMI: “Índice de Humedad de Cultivos”
- D: “Diferencia entre la precipitación real y la característica P<sup>^</sup>”
- EVI: “Enhance Vegetation Index”
- ET: “evapotranspiración real”
- ETo: “evapotranspiración de referencia”
- Ha: “ hectáreas”
- INTA: “Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria”
- IV: “Índice de vegetación”
- K: “característica climática del método PDSI”
- KT: “coeficiente empírico utilizado en la ecuación de Hargreaves – Samani”
- k’: “aproximación de las características climáticas del método PDSI”
- L: “Pérdida”
- LST: “temperatura de superficie” (Land Surface temperatura)
- MP = Marchitez permanente (mm)
- NDVI: “Normalized Difference Vegetation Index”
- NDWI: “Normalized Difference Water Index”

- NIR: “Infrarojo cercano dentro del espectro electromagnético”
- PDSI: “Índice de Severidad de Sequía de Palmer”
- PE: “Evapotranspiración potencial”
- PL: “Pérdida potencial”
- PPN: “Porcentaje de Precipitación Normal”
- PR: “recarga potencial”
- P<sup>^</sup>: “precipitación característica del método PDSI”
- R: “Recarga”
- Ra: “Radiación extraterrestre”
- Red: “longitud del rojo dentro del espectro electromagnético”
- RO: “escurrimiento”
- Rs: “Radiación solar global
- SC-PDSI “Índice de Severidad de Sequía de Palmer autocalibrado” (self-calibrating Palmer drought severity index)
- SMA: “Spectral Mixture Analysis”
- SPI: “Índice Estandarizado de Precipitación” (Standar Precipitation Index)
- SWIR: “infrarojomedio dentro del espectro electromagnético”
- TC: “temperatura media diaria”
- TD: “Diferencia entre los promedios diarios de temperatura máxima y mínima”
- VCI: “Vegetation Condition Index”
- X:”valor de PDSI”
- Z: “Índice de anomalía de humedad”
- $\alpha$ : “Coeficiente de esorrentía del método PDSI”
- $\beta$ : “Coeficiente de recarga del método PDSI”

- $\delta$ : “Coeficiente de pérdida del método PDSI”
- $\gamma$ : “Coeficiente de escurrimiento del método PDSI”
- $\Gamma$ : “Reflectancia”

## **10. BIBLIOGRAFÍA**

- Administración Provincial del Agua, Estudios Básicos, Anuario de Precipitaciones de la Provincia del Chaco 1956 – 2010, 2010
- Administración Provincial del Agua, Provincia del Chaco - [www.ecomchaco.com.ar/APA](http://www.ecomchaco.com.ar/APA).
- Allen, R. G., 1996 – Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation – Journal of Irrigation Drainage Eng. 122(2), 97-106.
- Alley, W. M., 1984 - The Palmer Drought Severity Index: limitations and assumptions – journal of climate and applied meteorology, 23. Pg 1100 – 1109.
- American Meteorological Society, 2003, Bull. Amer. Met. Soc., 85 - <http://www.ametsoc.org/policy/droughstatementfinal0304.html>
- Anderson, L. O., Malhi, Y., Aragao L., Saatchi, S., 2007: Spatial patterns of the canopy stress during 2005 drought in Amazonia.
- Área Estudios Básicos, APA, 2004: Zonificación de Riesgo Hídrico Agropecuario – Primera etapa Dorsal Agrícola Chaqueña.
- Bautista, F., Bautista, D., Delgado – Carranza, C., 2009 – Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potencial evapotranspiration in semi – arid and subhumid tropical climates for regional applications, *Atmósfera* 22 (4). Pg. 331 – 348.
- Caparrini, F., Manzella, F., 2009: Hydrometeorological and vegetation indices for the drought monitoring system in Tuscany Region, Italy – *Advances in Geosciences*, 17, 105-110, 2009.
- Chandrasekar, K., Sessa Sai, M. V. R., roy, P. S., Dwevedi, R. S., 2008: Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index

- Product - international journal of remote sensing – vol. 31, No. 15, August 2010, 3987-4005.
- Chuvieco, E., 2002: Teledetección Ambiental – Editorial Ariel.
  - Crean (Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales) – Universidad Nacional de Córdoba.
  - Dirección de Estudios Hídricos, Administración Provincial del Agua (APA) – Provincia del Chaco, Argentina, 2009: Informe interno: E24-2009-1621/A — [www.ecomchaco.com.ar/APA](http://www.ecomchaco.com.ar/APA).
  - Elmore, A. J., Mustard, J. F., Manning, S. J., 2000: “Quantifying Vegetation Change in Semiarid Environments: Precision and Accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Vegetation Index” – Remote Sensing of Environment 73, 87-102.
  - Fernández Larrañaga, B., 1997 – Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile Central – Ingeniería del Agua, vol. 4, num. 4. Pg. 37 – 46.
  - Gao, B. C, 1996: NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from space.
  - García, S. G., Baille, A., González, M. M., Martínez, V., Urrea, M., Hernández, Z., Nortes, P., Tanguy, M., 2007: “Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS” – Teledetección – Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional, Ed. Martin, 2007, ISBN: 978-987-543-126-3.
  - Gu, Y, Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B, 2007: A five-year of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States - GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 34, L06407, doi:10.1029/2006GL029127.

- Heim, R. R., 2002: “A review of twentieth-century drought indices used in the United States, Bulletin of the American Meteorological Society, 84, 1149 – 1165.
- <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., Ferreira, L. G., 2002: “Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices” – Remote Sensing of Environment 83 (2002) 195-213
- INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – [www.inta.gov.ar](http://www.inta.gov.ar).
- Jiang, L., & Islam, S. (2001). Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. - Water Resources Research, 37(2), 329-340. - In review at Canadian Journal of Remote Sensing.
- Jae-Dong Jang (2004). Evaluation of thermal-water stress of forest in southern Québec from satellite images. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l’Université Laval dans le cadre du programme de doctorat en Sciences géomatiques pour l’obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.). FACULTÉ DE FORESTRIE ET DE GÉOMATIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC.
- Krepper C. y Venturini V. La plata Basin Vulnerability: analysis of large water excess/shortage events. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 21 al 24 de Septiembre 2010. Azul- Prov. Buenos Aires – Argentina.
- Kogan, F., Gitelson, A., Zakarin, E., Spivak, L., Lebed, L., 2003: “AVHRR-Based Spectral Vegetation Index for Quantitative Assessment of Vegetation State and Productivity: Calibration and Validation” – Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 69, No. 8, August 2003, pp. 899-906.
- Minetti, J. L., Vargas, W. M., Poblete, A. G., Bobba, M. E., 2010. Regional Drought in the Southern of South America – Physical Aspects – Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.1, 88-102,2010

- Nicholson, S. E., Davenport, M. L., Malo, A. R., 1990: “A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR” – Climatic Change December 1990.
- Nicholson, S. E., Tucker, C. J., Ba, M. B., 1998: “Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An example from West African Sahel” – Bulletin of the American Meteorological Society
- Palmer, W. C., 1965: Meteorological Drought – Research Paper N° 45 – US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Guo, Q., Henderson, M., Ji, W., Li, Y., Tao, S., 2003: Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999 - JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 108, NO. D14, 4401, doi:10.1029/2002JD002848, 2003
- Rahimzadeh Bajgiran, P., Shimizu, Y., Hosol, F., Omasa, K., 2009: Modis vegetation and water index for drought assessment in semi-arid ecosystems of Iran – J. Agric. Meteorol. 65 (4): 349-355, 2009.
- Sacchi, O., Coronel, A., Constanzo M., 2008: “Compaación entre el Índice de Severidad de Sequía de Palmer original y el Autocalibrado en el sur Santafesino” – Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias, Número XIII.
- Samani, Z., 2000 - Estimati solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data, urnal of Irrigation and Drainage Engineering. Pg 126 – 265.
- Schott, J. R., 2007: Remote sensing – The image chain approach – 2<sup>nd</sup> Edition – Oxford University press – ISBN: 978-0-19-517817-3.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca ([www.siaa.gov.ar](http://www.siaa.gov.ar)).

- Song, D., Guo, P., Sheng, H., 2008: Spatial Distribution Patterns of MODIS-NDVI and correlation between NDVI and Meteorology Factors in Shandong Province in China - PIERS ONLINE, VOL. 4, NO. 2, 2008
- Szymula, J. P., Venturini, V., Krepper, C., 2010: Uso del Índice de Palmer para determinar períodos de sequía en el Noreste argentino - I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 21 al 24 de Septiembre 2010. Azul- Prov. Buenos Aires – Argentina.
- Szymula, J. P., Venturini, V., 2011: “Utilización de índices de vegetación para el monitoreo de sequías en el noreste argentino” – I Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Resistencia, Chaco.
- Valiente, O. M., 2001 – Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación Investigaciones Geográficas n° 26. Pg. 59 – 80.
- Venturini, V., Girolimetto, D., Rivas, R., 2010: “Uso conjunto de imágenes infrarrojas térmicas y de microondas para determinar emisividad de la superficie” - I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. 21 al 24 de Septiembre 2010. Azul- Prov. Buenos Aires – Argentina.
- Wang, J, Price, K. P., Rich, P. M., 2000: Spatial Patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the Central Great Plains - international journal of remote sensing, 2001, vol. 22, no. 18, 3827–3844
- Wells, N., Goddard S., Hayes M. J., 2004 . A Self Calibrating Palmer Drought Severity Index, *journal of climate* 17. Pg. 2335-2351.