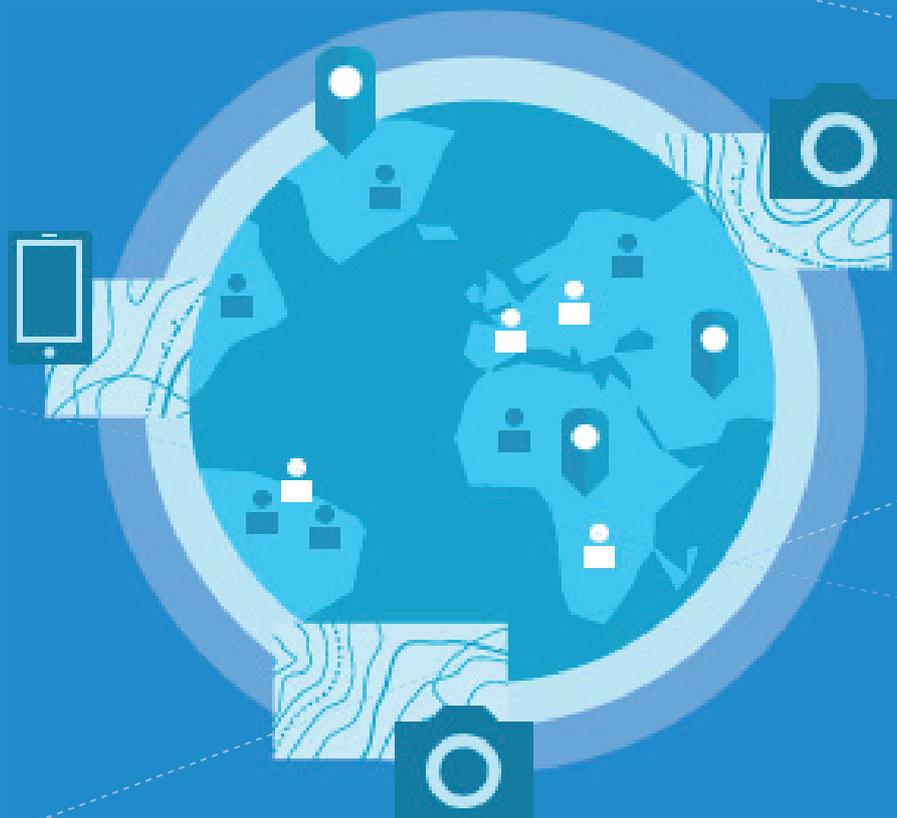


# día SIG

Miércoles 18 de noviembre de 2015, 9hs.

Sala anexa al Paraninfo de la UNSE

Av. Belgrano (s) 1912



ISSN : 2469-0856

Organizado por:

**SIGL@b**  
Cátedra de Sistemas  
de Información Geográfica



**FACULTAD DE  
CIENCIAS FORESTALES**  
Ing. Néstor René Ledesma



**UNSE**  
Universidad Nacional  
de Santiago del Estero

# Índice

1. Población y recurso hídrico en el departamento Figueroa, Santiago del Estero (Argentina), análisis mediante Sistemas de Información Geográfica <i>Andrea Ros Candeira</i>	p. 1-11
2. Utilización de índice de vegetación en la evaluación de un bosque nativo sometido a una limpieza química aérea para el control de arbustivas (La Paz, Entre Ríos) <i>Julián Alberto Sabattini y Rafael Alberto Sabattini</i>	p. 12-19
3. NDVI MODIS de sistemas pastoriles de <i>Panicum maximum</i> y su variación ante anomalías de precipitación media en el Dpto. Moreno, Santiago del Estero, Argentina <i>José Luis Tiedemann</i>	p. 20-29
4. Compendio de Algunas Aplicaciones de los SIG a la Determinación de Parámetros Útiles para la Modelización Hidrológica <i>Jorge Prieto Villarroya, Hector Daniel Farias</i>	p. 30-40
5. Aplicación de Sistemas de Información Geográfica al Estudio de la Evolución Morfológica de Ríos de Llanura <i>Hector Daniel Farias, Jorge Prieto Villarroya, Alfredo Fabián Reuter, Lucas Gerardo Domínguez</i>	p. 41-50
6. Evaluación de emergencias ambientales mediante el uso de la percepción remota y los SIG: las inundaciones del año 2015 en el sudeste de la provincia de Santiago del Estero <i>Hugo Raúl Zerda</i>	p. 51-59
7. Estudio mediante percepción remota y SIG de los patrones espaciales de deforestación en los departamentos: Moreno y Figueroa de la provincia de Santiago del Estero, Argentina. <i>Maria Yisell Mazur, Hugo Raul Zerda</i>	p. 60-70

# **Población y recurso hídrico en el departamento Figueroa, Santiago del Estero (Argentina), análisis mediante Sistemas de Información Geográfica**

Andrea Ros Candeira

Graduada en Ciencias Ambientales; Universidad de Vigo (España)

Estudiante de Intercambio en Lic. en Ecología y Conservación del Ambiente; Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero

Contacto: [a.roscaadeira@gmail.com](mailto:a.roscaadeira@gmail.com)

---

## **RESUMEN**

Con el objetivo de alcanzar una mayor comprensión de la situación hidrológica en el departamento Figueroa, el presente trabajo elabora cartografía descriptiva y análisis estadístico de diversas variables ambientales utilizando los Sistemas de Información Geográfica. En concreto, se analiza espacialmente la disponibilidad y el acceso al agua de la población en cuanto a consumo humano y uso para actividades productivas. La contextualización histórica y la evolución de acontecimientos que afectaron al sistema hídrico han dejado huella en la vida de las comunidades, que se han visto obligadas a diversificar sus formas de obtención de agua por necesidad. Actualmente, muchas comunidades continúan sufriendo escasez de agua. Esto no es debido a condiciones climáticas adversas, sino a una deficiente distribución del recurso que afecta tanto a la disponibilidad como al acceso al agua, sumado a otros rasgos que agravan la situación. Palabras clave: población, recurso hídrico, Sistemas de Información Geográfica.

---

## **1. Introducción**

Actualmente, a nivel mundial, la disponibilidad y el acceso al agua es un factor limitante en la vida de muchas comunidades rurales. Esta situación se agrava en zonas semiáridas, donde el recurso hídrico es escaso y, en muchas ocasiones, se hace un mal manejo del mismo. Por esta razón, es esencial generar información sobre la situación hidrológica actual que sirva como apoyo para la planificación y gestión del recurso mismo.

## **2. Objetivos**

General: realizar un estudio de la situación ambiental actual (con énfasis en el recurso hídrico) en el departamento Figueroa utilizando como herramienta de apoyo los Sistemas de Información Geográfica.

Específicos:

- Compilar información geográfica de variables ambientales.
- Realizar análisis espaciales de las variables compiladas en relación al uso del agua.
- Caracterizar el uso actual del agua mediante modelos cartográficos y estadísticos.

## **2. Materiales**

### **2.1. Área de estudio**

#### *2.1.1. Ubicación geográfica*

Figuroa constituye uno de los 27 departamentos que conforman la provincia de Santiago del Estero, situada en la Región del Noroeste Argentino (NOA). El área de estudio abarca las coordenadas 26° 45' - 27° 55' de latitud Sur y 63° 13' - 64° 00' de longitud Oeste, con una superficie total de 6.695 km<sup>2</sup> (INDEC, 2001), lo que representa un 4,9 % del total provincial. El departamento cuenta con un total de 5 comisiones municipales y La Cañada es su cabecera departamental.

#### *2.1.2. Subregión del Chaco Semiárido*

El departamento se encuentra ubicado en la Subregión del Chaco Semiárido. Dentro de sus características climáticas, se puede destacar un promedio anual de precipitaciones aproximado entre 575 - 700 mm y una marcada estacionalidad de las lluvias: la época estival comprende los meses de junio - julio - agosto y la época de mayor precipitación sucede en los meses de diciembre - enero - febrero, coincidiendo además con los registros de mayor temperatura, lo que se expresa en una elevada evapotranspiración potencial (1.500 mm) que acentúa el balance hídrico negativo y tiene un fuerte impacto sobre la disponibilidad de agua. Cuenta con un paisaje homogéneo de relieve llano conformado por geoformas tales como paleocauces, lagunas, salitrales y bañados (Basualdo, 1982).

#### *2.1.3. Hidrología*

El curso de agua superficial de mayor importancia es el río Salado, que atraviesa por su centro al departamento dirección sur-este diagonalmente. Su recorrido por la provincia es de un total de 600 km con un aporte anual aproximado de 448 hm<sup>3</sup> (Basán Nickisch, 2005). El río Salado es de vital importancia, pues proporciona agua para el abastecimiento de poblaciones, para la realización de actividades productivas (riego, abrevado de animales), recursos ictícolas y contribuye a la formación de bañados.

El río ha sufrido el impacto de importantes obras hidráulicas de contención y canalización. En la cuenca alta (provincia de Salta), se encuentra el dique Cabra Corral y El Tunal con sus respectivos presas de aprovechamiento hidroeléctrico y otras obras de canalización como el canal De Dios, De La Patria y Del Desierto. A su paso por el departamento, el río Salado se encuentra con el dique Figuroa y el dique El Cero, que suman una capacidad aproximada de 45 hm<sup>3</sup>. Desde ese punto, el río se canaliza por el canal principal o Ingeniero Gini, construido a partir del dique 40 km rumbo sur.

El caudal de ingreso al sistema de canalizaciones depende de la política de uso del Dique Cabra Corral y es manejado en Santiago del Estero por la Administración Provincial de Recursos Hídricos.

#### *2.1.4. Población*

Figuroa cuenta con una población total de 17.820 habitantes (INDEC, 2010), lo que supone un 2,04 % del total provincial. El departamento presenta en su totalidad población rural, que habita en viviendas distribuidas en áreas rurales agrupadas (25,61 %) y en áreas rurales dispersas (74,39 %), con una densidad demográfica de 2,7

hab/km<sup>2</sup> (INDEC, 2010). Es el departamento de la provincia que presenta el porcentaje más alto de hogares con NBI, concretamente, un 36,97 % (INDEC, 2010). Gran parte de la población del departamento, un 42,65 %, habita dichos hogares. La situación de tenencia de la tierra en la zona es precaria, pues de las 1.681 explotaciones agropecuarias (EAP) existentes en total, 1.472 (87,57 %) son sin límites definidos (CNA, 2002). De éstas últimas, un 90,72% son EAPs campesinas.

Respecto a las actividades productivas que realizan las comunidades, cabe destacar tres: la agrícola, la ganadera y la forestal (poco predominante).

## **2.2. Encuestas de la Secretaría de Agricultura Familiar**

Una parte importante de la base de datos de trabajo provino de las encuestas realizadas por la Subsecretaría de Agricultura Familiar de la Nación Argentina, Delegación Santiago del Estero, provistas al Proyecto "PACTO OTNA 2011 N°0074. *Estructura agraria, áreas de concentración de la agricultura familiar y procesos de expansión de la frontera agropecuaria en Santiago del Estero: aportes para el ordenamiento territorial. 2013-2015*".

Estas encuestas, que acercan información sociodemográfica, socioproductiva y socioeconómica, contribuyeron a la compilación de variables ambientales sobre población, recurso hídrico y actividades productivas de la zona.

## **2.3. Información cartográfica de diversas fuentes**

- Cartas hipsobatimétricas a escala 1:100.000 provenientes del Sistema de Información Geográfica de los Recursos Hídricos de la Provincia Santiago del Estero (SIGeRHSE), Secretaría del Agua - UNSE, FCE, IRHi, año 2014. Ofrecen información detallada de los recursos hídricos en la zona de estudio: sistema de riego, embalses, etc.

- Capas de red vial y cursos de agua disponibles en los archivos shapefile del Instituto Geográfico Nacional SIG250 (2010), Sistema de Información Geográfica a escala 1:250.000

- Archivos shapefile sobre aptitud de suelo y biomas disponibles en *Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero*, C. Angueira y D. Prieto (SigSE 1.0), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), año 2003.

## **2.4. Imágenes satelitales OLI Landsat-8**

Para obtener información sobre la cobertura de agua en la zona de estudio definida, se dispuso de dos imágenes de libre acceso OLI Landsat-8 (resolución espacial 30m, resolución temporal de 16 días, cobertura cada 8 días) de los días 04 y 13 de Enero del año 2014, época post-lluvias.

## **2.5. Softwares empleados**

- QGIS 2.2.0 y gvSIG 1.12: ajuste espacial de datos y uso de diversas herramientas de análisis espacial tanto raster como vectorial.

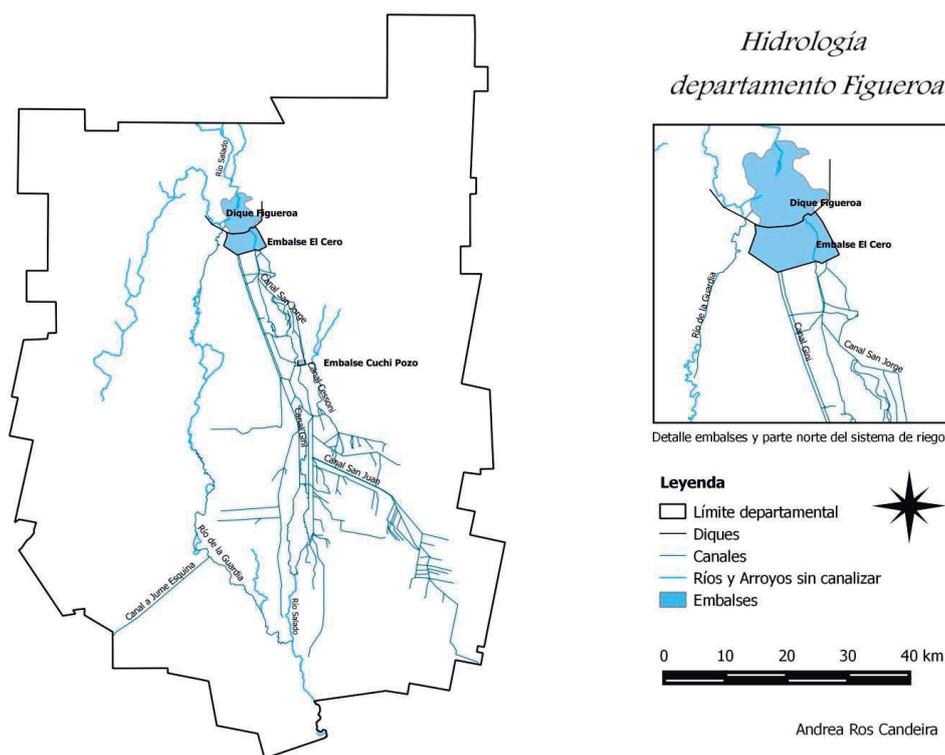
- GeoDa: análisis de autocorrelación espacial de las variables objeto de estudio.

- Microsoft Excel 2010: análisis estadístico y gestión de la base de datos proveniente de las encuestas.

### 3. Metodología

#### 3.1. Gestión y tratamiento de datos espaciales

Se procedió al tratamiento de los datos espaciales obtenidos de diversas fuentes y se elaboró nueva información geográfica de variables ambientales a partir de los materiales mencionados como: digitalización de límite departamental, digitalización de embalses, sistema de canales y represas; capa completa de red vial y capas de caracterización del suelo.



**Mapa 1.** Hidrología del departamento Figueroa, incluye diques, embalses, canales y ríos y arroyos sin canalizar.

También se realizó un tratamiento de la información geográfica proveniente de las encuestas y la matriz final de trabajo quedó constituida por 2.104 registros agrupados en 81 localidades. Los resultados de las variables para cada entidad fueron cuantificados según el número de registros que presentaba cada campo.

**Tabla 1.** Variables y sus respectivas recodificaciones.

Disponibilidad de agua de red	Disponibilidad de agua para consumo humano	Disponibilidad de agua para actividades productivas	Actividades productivas	Población
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 = dato perdido</li> <li>• 1 = si</li> <li>• 2 = no</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 = dato perdido</li> <li>• 1 = perforación</li> <li>• 2 = lluvia</li> <li>• 3 = compra agua</li> <li>• 4 = canal</li> <li>• ≥5 = otra forma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 = riego</li> <li>• 2 = consumo animal</li> <li>• 3 = no dispone de agua</li> <li>• 4 = riego y consumo animal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 = no realiza ninguna actividad</li> <li>• 1 = agricultura y ganadería</li> <li>• 2 = sólo ganadería</li> <li>• 3 = otra actividad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de integrantes de cada NAF (registro)</li> <li>• Número de integrantes por localidad</li> </ul>

### **3.2. Mapas de calor**

Se realizó el análisis de distribución espacial para cada una de las variables mediante la herramienta de mapas de calor para visualizar las zonas que presentaban una alta concentración de los valores correspondientes a cada variable.

### **3.3. Análisis estadístico de variables geográficas**

El análisis se realizó con el software GeoDa mediante diagramas de dispersión para conocer la correlación espacial entre las distintas variables.

### **3.4. Entrevistas**

Este análisis fue complementado con una serie de entrevistas que ayudaron sustancialmente a la interpretación de los resultados desde el punto de vista contextual e histórico. Los entrevistados:

- Pablo Santiago Mansilla, habitante de Caspi Corral, localidad de área agrupada (más de 2.000 habitantes) ubicada en la margen derecha del sistema de riego.
- Sr. Rubén Salto, dirigente campesino de Río Muerto y técnico de la Secretaría de Agricultura Familiar, se trata de una localidad pequeña (20 - 30 familias) ubicada en la margen izquierda del sistema de riego.
- Ing. María Gracia Senilliani, técnica de la Secretaría de Agricultura Familiar. Realiza trabajos con comunidades del departamento Figueroa.

## **4. Contextualización histórica y actual**

De la historia pasada se destaca la explotación natural y humana (Arístide, 2009) y la migración a los obrajes de otros departamentos debido a la entrada de la industria forestal en la provincia. En la actualidad, se destaca el avance de la frontera agropecuaria, que se expresa en las amenazas de desalojo que sufren las comunidades campesinas. Relacionado con el recurso hídrico se acentúan dos puntos:

### **4.1. Sistema hídrico y modo de vida campesino**

Las obras hidráulicas realizadas a lo largo del río Salado han provocado cambios importantes en el agroecosistema y en el modo de vida campesino (Arístide, 2009). La historia del departamento está profundamente ligada con la evolución del sistema hídrico. Antes del colapso total del sistema de riego en la década de los 80, la actividad productiva se basaba en la agricultura de bañado. Sin embargo, tras una gran inundación en el año 1974 comenzó un proceso de erosión que afectó por completo la vida de las comunidades. Con la rotura del dique, se quedaron sin disponibilidad del agua que les proporcionaba el río. En 2011, 37 años después, se inaugura la obra de "Reconstrucción Integral del Sistema Hídrico Figueroa". Actualmente, el sistema de riego sigue sin funcionar plenamente.

### **4.2. Organización comunitaria, autogestión del recurso y formación de consorcios**

Desde el punto de vista del recurso hídrico, se observa un importante trabajo comunitario en cuanto a construcción y mantenimiento de acequias de derivación, construcción de represas y, por supuesto, el uso compartido de éstas últimas para proveer de agua al ganado. En épocas críticas de escasez de agua la organización

comunitaria ha tenido mucha relevancia a la hora de sobrellevar esa situación y buscar soluciones “desde abajo”. Actualmente, se están gestando nuevas formas de organización llamadas consorcios: asociaciones civiles que permiten a los campesinos tener identidad institucional para plantear formalmente cuestiones ante un organismo, en este caso, la Administración Provincial de Recursos Hídricos.

## **5. Análisis espaciales y resultados**

### **5.1. Análisis de distribución espacial**

#### *5.1.1. Densidad de población, registros y habitantes*

La población de análisis se reduce únicamente a aquella correspondiente a los núcleos de agricultores familiares registrados en las encuestas, lo que equivale a un 56% de la población, es decir, 9.959 habitantes. Su distribución no es homogénea, ya que un 45,81% de la población de estudio se encuentra concentrada principalmente en 6 localidades. El resto de la población, un 54,19%, se haya dispersa (muchas localidades con pocos habitantes y pocas localidades con muchos habitantes). Espacialmente, se muestra una distribución asociada al recurso hídrico.

#### *5.1.2. Actividades productivas*

Los resultados de las encuestas muestran que la combinación de actividades más común entre los registros es la agrícola junto la ganadera (58%). La mayor concentración de registros que realizan dichas actividades en conjunto coincide con el área de mayor densidad de habitantes (sur de la ruta 5 y margen izquierda del sistema de riego, donde se han desarrollado más ampliamente estas actividades).

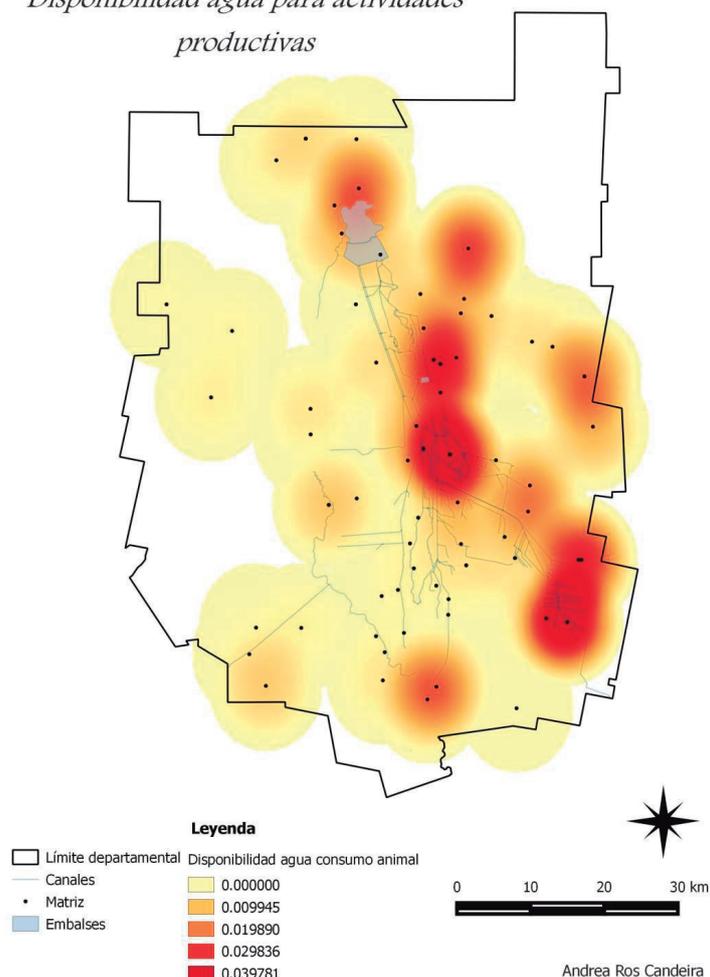
#### *5.1.3. Densidad de represas*

Se muestra una presencia generalizada en el departamento. Dicha distribución se corresponde con la actividad ganadera, la cual abarca el 85% de los registros como actividad productiva principal, o combinada con la actividad agrícola.

#### *5.1.4. Disponibilidad de agua para actividades productivas*

La situación es muy variable dentro de una misma localidad con gran número de registros pero, en general, predomina la disponibilidad de agua para actividades productivas. El porcentaje de registros que dispone de agua para riego es muy bajo pues se considera que tiene acceso al agua de canal, por lo que a su vez, la situación más común es que también tenga agua para consumo animal a través del almacenaje de dicha agua en una represa comunitaria, por ejemplo. La distribución de los registros que disponen de agua para consumo animal es la más generalizada ya que las zonas alejadas al sistema de riego también tienen posibilidad de mantener al ganado.

*Mapa de Calor*  
*Disponibilidad agua para actividades productivas*



**Mapa 2.** Distribución y concentración de los registros que disponen únicamente de agua para consumo animal.

**5.1.5. Disponibilidad de agua de red**

Esta variable indica si un registro dispone de agua proveniente de una red de suministro de agua potable. Un 86% de los registros no disponen de agua de red y están presentes tanto en áreas dispersas como agrupadas. A pesar de que algunas localidades cuentan con planta potabilizadora, no cubren la totalidad de sus registros con agua de red. Únicamente 288 registros disponen de ella y de éstos, un 95% se encuentra concentrado en 5 localidades. Es decir, las localidades con mayor número de habitantes (exceptuando Colonia San Juan que está en proceso de construcción) cuentan con al menos una planta potabilizadora distribuidora de agua.

**5.1.6. Disponibilidad de agua para consumo humano**

Esta variable expresa las formas de obtención de agua para consumo humano. El almacenaje de agua de lluvia es la forma de obtención más extendida a lo largo del

departamento (66% de los registros) y, culturalmente, es considerado un bien muypreciado. Las formas menos habituales: perforaciones, compra de agua y obtención directa de agua de canal. Un 22% corresponde a formas no incluidas en las anteriores opciones. La perforación alcanza apenas el 2% ya que no es el método más habitual de obtener agua salvo que sea una época de escasez crítica. Por otra parte, tomar agua directamente del canal tampoco es una práctica muy habitual entre los pobladores ya que preferentemente está destinada al desarrollo de actividades productivas y/o al abastecimiento de la planta potabilizadora.

#### *5.1.7. Accesibilidad al recurso hídrico*

Mediante un análisis de distancia al sistema de riego se determinó que más de la mitad de los registros (68%) se encuentran en un radio menor a 1 km de los canales y que, un 68 % de las localidades, se encuentran en un radio menor a 5 km del sistema hídrico. Respectivamente, se analiza la distancia de las localidades a la red vial: el 64% de las localidades presentan una baja accesibilidad y sólo cuentan con acceso a caminos vecinales de tierra que no aseguran la posibilidad de una transitabilidad permanente. Los registros que compran agua están ubicados en las cercanías de rutas y caminos con la característica de transitabilidad permanente.

### **5.2. Análisis de correlación entre variables geográficas**

Para la relación de actividades productivas realizadas por los registros (agrícola y ganadera) y disponibilidad de agua para actividades productivas (para riego y para consumo animal) se obtiene una fuerte correlación positiva (92,7 %) entre las variables, pues la disponibilidad de agua es el principal condicionante para el desarrollo de actividades productivas.

Para la relación entre localidades con disponibilidad de agua para actividades productivas (agrícolas y ganaderas) y su distancia al sistema de canales, se observa que no existe una correlación espacial entre ambas variables. Es decir, la cercanía al sistema de riego no es una condición suficiente para acceder al recurso hídrico.

## **6. Conclusiones**

Tras la caracterización del uso del agua en Figueroa podemos establecer algunas conclusiones relevantes de las variables:

- Las formas de obtención de agua para consumo humano se han diversificado según la necesidad existente asociada a los acontecimientos que afectaron al sistema hídrico.
- La falta de agua hoy en día se debe más a problemas de distribución que a escasez de precipitaciones debido a: la falta de una correcta distribución del recurso desde el embalse al sistema de canales por parte del organismo competente, una distribución deficiente en la zona de influencia del sistema hídrico y problemas de distribución en las localidades que cuentan con planta potabilizadora.
- La distribución dispersa de la población, sumada a la falta de infraestructura vial, agravan la distribución de agua y las posibilidades de comunicación entre comunidades. Esta falta de infraestructura, a su vez, afecta a las comunidades asentadas en zonas lejanas, dificultando la distribución de agua en camiones cisterna en caso de necesidad. Al no tener acceso al agua de los canales, la dependencia de las lluvias para obtener agua las coloca en una situación muy vulnerable.

## 7. Agradecimientos

A la Universidad de Vigo y la Universidad Nacional de Santiago del Estero, por hacer posible este intercambio. A la Universidad Autónoma de Baja California, por enseñarme muchas de las herramientas que fueron precisas para realizar este trabajo. A todas las personas que colaboraron amablemente, en especial a los entrevistados.

## 8. Referencias

Aristide, P. (2010) *“Procesos históricos de cambio en la apropiación del territorio en Figueroa”* (Santiago del Estero, chaco semiárido) en Edición electrónica de la Universidad Internacional de Andalucía. “Agroecología: un enfoque sustentable de la agricultura ecológica (III)” 978-84-7993-186-5. Sevilla Guzmán, E. y Galafassi, G. compiladores.

Angueira C. y Prieto D. (2003) *“Sistema de Información Geográfica de Santiago del Estero”* (SigSE 1.0), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Barembaum, M. y Anastasio M. (2005) *“Caracterización económica de la provincia de Santiago del Estero: Evolución de la agricultura en la provincia”*. Apuntes Agroeconómicos, Año 3 - N° 4.

Basán Nickisch, M. (2005) *“Propuestas técnicas y organizativas para lograr una adecuada planificación del uso del Río Salado en la provincia de Santiago del Estero”*.

Basualdo, M.A. (1982) *“Rasgos Fundamentales de los Departamentos de Santiago del Estero”*, Municipalidad de Santiago del Estero.

Bilbao, L. (2010) *Agricultura familiar: atlas, población y agricultura familiar en el NOA/ Lucas Bilbao y Guillermo Ramisch. - 1a ed. - Buenos Aires: Ediciones INTA, 2010. v. 3, 32 p.; 28x20 cm. ISBN 978-987-1623-61-7. Agricultura. I. Ramisch, Guillermo II. Título CDD 630.*

Buzai, G.D.; Baxendale, C.A. (2009) *“Análisis Exploratorio de Datos Espaciales”*. Geografía y Sistemas de Información Geográfica. (GESIG-UNLU, Luján). Año 1, N° 1, Sección III: 1-11. On-line: [www.gesig-proeg.com.ar](http://www.gesig-proeg.com.ar)

Celis, L. (2010) *“El desplazamiento poblacional en las localidades del departamento Figueroa: el caso de Villa Figueroa”* Revista digital de Población, Estado y Sociedad N° 5 Vol.5 Noviembre. Santiago del Estero.

De Dios, R. (2002) *“Régimen de tenencia y distribución de la tierra”*, cátedra de Conceptos de Sociología Urbana y Rural, Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).

De Dios, R. (2006) *“Diagnóstico sobre los pequeños productores, trabajadores transitorios y Pymes empobrecidas y grupos vulnerables de la provincia de Santiago del Estero”*. Santiago del Estero: Informe final, PROINDER. Serie Consultorías. Estudio Integral del Parque Chaqueño, año 2000, Red Agroforestal Chaco Argentina, REDAF.

Frediani, G. (1992) *“Aspectos económicos en la zona semiárida de Santiago del Estero”*.

Gallego, Antonio (2012) *“Santiago del Estero y el Agua. Crónica de una relación controvertida”*.

González, M. D. C. (2000) *“Argentina. Situaciones problemáticas de tenencia de la tierra”*. Documentos de Formulación N°3, Buenos Aires: PROINDER.

INDEC. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010.

INDEC, Censo Nacional Agropecuario 2002.

Instituto Geográfico Nacional SIG250 (2010). Sistema de Información Geográfica 1:250.000. Disponible en: <http://www.ign.gob.ar/sig> acceso el 11-5-2014.

Lorenz, G. (2009) *“Ambientes salinos: las dos caras de un fenómeno regional”*. En *“Cambios y problemas ambientales: perspectivas para la acción”*, Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).

Monitoreodesmonte.com.ar, 13-5-2014, acceso el 07-7-2014, Monitoreo de desmontes en el Chaco Seco <http://monitoreodesmonte.com.ar/>

Moscuzza, C.; Pérez Carrera, A.; Garaicoechea, J. y Fernández Cirelli, A. (2003) *“Relación entre las actividades agropecuarias y la escasez de agua en la provincia de Santiago del Estero (Argentina)”*. El agua en Iberoamérica; Aspectos de la problemática de las tierras secas. Edit. Fernández Cirelli, A. y Abraham, E. Publ. por CYTED XVII. 35-53. Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Fac. de Cs. Veterinarias, Univ. de Buenos Aires.

Olaya, V. (2010) *“Sistemas de Información Geográfica”*.

Paoli H., Elena H., Mosciaro J., Ledesma F., Noé Y. (2011) *“Caracterización de las cuencas hídricas de las provincias de Salta y Jujuy”*. SIGCSSJ v1-2009, INTA-EEA Salta, Cerrillos, Argentina.

Paz, R. De Dios, R. (2011) *“Actores sociales y espacios protegidos. Aprendizajes de experiencias rurales en el NOA”* - 1ª ed.- Tucumán: Magna Publicaciones.

Pérez-Carrera, A. A., Moscuzza, C. H., & Fernández-Cirelli, A. (2008) *“Efectos socioeconómicos y ambientales de la expansión agropecuaria. Estudio de caso: Santiago del Estero”*, Argentina. Revista Ecosistemas, 17(1).

Proyecto de Manejo Sostenible de los Recursos Naturales en el Chaco Sudamericano GTZ (2006).

Sistema de Información Geográfica de los Recursos Hídricos de la Provincia Santiago del Estero (SIGeRHSE), Secretaría del Agua - UNSE, FCE, IRHi, año 2014.

Sitio Oficial de la Provincia de Santiago del Estero: <http://www.sde.gov.ar/> acceso el 11-5-2014.

Tasso, A. (2004) *“Un caso de expansión agraria capitalista seguido por depresión. Santiago del Estero, 1870-1940”*, Revista Población & Sociedad N° 10/11, 2003-2004, pp. 109-136. Disponible en: <http://www.poblacionysociedad.org.ar/>

Tasso, A. (2006) *“Vida humana y organización social en condiciones de escasez”*. En *“Santiago del Estero. Una mirada ambiental”*, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).

Togo, J. (2006) *“Asentamientos humanos y aprovechamiento de los recursos en Santiago del Estero”*. En *“Santiago del Estero. Una mirada ambiental”*, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE).

Torrella, S. A., y Adámoli, J. (2005) *“Situación ambiental de la ecorregión del Chaco Seco”*. La situación ambiental Argentina, 2006, 73-100.

Yrigoyen, C. C. (2003) *“Econometría espacial aplicada a la predicción-extrapolación de datos microterritoriales”* Dirección General de Economía y Planificación.

Yrigoyen, C. C. (2006) *“Análisis estadístico de datos geográficos en geomarketing: el programa GeoDa”* Distribución y consumo, 16(86), 34-47.

# Utilización de índice de vegetación en la evaluación de un bosque nativo sometido a una limpieza química aérea para el control de arbustivas (La Paz, Entre Ríos) <sup>1</sup>

Sabattini, Julián Alberto <sup>2</sup> y Sabattini, Rafael Alberto <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Trabajo presentado como poster en XIX Jornadas de Jóvenes Investigadores (AUGM) "Ciencia En El Bicentenario De Los Pueblos Latinoamericanos". Ciudad del Este, Paraguay. Octubre 2011.

<sup>2</sup> Docente Auxiliar Cátedra Ecología Sistemas Agropecuarios. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos (FCA-UNER)

<sup>3</sup> Profesor Titular Cátedra Ecología Sistemas Agropecuarios FCA-UNER

[juliansabattini@fca.uner.edu.ar](mailto:juliansabattini@fca.uner.edu.ar) (2), [rsabatti@fca.uner.edu.ar](mailto:rsabatti@fca.uner.edu.ar) (3)

---

## RESUMEN

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) permite observar la dinámica de la vegetación en el tiempo. El objetivo de este trabajo fue cuantificar el NDVI en un bosque nativo ubicado en el Departamento La Paz (Entre Ríos, Argentina) sometido a una limpieza química aérea para el control de arbustivas. Se compara el NDVI en 8 fechas entre Setiembre-2010 y Marzo-2011 utilizando softwares para el procesamiento de imágenes. En el lote tratado se registró un marcado contraste del NDVI respecto al testigo desde el 13/11/2010 hasta el 17/02/2011. Además, se observó una disminución entre 40-45% hasta el 16/01/2011 y posteriormente se registró un aumento generalizado en testigo y tratado debido a cambios en las condiciones meteorológicas que permitieron la recuperación de los árboles, arbustivas y herbáceas. Es factible determinar la afectación de una técnica de recuperación del bosque nativo utilizando sensores remotos y sus herramientas asociadas.

**Palabras Clave:** NDVI, bosque nativo, Espinal

## Introducción

La teledetección espacial es una herramienta fundamental para la elaboración de la cartografía y esta técnica permite adquirir imágenes multiespectrales por medio de sensores remotos. Las imágenes generadas brindan no solamente mayor cantidad de observaciones sobre las coberturas del suelo en comparación a los levantamientos terrestres, sino también permiten la detección de características de la vegetación (Speranza & Zerda, 2005). En el transcurso de los años, la accesibilidad a las mismas y la mejora en la resolución, tanto espacial como espectral, fue aumentando y es por eso que la interpretación y análisis de tales fuentes de información cada vez requiere mayor precisión.

El Índice Vegetación de diferencia normalizada -*Normalized Difference Vegetation Index*- (NDVI) es un buen indicador de la capacidad de la vegetación para absorber la radiación fotosintéticamente activa. Ha sido ampliamente utilizado por investigadores para estimar la biomasa verde (Rosental *et al.*, 1985; Tucker *et al.*, 1985), índice de área foliar (Asrar *et al.*, 1984) y patrones de la productividad (Goward & Tinte, 1987), porque la estructura interna del mesófilo de hojas verdes refleja fuertemente la radiación NIR, y los pigmentos clorofílicos absorben una gran proporción de la radiación roja VIS (Sellers *et al.* 1992). Estos indicadores permiten

relacionar la fracción de la radiación fotosintéticamente activa y la productividad primaria neta aérea de los ecosistemas (Jobbágy *et al.*, 2002).

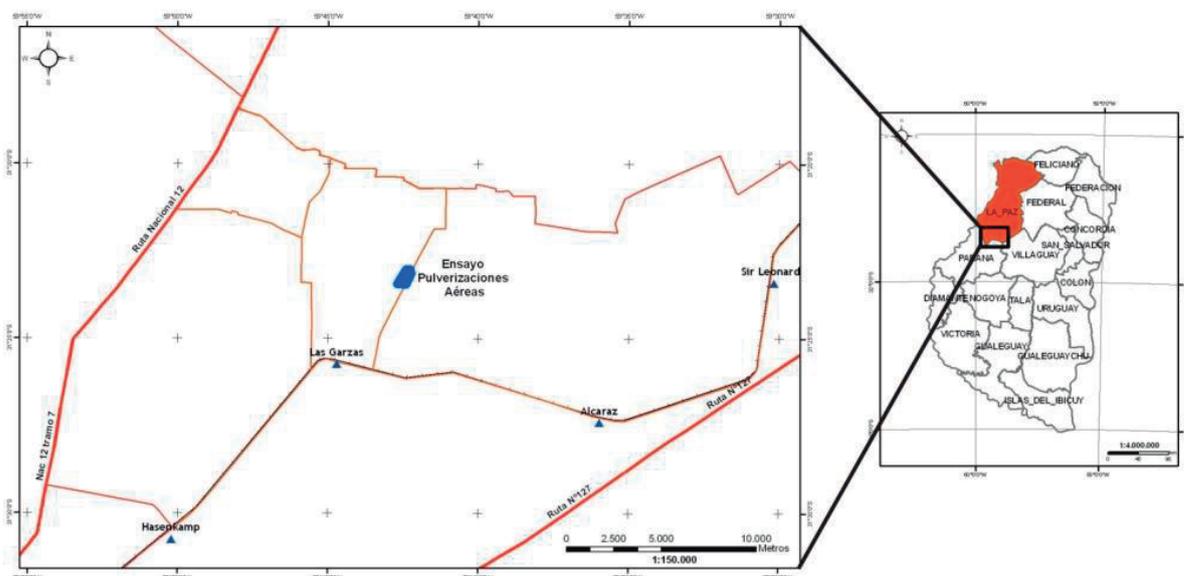
Otros estudios han permitido observar el nivel de crecimiento de la vegetación en las diferentes regiones del planeta y sintetiza el resultado de la dinámica del funcionamiento y los patrones de vegetación debido a disturbios físicos y bióticos (Paruelo *et al.*, 1998; Gurgel *et al.*, 2003). Existen numerosos estudios donde confirman que el NDVI es un instrumento para medir la degradación de los bosques (Sellers, 1985; Meneses-Tovar, 2011).

El suelo, la geomorfología y la vegetación influyen sobre los valores del NDVI, pero las variaciones en los factores climáticos, en particular, la precipitación y la temperatura, tienen una fuerte relación con la variación de este índice para un sitio dado (Wang *et al.*, 2003). La principal ventaja del NDVI es su fácil interpretación, ya que sus valores varían entre  $-1$  y  $+1$ , permitiendo conocer el estado de vigor vegetal de grandes superficies, detectando fenómenos de amplio rango de variación (Chuvienco *et al.*, 2002).

El objetivo de este trabajo es cuantificar el NDVI en un bosque nativo sometido a una limpieza química aérea para el control de arbustivas. La finalidad del estudio es determinar grado de afectación de un bosque nativo degradado intervenido, desde el punto de vista del control químico sobre arbustivas y la evaluación del grado de fitotoxicidad sobre las especies leñosas.

## Materiales y Métodos

El estudio se realizó en un establecimiento agropecuario ubicado en el distrito Alcaraz II al Sur del departamento La Paz (Fig. 1). El área de estudio abarca 40 ha; situadas en latitud Sur  $31^{\circ}23'14''$  y longitud Oeste  $59^{\circ}42'33''$  a una altitud de 64 metros sobre nivel del mar.



**Fig 1.** Localización del área de estudio en el Sur del departamento La Paz.

El sector centro norte de Entre Ríos presenta clima templado húmedo de llanura (Rojas y Saluso, 1987), y temperatura media anual de  $18,9^{\circ}\text{C}$ , con máxima promedio

de 24,8°C y mínima de 12,0°C. La precipitación media anual es de 1.100 mm concentrada entre los meses de octubre y marzo (Plan Mapa de Suelos Provincia de Entre Ríos, 1986). El área de estudio pertenece a la provincia fitogeográfica del Espinal (Cabrera, 1976) que se caracteriza por bosques xerófilos dominados por algarrobo negro (*Prosopis nigra*), ñandubay (*Prosopis affinis*) y espinillo (*Vachellia caven*).

Se trabajó sobre un bosque nativo degradado con tres grados de cobertura vegetal de arbustivas de los géneros *Baccharis* y *Eupatorium*: 40; 60; y 80%. Se realizaron tres transectas en dirección Este-Oeste (T1, T2, T3), para comparar las diferentes situaciones dentro del mismo lote y la efectividad de los tratamientos. Las transectas tienen una longitud de 300 m de longitud por 40 m de ancho, lo que significa una superficie de 1,2 ha. A los efectos comparativos se consideran transectas adyacentes del lado Oeste con las mismas características tomándola como una situación testigo, presentando una situación similar del bosque nativo al iniciar la experiencia. La limpieza química área se realizó con avión el día 2/11/2010 utilizando principios activos selectivos.

Se utilizó un software GIS para delimitar las transectas y además IDRISI Taiga para el procesamiento de las imágenes satelitales. Se utilizaron imágenes Landsat 7-ETM y Landsat 5-TM: L7\_22682\_02may2006; L5\_226-82\_26set2010; L5\_226-82\_12oct2010; L5\_226-82\_13nov2010; L5\_226-82\_15dic2010; L5\_226-82\_31dic2010; L5\_226-82\_16ene2011; L5\_226-82\_17feb2011; y L5\_226-82\_05mar2011. Para cada fecha se realizó una secuencia metodológica que consistió en la descarga de las imágenes satelitales (Landsat 5-TM 226/82) del catálogo de INPE (Instituto Nacional de Asuntos Espaciales de Brasil) y posteriormente se realizó una calibración atmosférica utilizando el modelo de COST (Chavez, 1996) con el objetivo de reducir el efecto de bruma y gases.

La georreferenciación se basó en una imagen satelital de referencia (Landsat 7-ETM), aplicando entre 50 y 75 puntos de muestreo para obtener un error cuadrático medio menor al tamaño del pixel (Chuvienco, 1996).

Una vez obtenidas las imágenes corregidas y georreferenciadas, se elaboraron los índices de vegetación en función de la ecuación del NDVI y teniendo en cuenta las firmas espectrales de las cubiertas vegetales para Landsat 5-Tm:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

NIR = Corresponde a la Banda 4 de Landsat 5-TM

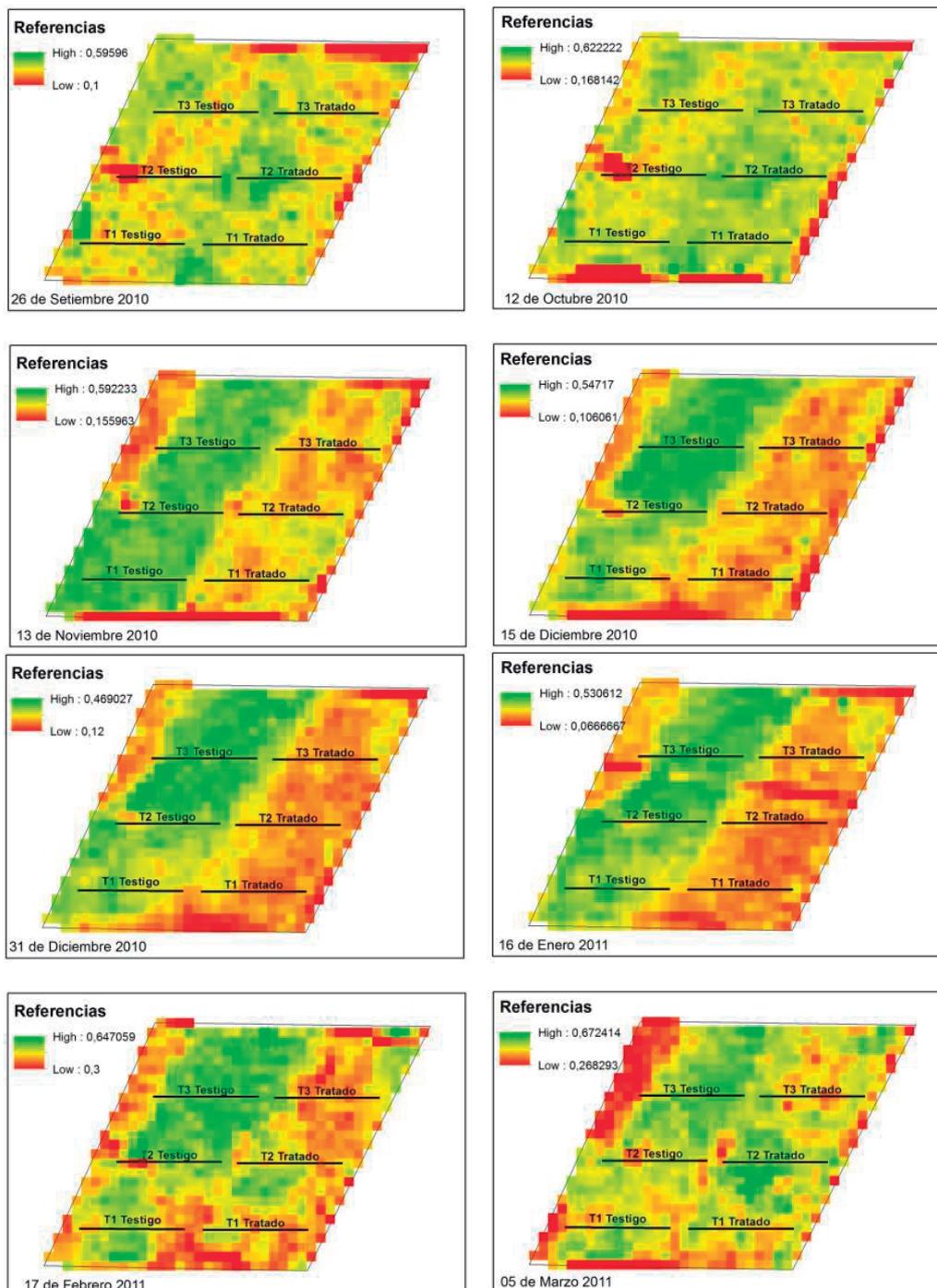
VIS= Corresponde a la Banda 3 de Landsat 5-TM

El NDVI genera un rango entre -1,0 y 1,0, siendo los valores positivos los que representan la vegetación verde y los negativos corresponden principalmente a las nubes, el agua y la nieve. El NDVI cercano a cero corresponde principalmente a las rocas, al terreno desnudo o bien a la vegetación senescente (Chuvienco, 1996).

Posteriormente, se emplearon técnicas estadísticas para cada una de las transectas con el fin de evaluar la efectividad del tratamiento, utilizando el INFOSAT versión 2011 Estudiantil. Por cada fecha del estudio se analizó la existencia de diferencias de los valores medios de NDVI por medio de un Test de Tukey entre el testigo y el tratado.

## Resultados

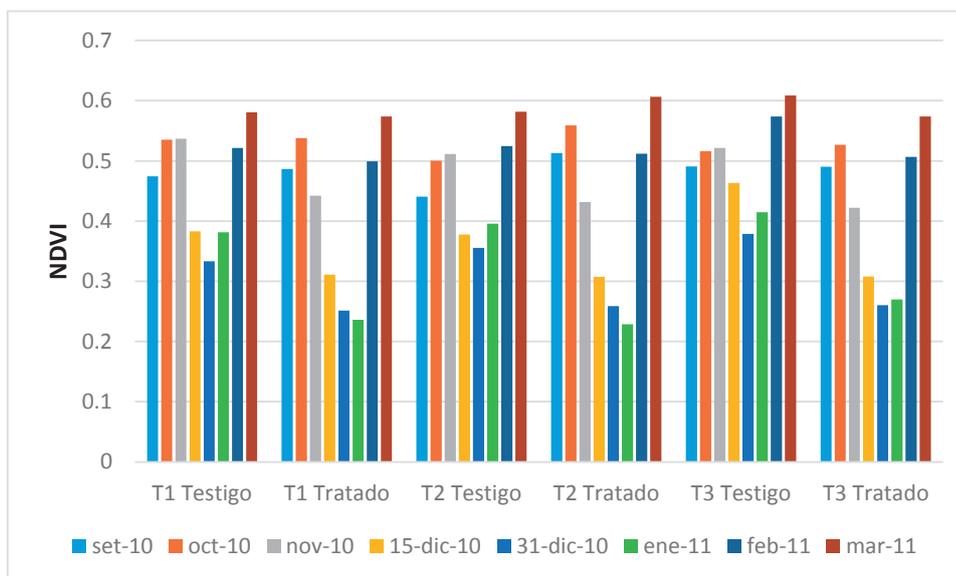
Se obtuvieron los mapas de NDVI (Fig 2) y los valores mínimos, máximos, rango, media, y desvió estándar para cada fecha. Se observó un marcado contraste entre el lote tratado respecto al testigo desde el 13/11/2010 hasta el 17/02/2011, y luego una pequeña recuperación que en las salidas estadísticas se aprecian por su gran magnitud.



**Figura 2.** Mapas de NDVI del 26-SET-2010 hasta 05-MAR-2011

Referencias: Colores rojos intensos indican valores bajos de NDVI representa una condición de vegetación débil, escasa o senescente con baja área foliar, en cambio los colores verdes indican valores altos de NDVI lo que implica vegetación vigorosa y densa.

Se observó una disminución entre 40-45% de los valores de NDVI en las transectas tratadas desde el 13/11/2010 hasta 16/01/2011, caso contrario en transectas testigos. Posteriormente se registró un aumento generalizado en todos los casos de los valores de NDVI, probablemente a un aumento en las precipitaciones que permitieron la recuperación de los árboles, las arbustivas y el pastizal. Es importante señalar que, el estudio se realizó en una condición extrema desde el punto de vista de la cantidad de precipitaciones registradas, tal es así que sólo dos días antes de la pulverización hubo una pluviometría de 20 mm y durante todo el período se observó déficit hídrico en el perfil y la condición de sequía fue preponderante.



**Figura 4.** Comparación del NDVI por transectas y tratamiento.

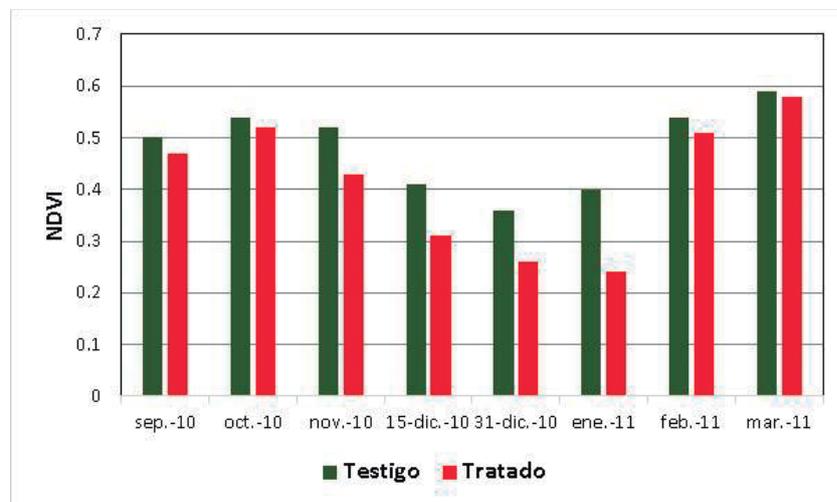
Los bajos valores de NDVI el 31/12/10 y 16/01/11 coincidieron con los momentos de mayor estrés hídrico de los vegetales, vinculado a la sequía imperante en ese período observándose una senescencia temprana de la vegetación (Fig 4). Además, el índice de vegetación estaría reflejando el impacto del producto químico en la copa de los árboles (no deseado por el tratamiento) y su posterior recuperación; eso, sumado a las precipitaciones se observa el aumento del NDVI en el tratado; situación que también se observó en el testigo aumentando en proporciones iguales. Como es de esperar en las dos primeras fechas no se observaron diferencias significativas entre NDVI dado que aún no se había realizado la pulverización aérea. Esto indicó que el bosque nativo del testigo tendría un comportamiento similar entre el estrato arbóreo y arbustivo respecto al tratado (Cuadro 1). A partir de la 3ra. fecha y hasta la 6ta, se observaron diferencias significativas del NDVI entre el testigo y el tratado coincidente con el período de seca, en donde tanto el estrato arbóreo como el arbustivo fue afectado por el desarbustado químico. Luego en las 2 últimas fechas se revierte el efecto de fitotoxicidad sobre el estrato arbóreo dado la ocurrencia de lluvias y no se observan diferencias significativas entre el tratado y testigo (Cuadro 1).

Set/10	Media	Oct/10	Media	Nov/10	Media	15Dic/10	Media
Tratado	0,50 A	Tratado	0,54 A	Tratado	0,52 A	Tratado	0,41 A
Testigo	0,47 A	Testigo	0,52 A	Testigo	0,43 B	Testigo	0,31 B
31Dic/10	Media	Ene/11	Media	Feb/11	Media	Mar/11	Media
Tratado	0,36 A	Tratado	0,40 A	Tratado	0,54 A	Tratado	0,59 A
Testigo	0,26 B	Testigo	0,24 B	Testigo	0,51 A	Testigo	0,58 A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0,05$ )*

**Cuadro 2.** Comparación del NDVI entre testigo y tratado en 8 fechas del estudio

Los datos de NDVI obtenidos son coincidentes con el ciclo de las especies arbóreas en función de la condición climática imperante, tal es así que el efecto de la sequía se evidenció en Enero/2011 y Diciembre/2010, por el contrario el mes de Setiembre/2010 revela la salida del invierno (Fig 5)



**Figura 5.** Evolución del NDVI en transectas testigo y tratadas

### Conclusión

Es factible determinar a través de un índice de vegetación (NDVI) la afectación de una pulverización aérea sobre un bosque nativo, tanto desde el punto de vista del control químico de las arbustivas como para evaluar el grado de fitotoxicidad sobre las especies leñosas. Para ello, se deberían tener en cuenta las condiciones ambientales, dado que precipitaciones de mediana magnitud, modifican las condiciones espectrales y reflejarían una situación errónea del tratamiento. Como propuesta futura se podría correlacionar el valor del NDVI con el peso verde calculado a campo, y así estimar la disminución y/o aumento de la biomasa por medio de un método rápido y económico.

### Referencias

Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., y Hatfield, J.H. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy journal*, 76:300-306.

- CHAVEZ P.S. 1996. Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9):1025-1036
- Chuvienco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial. 3° Edición Revisada. España. 568 p.
- Chuvienco, E., Riaño, D., Aguado, I. y Cocero, D. (2002). Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *Int. J. Remote Sensing*, 23:2145-2162.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo C.W. (2011). InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Goward, S.N. y Dye, D.G. (1987) Evaluating North American net primary productivity with satellite observations. *Advances in Space Research*, 7:165–174.
- Gurgel, H.C., Ferreira, N.J. y Luiz, A.J.B. (2003). Estudio da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1):85-90.
- Jobbágy, E.G., Sala, O.E. y Paruelo, J.M. (2002). Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. *Ecology*, 83(2): 307-319.
- Meneses-Tovar C.L. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasylva*, 238(62):39-46.
- Paruelo, J.M., Piñeiro, G., Oyonarte, C., Alcaraz, D., Cabello, J. y Escribano, P. (2005). Temporal and spatial patterns of ecosystem functioning in protected arid areas in southeastern Spain. *Applied Vegetation Science*, 8:93-102.
- Rosental, W.D., Blanchard, B.J. y Blanchard, A.J. (1985). Visible/infrared microwave agriculture classification, biomass, and plant height algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23:84–90.
- Sellers, P.J. (1985). Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, *International Journal of Remote Sensing*, 6:1335-1372
- Sellers, P.J., Berry, J.A., Collatz, G.J., Field, C.B., y Hall, F.G. (1992). Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *International Journal of Remote Sensing*, 42:187–216.
- Speranza, F. y Zerda, H.R. (2005). Potencialidad de los índices de vegetación para la discriminación de coberturas forestales. En Actas del III Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, Asociación Forestal Argentina. Corrientes, Argentina. CD. 6-9 de septiembre de 2005. ISSN 1669-6786.

Tucker, C.J., Vanpraet, C.L., Sharman, M.J., y Van Ittersum, G. (1985). Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*, 17:233–249.

# NDVI MODIS de sistemas pastoriles de *Panicum maximum* y su variación ante anomalías de precipitación media en el Dpto. Moreno, Santiago del Estero, Argentina

José Luis Tiedemann <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Prof. Adj. Forrajes Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta.

<sup>2</sup> Becario Postdoctoral, Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica

Contacto: [tiedemannjl@gmail.com](mailto:tiedemannjl@gmail.com)

---

## RESUMEN

La serie temporal NDVI MODIS, posibilitó extraer los parámetros fenológicos, modelar las estaciones de crecimiento y cuantificar la PPNA estacional de sistemas pastoriles de *Panicum maximum* del Dpto. Moreno, Santiago del Estero, Argentina en el período 2012-2015. Los parámetros fenológicos y la productividad primaria neta aérea (PPNA) de las estaciones de crecimiento de los sistemas pastoriles fueron significativamente afectados por las anomalías positivas y negativas de la precipitación media. La exponencial acumulación de biomasa o PPNA de los sistemas pastoriles en un lapso muy corto de tiempo en la EC 2014-2015, favorece el sub pastoreo y enmascara eventos de sequía a nivel local. Queda evidente la importancia de diversificar potreros con diferentes especies megatérmicas como *Chloris gayana* (cv Santana INTA Peman; cv katambora) tolerantes a sequía y con PPNA distribuida a lo largo de la estación de crecimiento posibilitando un mejor ajuste de la presión de pastoreo.

Palabras clave: Fenología, PPNA, Anomalías, NDVI MODIS, *Panicum maximum*

---

## 1. Introducción

La intensificación de la ganadería en Santiago del Estero, se basó en la eliminación del estrato arbustivo y arbóreo menor a 3 m de altura del bosque Chaqueño mediante rolados (*roller chopping*) y en la implantación de gramíneas megatérmicas como *Panicum maximum* (Kunst et al., 2012), dando como resultado un parque compuesto por leñosas y pasto (Kunst et al., 2003). En la Fig 1, se observa el modelo de sistema pastoril como resultado de rolado de alta intensidad y siembra simultánea de *Panicum maximum* (Anriquez et al., 2005; Kunst et al., 2008). Esta especie es la especie de mayor difusión, adaptación y persistencia debido a las características edáficas y climáticas imperantes en la zona (Renolfi et al., 1992; de León, 2004).



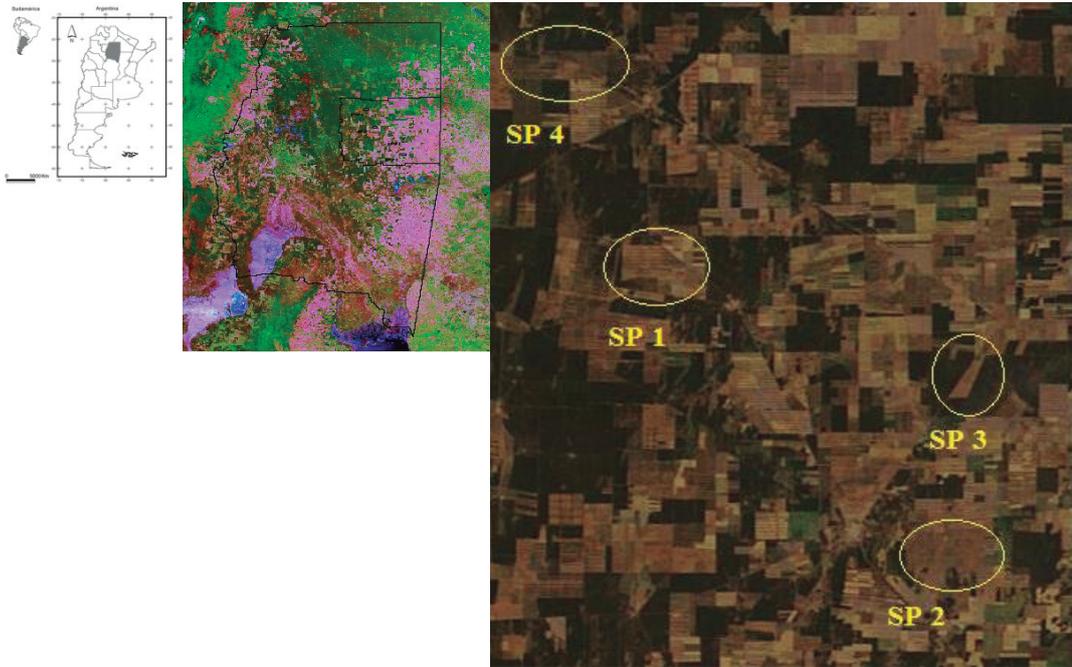
**Figura 1.** Sistema Pastoril de *Panicum maximum* (Fuente: Kunst et al., 2008).

La productividad primaria neta terrestre, es la integración temporal del incremento positivo de biomasa de la vegetación terrestre (Felsholt et al., 2003). La ausencia o presencia de vegetación con actividad fotosintéticamente activa delimita el inicio y el fin de la estación de crecimiento y por ende su longitud (Field et al., 1995). La longitud de la estación de crecimiento se relaciona directamente con la productividad de la vegetación estacionalmente activa (Chandola et al., 2010). La estrecha relación lineal existente entre los Índices de Vegetación y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida posibilitó que la productividad primaria neta aérea pueda ser determinada a partir de datos satelitales (Felsholt et al., 2003). Entre las fases fenológicas de la superficie de la tierra que pueden ser detectadas a través de perfiles de Índices de Vegetación están el inicio y el fin de la estación de crecimiento y por ende su longitud (de Beurs & Henebry, 2010; Atkinson et al., 2012).

Los sistemas pastoriles de *Panicum maximum* predominantes en el Dpto. Moreno, Santiago del Estero, son importantes desde el punto de vista ganadero debido a que sustentan ~268.000 cabezas de bovinos (PCCB, 2013) y desde un punto de vista ecológico como fuente de biodiversidad y diversificación del paisaje rural (Di Bella et al., 2004) y como sumidero de carbono (Rigge et al., 2013). Con el fin de aportar información local sobre la dinámica estacional de los sistemas pastoriles del Dpto. Moreno, los objetivos de este trabajo fueron: Determinar los parámetros fenológicos y la productividad primaria neta aérea (PPNA) de los sistemas pastoriles de *Panicum maximum* y su variación ante anomalías en la precipitación media, en el período 2012-2015.

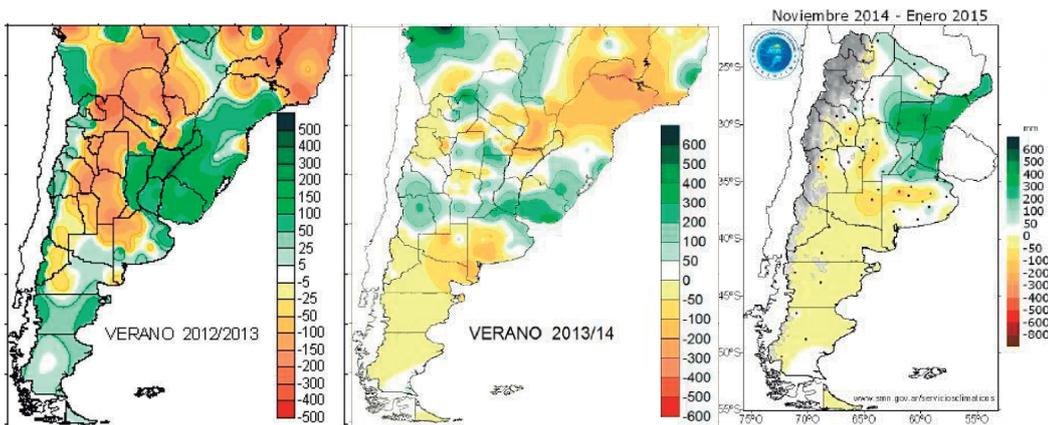
## **2. Materiales**

El Dpto. Moreno se ubica en el centro este de la provincia de Santiago del Estero, entre los paralelos 26° 53' y 27° 48' de latitud Sur y los meridianos 61° 50' y 63° 25' de longitud Oeste (Fig. 2). Los sistemas pastoriles fueron identificados y seleccionados en terreno (Bradley et al., 2007), su verificación satelital fue realizada mediante Google Earth, una vez realizada se generaron polígonos vectores de las mismas (Fig. 2, DER). Las superficies y coordenadas centrales de los sistemas pastoriles (SP) son: SP1 = 1429 has (lat -62.70; long -27.25); SP2 = 2866 has (lat -62.28; long -27.67); SP3 = 435 has (lat -62.25; long -27.43) y SP4 = 2055 has (lat -62.84; long -26.98 (Fig. 2, DER).



**Figura 2.** (IZQ) Argentina en Sudamérica y Santiago del Estero en Argentina. (CEN) El Dpto. Moreno en Santiago del Estero (polígono negro) y (DER) las cuatro áreas de muestreo de los sistemas pastoriles de *Panicum maximum*

La estación lluviosa comienza en diciembre y se extiende hasta marzo la precipitación media anual es de 750 mm. La temperatura media mensual enero es 26.9°C, y de julio 12,4°C. (Boletta et al., 2006). En la Fig. 4. Se presenta la distribución espacial de anomalías de precipitación media en Santiago del Estero.



**Figura 3.** Distribución espacial de anomalías de precipitación media en Argentina. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional - <http://www.smn.gov.ar/serviciosclimaticos>

### 3. Métodos

La variable utilizada es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada - NDVI (Tucker, 1979). El NDVI fue confeccionado mediante la siguiente ecuación  $NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$ , a partir de datos de reflectancia superficial derivados del sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). Los valores del NDVI oscilan en el rango de -1.0 y 1.0. La resolución espacial es de 250m x 250m y la temporal dos veces al día (TERRA AM y AQUA PM) Todos los datos de reflectancia superficial utilizados en este trabajo pertenecen al proyecto *Earth Observing Systems* – NASA, disponibles en <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

El control de las imágenes se realizó mediante el módulo EOSDIS Worldview alpha con imágenes Aqua & Terra de reflectancia corregida. Fueron eliminados los mapas con contaminación residual de nubes y con fallas en la calibración de los sensores. Se conformó una serie temporal de 165 mapas de NDVI MODIS de 2012 al 2015.

Los valores medios de NDVI de los Sistemas pastoriles fueron extractados mediante el módulo TSF (Eastman et al., 1995). Se minimizó el ruido residual de la serie temporal NDVI, mediante una técnica de suavizado tipo media móvil (Balzarini et al., 2008). Las estaciones de crecimiento de los sistemas pastoriles (EC) fueron determinadas mediante regresión cuadrática (de Beurs & Henebry, 2010; Brown et al., 2012):  $ECSP = \alpha NDVI^2 + \beta NDVI + \gamma$  en donde la variable independiente es la serie temporal NDVI (tiempo),  $\alpha$  el parámetro cuadrático,  $\beta$  la pendiente de la curva y,  $\gamma$  la intercepción el NDVI en el inicio de la estación de crecimiento. La pendiente de la curva  $\beta$  y el parámetro cuadrático  $\alpha$  determinan juntos el tiempo necesario para que la estación de crecimiento alcance su punto medio (PM),  $PM = -\beta/2\alpha$  (siendo  $\alpha < 0$ ), (de Beurs & Henebry, 2010).

El inicio (I) y fin (F) de las estaciones de crecimiento (longitud), fueron determinados mediante el mejor ajuste del modelo cuadrático mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (de Beurs & Henebry, 2010; Brown et al., 2012).

La productividad primaria neta aérea de los sistemas pastoriles (PPNA) se determinó mediante el modelo de Monteith (1977):  $PPNA = \epsilon * \sum (\alpha * SINDVI + \beta) * RFA (Mj/m^2. t)$ .

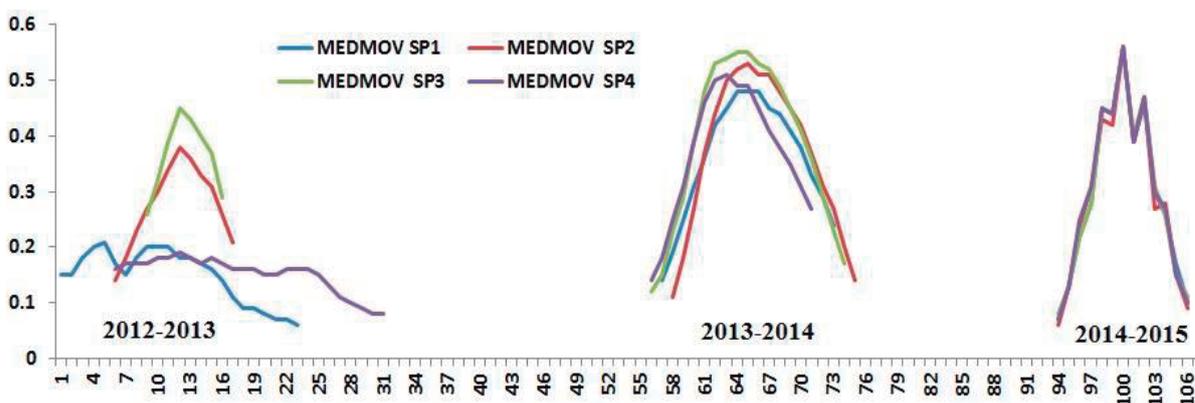
Los datos de  $\epsilon$  en el área en estudio son escasos, sin embargo puede suponerse un  $\epsilon$  constante en función de la escala del trabajo (Ruimy et al., 1994). Por cuanto se tomó el valor de eficiencia de la conversión de energía en biomasa aérea de Ruimy et al. (1994), siendo el promedio anual de pasturas perennes  $\epsilon = 0.23$  g Ms/Mj (Field et al., 1995). Los valores considerados de  $\alpha = 1.1$  y  $\beta = 0.055$ , fueron determinados por Paruelo et al. (2004) para Sudamérica. La estacionalidad integrada del NDVI (SINDVI) se determinó mediante la metodología propuesta por Reed & Brown (2005), siendo  $SINDVI = \sum NDVI_{ij}$  en donde i es el NDVI diario de la estación decrecimiento j. La PPNA ce cada estación de crecimiento se expresó en kilogramos de materia seca por hectárea ( $kg\ ms^{-1}\ ha^{-1}$ ).

La radiación global media mensual incidente al límite de la atmosfera fue extractada de mapas de Sudamérica derivados del sensor AVHRR/NOAA19 (<http://www.noaa.gov>). Los valores medios mensuales fueron acumulados en función de la longitud de las estaciones de crecimiento. La radiación fotosintéticamente activa se asume como una fracción constante del 48% de la radiación global media mensual incidente al límite de la atmosfera (Felsholt et al., 2004).

El efecto estacional sobre la PPNA de los SP fue determinado mediante ANAVA en diseño completamente aleatorizado (Balzarini et al., 2008). Siendo la variable clasificatoria las estaciones de crecimiento, las parcelas de SP las repeticiones y las variable dependiente la PPNA. Se verificó normalidad con Shapiro-Wilks modificado y homogeneidad de varianza con la prueba de Levene (Balzarini et al., 2008), no encontrándose evidencias para rechazar las hipótesis de normalidad y homogeneidad de varianzas. El modelo lineal para la observación del tratamiento  $i$  en la parcela  $j$ , es  $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$  donde  $Y_{ij}$  observaciones del tratamiento  $i$  en la parcela  $j$ ;  $\tau_i$  el efecto del tratamiento  $i$  y  $\varepsilon_{ij}$  término de error aleatorio asociado a la observación  $Y_{ij}$ . La comparación de medias se realizó mediante el test de comparaciones múltiples LSD Fisher (Di Rienzo et al., 2008).

#### 4. Resultados

En la Fig 4 se presentan las estaciones de crecimiento media móvil de la serie temporal NDVI de los cuatro sistemas pastoriles en el período 2012-2015.



**Figura 4.** Media móvil de la serie temporal NDVI de los sistemas pastoriles SP1, SP2, SP3 y SP4.

Fueron encontradas diferencias significativas ( $p < 0.01$ ;  $R^2$  0.73) en la PPNA de los SP en las estaciones de crecimiento del período analizado (Tabla 1).

**Tabla 1.** Parámetros fenológicos y PPNA de los sistemas pastoriles en el periodo 2012-2015. IEC: inicio, PM: punto medio, FEC: fin de estación de crecimiento; NDVI PM: NDVI punto medio. R<sup>2</sup>: Coef. de Determinación; PPNA: productividad Primaria neta Aerea. LSD Fisher: letras no comunes a, b y c implica diferencias significativas entre EC.

		IEC	PM	FEC	NDVI PM	R <sup>2</sup>	PPNA Kg ms/ha
2012-2013	SP 1	03.11.12	01.02.13	19.04.13	0.2	0.87	4798
	SP 2	26.01.13	28.02.13	05.04.13	0.4	0.96	1874
	SP 3	12.02.13	05.03.13	30.03.13	0.4	0.97	1238
	SP 4	26.01.13	05.03.13	02.06.13	0.2	0.92	4430
Media					<b>0.93</b>	<b>3085 a</b>	
2013-2014	SP 1	16.01.14	15.04.14	29.06.14	0.5	0.99	8101
	SP 2	21.01.14	23.03.14	07.07.14	0.5	0.97	9253
	SP 3	10.01.14	23.03.14	06.07.14	0.6	0.97	13300
	SP 4	10.01.14	23.03.14	02.06.14	0.5	0.95	7460
Media					<b>0.97</b>	<b>9529 b</b>	
2014-2015	SP 1	04.12.14	01.04.15	16.06.15	0.6	0.89	6495
	SP 2	04.12.14	01.04.15	16.06.15	0.6	0.89	6444
	SP 3	05.12.14	01.04.15	15.06.15	0.6	0.89	6227
	SP 4	04.12.14	01.04.15	16.06.15	0.6	0.90	6595
Media					<b>0.89</b>	<b>6440 c</b>	

## 5. Discusión y Conclusiones

Los parámetros estacionales inicio, punto medio y fin, NDVI PM (menor Amplitud) y PPNA fueron severamente afectados por las anomalías negativas de precipitación media en la estación de crecimiento 2012-2013 (Tabla 1). El *Panicum maximum* es muy sensible a las sequías (de León, 2004). En este sentido, Tiedemann (2015) determinó en los mismos sistemas que las AN redujeron la PPNA de los sistemas pastoriles en un 78,7 % con respecto a las estaciones con anomalías positivas de precipitación. Similares resultados obtuvieron Chiossone & Vicini (2012) quienes determinaron que la sequía redujo la productividad del *Panicum maximum* en un 70% en la Provincia del Chaco.

En las estaciones de crecimiento 2013-2014 y 2014-2015, los parámetros estacionales inicio, punto medio y fin fueron menos variables y el NDVI PM fue mayor (mayor Amplitud) debido a las anomalías positivas de precipitación media. Sin embargo, ambas estaciones de crecimiento tuvieron diferencias significativas en la PPNA. Los valores determinados oscilan en el rango de valores comunicados por Kunst et al. (2001) y Tiedemann (2015). El primero comunica que la producción de biomasa oscila entre 6000 y 14000 kg ms ha. Mientras que el segundo determinó que en EC con AP la PPNA de sistemas pastoriles de *Panicum maximum* oscila entre 9528 y 11562 kg ms ha. La baja PPNA de la EC 2014-2015 estaría relacionada con eventos de sequía a nivel local, estos eventos son evidenciados por la forma aserrada del perfil NDVI media móvil (Figura 4). La sequía reduce el crecimiento de la vegetación e induce a un

decrecimiento en la capacidad fotosintética que es detectado y cuantificado mediante el NDVI (Tucker & Choudhury, 1987). En este sentido de León (2004) determinó que la productividad de biomasa forrajera de *Panicum maximum* cv Gatton en Santiago del Estero con precipitaciones de 400 mm es de 4000 kg ms ha, mientras que con precipitaciones de 800 mm, la productividad ronda los 7500 kg ms ha.

En conclusión:

- ✓ La serie temporal NDVI MODIS, posibilitó extraer los parámetros fenológicos, modelar las estaciones de crecimiento y a partir de ellas cuantificar la PPNA estacional de los sistemas pastoriles del Dpto. Moreno, Santiago del Estero, Argentina en el período 2012-2015.
- ✓ Los parámetros fenológicos y la PPNA de las estaciones de crecimiento de los sistemas pastoriles *Panicum maximum* son significativamente afectados por las anomalías positivas y negativas de la precipitación media mensual.
- ✓ La exponencial acumulación de forraje o PPNA de los sistemas pastoriles *Panicum maximum* en un lapso muy corto de tiempo, como en la EC 2014-2015, favorece el sub pastoreo y enmascara eventos de sequía a nivel local. Esta respuesta evidencia la importancia de diversificar potreros con diferentes especies megatérmicas como *Chloris gayana* (cv Santana INTA Peman; cv katambora) tolerantes a sequía, con PPNA aproximada al *Panicum maximum*, pero distribuida en la toda estación de crecimiento lo que posibilita un mejor ajuste en la presión de pastoreo.

## 6. Agradecimientos

Al proyecto CICyT-UNSE N° 23/B090, al Instituto de Protección Vegetal-FCF-UNSE, a la Sede Regional Sur FCN UNSa y al proyecto D-TEC 0016/13.

## 7. Referencias

Anriquez A; Albanesi A; Kunst C; Ledesma R; Lopez; Rodriguez Torresi A; & Godoy J. 2005. Rolado de fachinales y calidad de suelos en el chaco occidental, Argentina. Cl. Suelo, 23: 145-157.

Atkinson P. M; Jeganathan C; Dash J. & Atzberger C. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. Remote Sensing of Environment 123: 400–417.

Balzarini M.G; Gonzalez L; Tablada M; Casanoves F; Di Rienzo J.A; Robledo C.W. 2008. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.

Boletta P; Ravelo C. A; Planchuelo A. M. & Grilli M. 2006. Assessing deforestation in the Argentine Chaco. Forest Ecology and Management 228:108–114.

Bradley B.A; Jacob R.W; Hermance J.F & Mustard J.F. 2007. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment* 106:137–145.

Brown M.E; de Beurs K.M. & Marshall M. 2012. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 years. *Remote Sensing of Environment* 126:174–183.

Chandola V; Dafeng Hui; Lianhong Gu; Bhaduri, B; Vatsavai, R.R. 2010. Using Time Series Segmentation for Deriving Vegetation Phenology Indices from MODIS NDVI Data. *Data Mining Workshops (ICDMW), IEEE International Conference*. DOI 10.1109/ICDMW.2010.143

Chiossone J. & Vicini R. 2012. Producción de Materia Seca De Gatton Panic en el Dpto. Almirante Brown en diferentes Sistemas de Manejo. Ed. INTA EEA Sáenz Peña. Disponible en: <http://inta.gob.ar/>.

de Beurs K. M & Henebry G. M. 2005. A statistical framework for the analysis of long image time series. *International Journal of Remote Sensing* 26:1551–1573.

de Beurs K. M & Henebry G. M. 2010. Spatio-Temporal Statistical Methods for Modelling Land Surface Phenology En: *Phenological Research*, I.L. Hudson, M.R. Keatley (eds.).

de León M. 2004. Las pasturas subtropicales en la región semiárida central del país. Informe Técnico N° 1, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Córdoba, ISSN 1668-2890. Disponible en: <http://inta.gob.ar/>.

Di Bella C; Faivre R; Ruget F; Seguin B; Guerif M; Combal B; Weiss M; & Rebella C. 2004. Remote sensing capabilities to estimate pasture production in France, *Int. J. Remote Sensing* 23:5359-5372.

Di Rienzo J.A; Casanoves F; Balzarini M.G; Gonzalez L; Tablada M; Robledo C.W. 2008. *InfoStat*, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Eastman R; McKendry J. E; & Fulk M. A. 1995. Change and times series analysis. *Explorations in Geographic Information Systems Technology*. UNITAR Second Edition, Palais des Nations, Geneva, Suiza, 116p.

Felsholt R. 2003. Assessment of Primary Production in Semi-arid Environment Satellite Data. Exploiting capabilities of new sensors. Ph. D. dissertation, Institute of Geography, University of Copenhagen, Copenhagen K, Denmark, 87p

Felsholt R; Sandholt I. & Schultz Rasmussen M. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment* 91:490–507.

Field C. B; Randerson J. T; & Malmstrijk C. M. 1995. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing. *Remote Sensing Environment* 51: 74-88.

Kunst C; Cornacchione, M.V; Gelid, L; Godoy, J. 2001. Aumento de forraje. Manejo desmonte y postdesmonte. Persistencia de pasturas subtropicales. En: Jornada sobre intensificación de la producción ganadera y sustentabilidad de recursos naturales en Santiago del Estero. Junio de 2001, Quimilí, Santiago del Estero, Argentina, 27pp.

Kunst C; Ledesma R; Basan M; Angella G; Prieto D. & Godoy J. 2003. Rolado de fachinales e infiltración de agua en el suelo en el Chaco occidental argentino. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 32: 105-122

Kunst C; Ledesma R & Navall M. 2008. RBI: Rolado selectivo de baja intensidad, 139 p, en ediciones INTA disponible en: [www.inta.gob.ar](http://www.inta.gob.ar).

Kunst C; Ledesma R; Bravo S; Albanesi A; Godiy J. 2012. Disrupting woody states in the Chaco region (Argentina): responses to combined disturbance treatments. *Ecological Engineering* 42:42–53

Monteith J. L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 281:277- 294.

Paruelo J. M; Golluscio R. A; Guerschman J. P; Cesa A; Jouvé V; & Garbulsky M.F. 2004. Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning. The case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography* 13: 385-395.

PCCB. 2013. Programa de Competitividad Conglomerado Bovino de Santiago del Estero. Secretaría de Política Económica del Ministerio de Economía y Finanzas Públicas de la Nación, 42p.

Reed B.C & Brown J.F. 2005. Trend Analysis of Time-series Phenology Derived from Satellite Data, IEEE Xplore Librería digital; Disponible en:<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01469863>

Renolfi R. F. 1992. Los pastizales de la Región Chaqueña. En: Jornadas de actualización técnica en producción bovina en áreas de secano de Santiago del Estero. Editor: INTA EEA Santiago del Estero, Argentina, 17-26 pp.

Rigge R.; Wylieb B.; Zhangc L.; & Boyted S P. 2013. Influence of management and precipitation on carbon fluxes in great plains grasslands. *Ecological Indicators* 34:590–599.

Ruimy, A; Saugier B; & Dedieu D. 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* 99: 5263-5283.

Tiedemann J. L. 2015. Fenología y productividad primaria neta aérea de sistemas pastoriles de *Panicum máximum* en el Dpto. Moreno, Santiago del Estero, Argentina, derivada del NDVI MODIS. *Ecol. apl.* 14: 27-39.

Tucker J. C. 1979. Red and Photographic infrared lineal combinations for monitoring vegetation. *J. Appl. Meteor.* 8:127-150.

Tucker J. C & Choudhury J. B. 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment* 23: 243-251.

# Compendio de Algunas Aplicaciones de los SIG a la Determinación de Parámetros Útiles para la Modelización Hidrológica

Jorge Prieto Villarroya<sup>1,2,3</sup>, Hector Daniel Farias<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Delta – Phi. Estudio de Ingeniería Hidráulica, Fluvial y Ambiental

<sup>2</sup> Subsecretaría de Medio Ambiente. Ministerio de Agua y Medio Ambiente. Santiago del Estero

<sup>3</sup> Instituto de Recursos Hídricos. FCEyT - UNSE

Contactos: [jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar](mailto:jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar) (1),

---

## RESUMEN

En el presente trabajo se presenta una recopilación o compendio de aplicaciones habituales de los SIG a la ejecución de modelos hidrológicos. Muchas de ellas pueden implementarse con herramientas SIG de código libre e información accesible y gratuita (cartografía temática, modelos digitales de elevaciones, imágenes satelitales, información de registros climáticos procedente de bases de datos hidrometeorológicas de uso público, etc..... ).

La combinación de SIG con modelización hidrológica, además de permitir obtener una mayor precisión en los resultados, representa un notable incremento en la productividad en cuanto a la sistematización, automatización y organización de procedimientos de cálculo de parámetros necesarios para la modelización. Ello redundará en una optimización de recursos en los procedimientos de análisis hidrológicos, principalmente el tiempo disponible, que es sin duda, el más valioso de ellos.

Palabras clave: Hidrología, Parámetros Hidrológicos, Cuencas Hídricas

---

## 1. Introducción

Un SIG es simplemente una base de datos georreferenciada, capaz de archivar ordenadamente ingentes cantidades de información, como una base de datos cualquiera, pero con la particularidad de que ésta queda referida espacialmente a un sistema coordinado. Los datos y variables analizados ya no aparecen en el formato habitual de la base de datos, sino en forma de imágenes o mapas de los valores de las variables. De esta forma se puede analizar fácilmente la procedencia de los datos y su distribución sobre el terreno, sin perder de vista la capacidad de ejecutar operaciones matemáticas o análisis estadísticos sobre dichas variables.

Como consecuencia de estas características, los SIG constituyen una herramienta de grandes posibilidades para la aplicación de modelos hidrológicos a partir de información digital, y la teledetección el complemento ideal para suministrar dicha información (Martínez Álvarez y Dal-Ré Tenreiro, 2003).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses. Por esa razón, cada vez más investigadores

recurren a los SIG para la construcción de modelos hidrológicos (Morad y Triviño, 2001).

Asimismo, autores como Lopardo (1995) presumen un incremento en las demandas de modelización y plantea que los Sistemas de Información Geográfica podrán reducir las dificultades de calibración en los estudios, gracias a la mayor confiabilidad de la información de base brindada por los SIG.

Para la revisión de aplicaciones de los SIG a la hidrología, se ha empleado la clasificación originalmente utilizada por Maidment (1996), en la que se establecen las siguientes categorías:

- Evaluación e inventarios hidrológicos
- Determinación de parámetros hidrológicos
- Construcción de modelos hidrológicos sencillos (sin análisis estadístico).
- Construcción de modelos hidrológicos integrados.

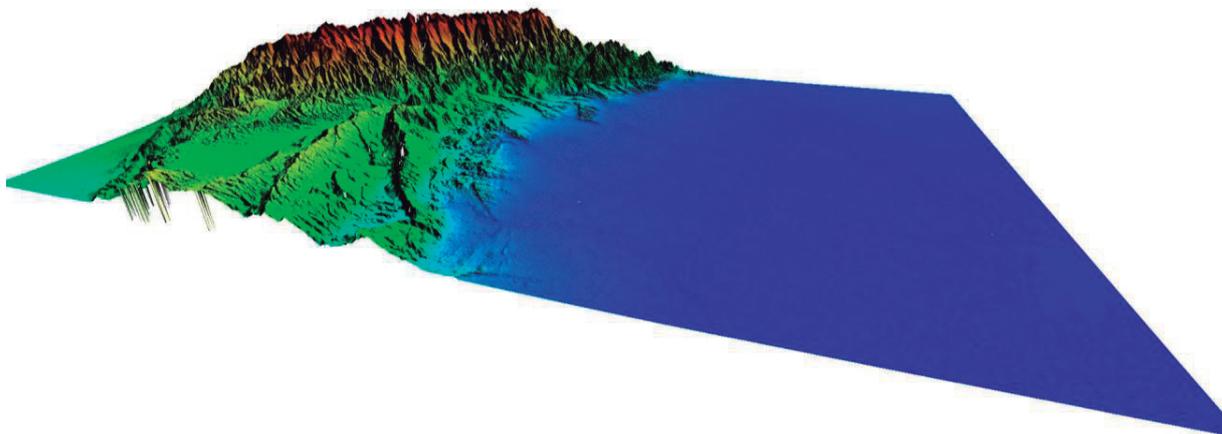
Con respecto a la modelización hidrológica, la revisión objeto de este artículo se centra en la determinación de parámetros, quedando por lo tanto incluida en la segunda de las categorías de la clasificación de Maidment.

## 2.- Materiales

El insumo principal e imprescindible es el Modelo Digital del Terreno, y más exactamente el Modelo Digital de Elevaciones. En segunda instancia, la cartografía temática (cuando esta existe) o imágenes satelitales también resultan de utilidad para alguno de los cálculos. Un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994).

Existen múltiples modelos digitales de elevaciones de diferentes resoluciones y libre acceso, teniendo en cuenta el nivel de detalle requerido para un estudio de cuencas, así como experiencias recientes en la valoración de la calidad de sus datos (Galván et al., 2012; Burgos, 2012; etc...) se acepta comúnmente la idoneidad del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) para los estudios hidrológicos.

Estos se encuentran disponibles en Resoluciones de 30 m en la web del United States Geological Service (USGS), de 45 m en la web del Instituto Geográfico Nacional de Argentina (IGN), y de 90 m y resampleados superiores (250 m, 500 m, 1000 m) en la web del CgiarCSI.



**Figura 1.** Modelo Digital de Elevaciones SRTM90m para la delimitación del Río Gastona

### 3.- Métodos

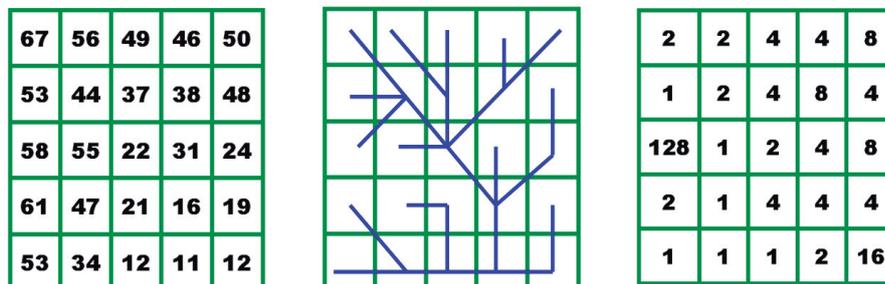
#### 3.1 Delimitación de Cuencas

La primera aplicación directa es la posibilidad de determinación de cuencas con SIG, sustentadas siempre sobre modelos digitales de elevaciones.

Se denomina Cuenca vertiente o Cuenca de Drenaje a una zona de la superficie terrestre en la cual, el agua procedente de las precipitaciones caídas sobre ella se dirige hacia un mismo punto de salida (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 2007).

El procedimiento de cálculo si bien difiere entre unas herramientas SIG (Hydrotools, SAGA, SWAT, etc...), siempre se sustenta en similares etapas de cálculo:

- Corrección del Modelo Digital del Terreno:  
Corrección hidrológica o reacondicionamiento del terreno que permite obtener un MDE sin depresiones, es decir, se procede a la localización de aquellos píxeles del MDE que se encuentran completamente rodeados de celdas con mayor cota, reasignándoles el valor correspondiente a la menor cota de las celdas circundantes, de este modo, se posibilita que el agua fluya de una celda a otra sin que se originen “estancamientos” del flujo.
- Direcciones de flujo  
Se trata de un ráster en el que a cada celda se le asigna un valor numérico determinado en función de la casilla hacia la que vierta el agua. La dirección de vertido se estima por la comparación de cada píxel con sus 8 píxeles colindantes, definiéndose de este modo la dirección de vertido.



**Figura 2.** Modelo Digital de Elevaciones (izqda), Direcciones de escorrentía (centro), Flujo de escorrentía (derecha)

- Acumulaciones de flujo  
Los valores que se asignan a cada celda del raster representan el número de celdas aguas arriba que vierten aguas a ella. De esta manera, las celdas de mayor valor son aquellas que reciben agua de una mayor superficie. Por tanto, por ellas pasaría un caudal de agua mayor que por aquellas que tengan menores superficies asociadas.
- Definición y segmentación de cauces.  
Previa definición del umbral o número mínimo de celdas aguas arriba que deben verter sobre la celda estudiada, se define toda la red de canales asignando a cada uno de ellos una identificación en segmentos, siendo cada uno de ellos un tramo de canal situado entre dos intersecciones (a excepción de los segmentos de cabecera).

- Zona de Captación.  
Definición, en formato matricial, de las cuencas presentes en la superficie de estudio. Para ello se procede a asignar a los píxeles de la zona de estudio el valor del cauce al que vierten sus aguas.
- Delimitación vectorial  
La vectorización de los canales y cuencas permite una primera estimación de la conformación del terreno conforme a cuencas vertientes así como la definición de la red de drenaje existente.

### 3.2 Obtención de parámetros físicos

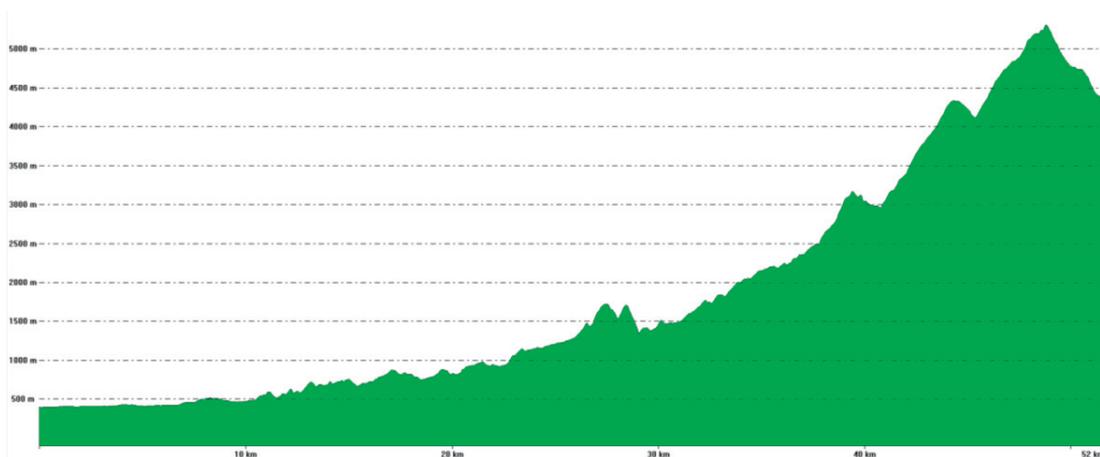
Los parámetros físicos o morfológicos intentar reflejar las características de la cuenca en cuanto a su forma y la influencia en la respuesta a las precipitaciones. Se deducen a partir de la cartografía (Martínez de Azagra y Navarro Hevia, 2007).

Las capacidades actuales de los Sistemas de Información Geográfica permiten realizar análisis geomorfológicos de las cuencas con gran facilidad, y por tanto, deducir automáticamente parámetros hidrológicos (Martínez Álvarez (2006))

Entre los más empleados se cuentan:

- |                                     |                                |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| - Superficie de la cuenca           | - Coeficiente orográfico       |
| - Índice de compacidad de gravelius | - Longitud del cauce principal |
| - Curva hipsométrica                | - Densidad de drenaje          |
| - Curva de frecuencias              | - Orden de cauces              |
| - Coeficiente de masividad          | - Perfil longitudinal del río  |
| - Pendiente media de la cuenca      | - Pendiente media del río      |

Con la aparición de los SIG, la determinación de los parámetros físicos de una cuenca ha pasado de ser calculados manualmente a resolverse de manera prácticamente automatizada. Además, se calculan de manera simultánea para un grupo de cuencas (por ejemplo, en el caso de cuencas vertientes a una ruta en la que se pretende dimensiona el drenaje transversal), lo que implica un ahorro sustancial de tiempo.



**Figura 3.** Ejemplo de Perfil Longitudinal del cauce principal de una cuenca



Representación tridimensional de MDE



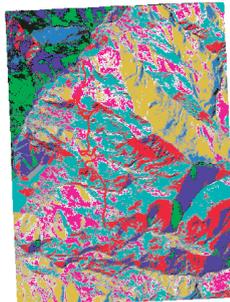
Incorporación de Imagen satelital al MDE



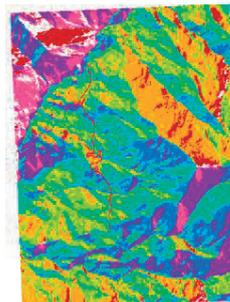
Extrusión de imagen satelital según MDE



Modelo Digital de Elevaciones



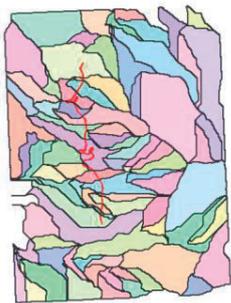
Flow direction



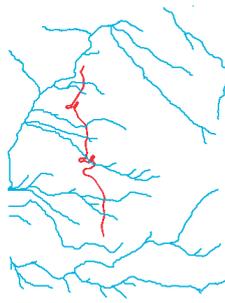
Flow acumulation



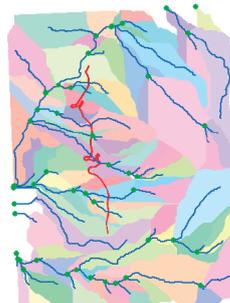
Cathment grid delineation



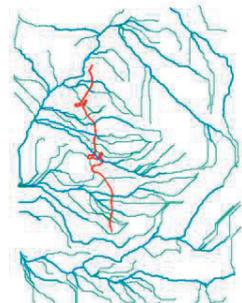
Catchment Polygon Processing



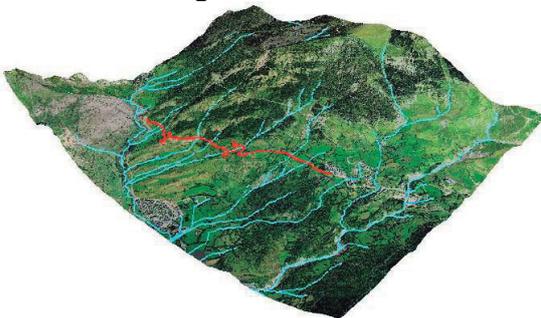
Drainage Line Processing



Drainage Point Processing



Longest Flow path



Delimitación de cauces de escorrentía



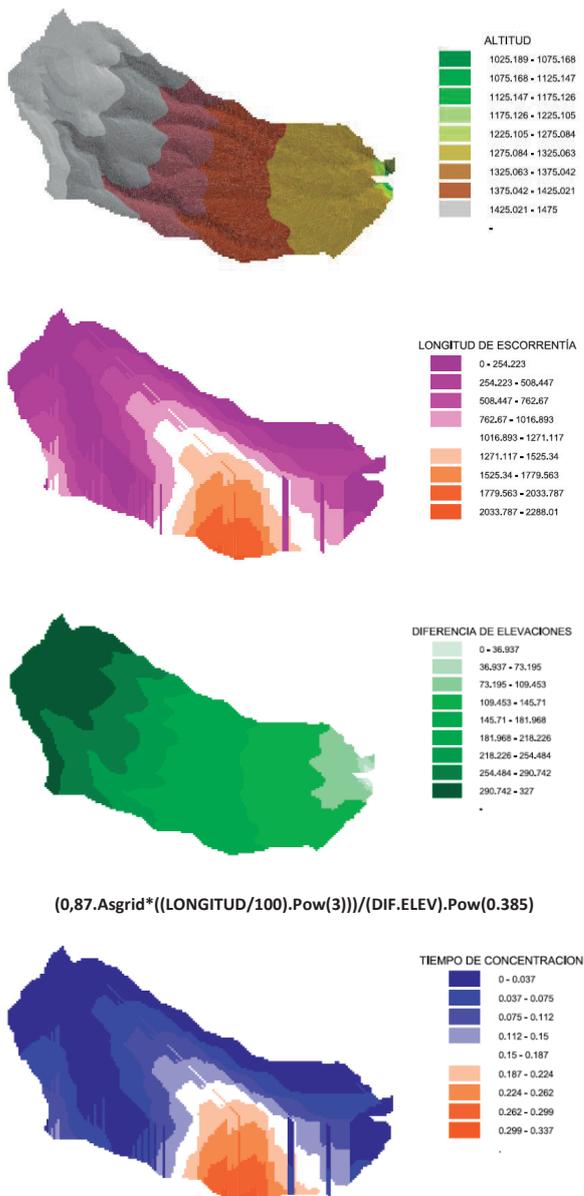
Delimitación de cuencas y subcuencas

**Figura 3.** Secuencia de todas las tareas a desarrollar para la obtención de la delimitación de cauces, cuencas y subcuencas mediante SIG

### 3.3 Tiempo de Concentración

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida o cierre.

El tiempo de concentración puede ser calculado con rapidez y precisión gracias los SIG, tanto mediante la aplicación de fórmulas tradicionales como Kirpich, Heras, Giandotti, etc... como también desarrollando un análisis geomorfológico celda a celda, y establecimiento de los distintos tipos de flujo (Ladera, Encauzado y Mixto), tal y como propone el manual "Watershed Hydrology" TR-55 1.00.09 del USDA – SCS .



- 1.- Obtención (o elaboración propia) de un Modelo Digital de Elevaciones
- 2.- Delimitación de la cuenca vertiente
- 3.- Cálculo de las Coberturas de "Direcciones de Flujo" y "Acumulación de Flujo" o área tributante a cada una de las celdas
- 4.- Cálculo de la Longitud de Escorrentía (L) desde cada celda al punto de desagüe de la cuenca, siguiendo las direcciones de flujo
- 5.- Obtención de las líneas Isocronas de escorrentía
- 6.- Cálculo de la Diferencia de Elevaciones (H), estimada como la diferencia entre la cota de cada celda y la cota del punto de desagüe de la cuenca
- 7.- Aplicación de la Fórmula del Tiempo de Concentración (TC) escogida en función de las características de la cuenca. En los gráficos adjuntos se muestra la aplicación de la fórmula de Kirpich.
$$TC = \left( \frac{0,870 \cdot L^3}{H} \right)^{0,385}$$
- 8.- Se obtiene el valor del TC para cada una de las celdas
- 9.- Se obtiene el mapa de isócronas
- 10.- Se obtiene una cobertura de tiempos de viaje
- 11.- Selección del máximo de los valores obtenidos, cómo TC de la cuenca

Fig 4 – Cálculo del Tiempo de Concentración con SIG

### 3.4 Cálculo del Número de Curva

El método hidrológico del SCS define mediante el parámetro Número de Curva NC la capacidad de una cuenca vertiente para producir escorrentía durante una lluvia. El parámetro permite obtener la lluvia neta o precipitación efectiva. Se propone la aplicación de una metodología, introducida por la Universidad Politécnica de Valencia y el Centro de Estudios Hidrográficos CEDEX, que permite el cálculo automatizado del NC, mediante el uso de SIG y fuentes de datos libres y actualizadas.

Si bien existen extensiones o aplicaciones integradas en los SIG que incluyen la posibilidad de cálculo del parámetro NC, el método propuesto incorpora la corrección por la pendiente, lo que se traduce en una mejor estimación del NC. La exactitud en el cálculo del parámetro resulta especialmente importante ya que el NC representa el factor de más sensibilidad en el resultado del modelo.

Se generan capas de las variables (infiltración, pendiente y vegetación) del NC, asignando a cada categoría un número primo correlativo: Al multiplicar los mapas de usos de suelo, pendiente y permeabilidad de suelo (todos los factores implicados en el NC), se obtendrá un número diferente para cada una de las combinaciones de tres números primos. Posteriormente se establece una correlación entre el producto de números primos, y el NC.



Figura 8. Método de cálculo

Se ha determinado errores en la estimación del NC en  $\pm 5$  unidades, representa modificaciones en el caudal obtenido de un 15%, agravándose esta situación en valores bajos, donde el error puede llegar incluso al 190 % (Weber, 2011), todo ello respalda la importancia de mejorar la estimación del NC con SIG.



**Figura 9.** Mapa de grupo hidrológico



**Figura 10.** Mapa de cobertura vegetal



**Figura 11.** Mapa de pendientes (< ó > 3%)

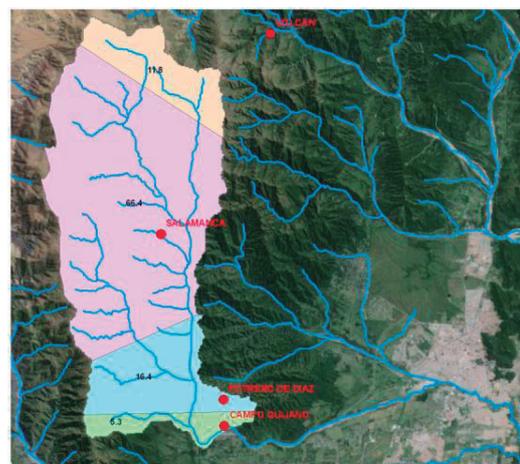
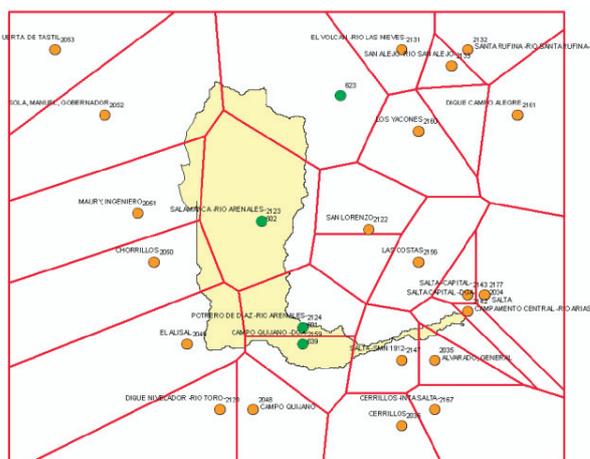


**Figura 12.** Mapa de Número de NC

### 3.4 Interpolación y análisis geoadistístico para el cálculo de la precipitación areal

Aunque existe la posibilidad de realizar, mediante herramientas SIG, metodologías tradicionales de distribución areal de lluvias (por ejemplo el método de la media aritmética, B e t h l a h m y , e t c . . . ), se trata de métodos simples y diseñados para simplificar su aplicación manual. Por lo tanto, además de las inevitables imprecisiones asociadas a sus resultados, no resulta pragmática, ni tan siquiera simple (por ejemplo en el caso de Bethlahmy), su aplicación mediante SIG.

En una segunda instancia, existen metodologías algo más elaboradas, cuya aplicación resulta precisa e inmediata mediante la aplicación de técnicas SIG. Ese sería el caso de la distribución areal de precipitaciones mediante Polígonos de Thiessen. Si bien el método no calcula un valor medio, el mismo asigna a cada estación un área de influencia espacial a la que se asocia el valor medio medido en la estación.

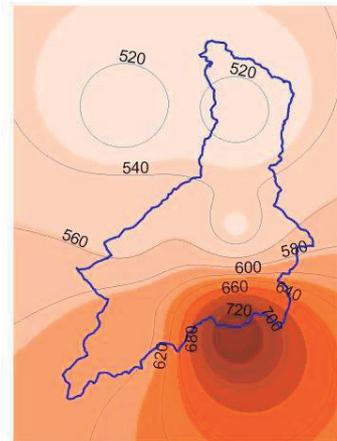


**Figura 13** – Distribución areal de la precipitación por polígonos de Thiessen (Salta)

El siguiente peldaño de complejidad estaría representado por métodos de interpolación sencillos como el Inverso del Cuadrado de la Distancia IDW o Interpolación de la Curva Mínima o Spline.

El inverso de la distancia es un método local, que usa la información procedente de los pluviómetros más cercanos (vecinos o neighbors), el valor estimado se calcula a partir de los valores de las estaciones más cercanas, dando distinto peso a cada una de ellas según la distancia a la que se encuentren del punto estimado, de forma que a mayor distancia de una estación al punto de interpolación menor será su peso. En hidrología se trabaja siempre con el inverso de la distancia elevada al cuadrado.

El método *Spline* estima valores usando una función matemática que reduce al mínimo la curvatura de la superficial total, dando como resultado una superficie lisa que pasa a través de los puntos muestreados.



**Fig 14** – Spline PP Anual

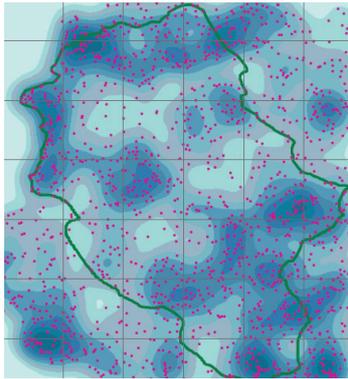
El penúltimo escalón estaría constituido los métodos complejos de interpolación determinística. En ellos, partiendo de información de tipo punto, se logran obtener valores areales de precipitación basados en criterios como la extensión de la similitud en los valores o en el grado de “suavizado” de la superficie a generar.

Los métodos de interpolación determinística se dividen a su vez en dos categorías: Métodos Determinísticos Globales y Métodos Determinísticos Locales. La diferencia radica en que las técnicas globales emplean la totalidad de la información disponible para el cálculo de la precipitación areal. Las locales realizan predicciones sustentadas en áreas reducidas, dentro de un área de estudio mayor (puntos en “vecindarios”).

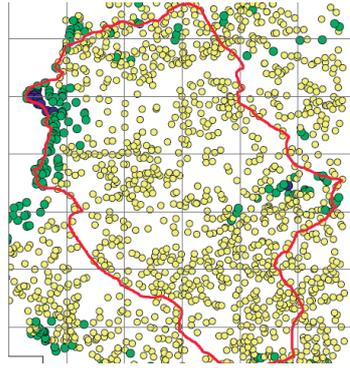
Otra subdivisión es la de interpoladores exactos (los valores obtenidos en un punto son idénticos a los interpolados) e interpolación inexacta (el valor de predicción puede ser distinto al valor medio en ese punto).

Ejemplo de este tipo de métodos son la Interpolación polinómica global y Interpolación polinómica local o la interpolación por funciones radiales.

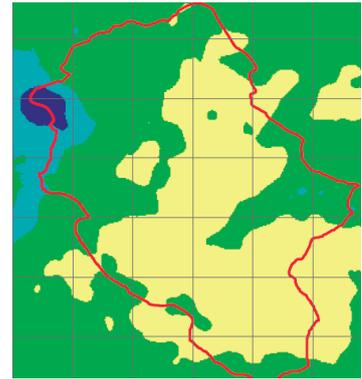
Finalmente, el mayor nivel de complejidad, estaría constituido por los métodos geoestadísticos de interpolación, también conocidos como “Kriggeado” (kriging), que se encuentran respaldados por modelos matemáticos y estadísticos. Por ello, debido a su componente estadístico, los métodos incluyen un análisis de probabilidad. Debido a la componente probabilística, los valores no son completamente predecibles, de modo que las predicciones se encuentran asociadas al posible error asociado a la predicción. Estos métodos se basan en la autocorrelación espacial (no debe confundirse con el término correlación) es decir, la correlación de una variable con ella misma.



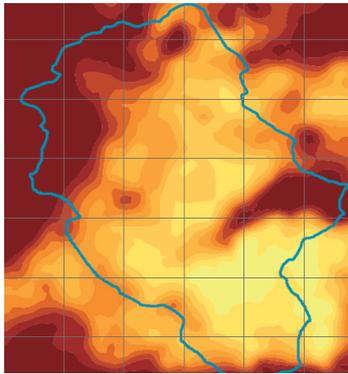
**Figura 15** Densidad Kernel



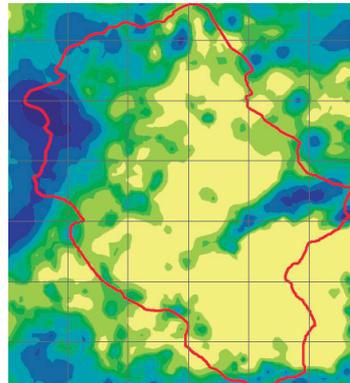
**Figura 16** Distrib. Pmax 24H



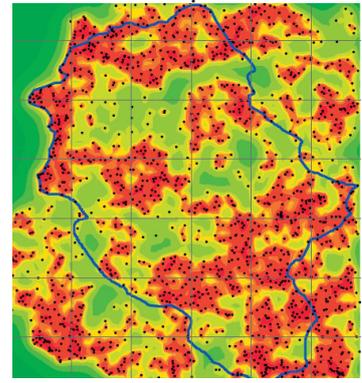
**Figura 17** Kriggeado simple



**Figura 18** Probab. P>100 mm



**Figura 19** Pmax 20% Probab.



**Figura 20** Distribución de errores

## Conclusiones

En este artículo se ha presentado una síntesis de las posibles aplicaciones de los SIG en el cálculo de parámetros hidrológicos, de interés como insumo para la modelización de sistemas hídricos y fluviales de distintos grados de complejidad.

La asociación existente entre la hidrología y los sistemas de información geográfica resulta ser sinérgica, y se posibilita la automatización de tareas, se obtiene una mejor precisión en el cálculo de parámetros hidrológicos, se optimizan las salidas gráficas y, por lo tanto, las herramientas SIG representan un notable incremento en la productividad de los estudios e investigaciones hidrológicas.

## Referencias

Lopardo, Raúl, A (1995). "El Ingeniero Hidráulico del Siglo XXI" *Revista Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num. 4.*

Morad, Munir; Triviño Pérez, Alejandro (2001) Sistemas de Información Geográfica y Modelizaciones Hidrológicas: Una aproximación a las Ventajas y dificultades de su Aplicación. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles A.G.E. N.º 31 - 2001*, págs. 23-46

Maidment, D. R (1996) GIS and Hidrological Modelling – An Assessment of progress. · International Conference on GIS and Enviromental Modelling. New México USA

Dal-Ré Tenreiro, Martínez Álvarez, Victoriano (2003) Pequeños Embalses de Uso Agrícola. Editorial Mundi-Prensa

Martínez Álvarez, Victoriano (2006). Determinación del Tiempo de Concentración con Sistemas de Información Geográfica. *Revista Ingeniería del Agua* N° 13.

Martínez de Azagra, Andrés; Navarro Hevia, Joaquín (2007) Hidrología Forestal: El Ciclo Hidrológico. Editorial Universidad de Valladolid

López Cadenas de Llano, Filiberto (1994) Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Tragsatec. Editorial Mundi-Prensa

Galván, Lucrecia; Infante, Claudia, Goitea, Iber, Duro; Javier, Candelero, Fabián;

Quiroga, Daniel (2102), el SRTM 90 m de la NASA,.- Aplicación para Santiago del Estero. IX CODINOA

Referencias web:

Instituto Geográfico Nacional de Argentina, IGN MDE-Ar

<http://www.ign.gob.ar/category/tem%C3%A1tica/geodesia/mde-ar>

Consortium for Spatial Information CGIAR CSI <http://srtm.csi.cgiar.org/>

United States Geological Survey USGS, Earth Explorer <http://earthexplorer.usgs.gov/>

# Aplicación de Sistemas de Información Geográfica al Estudio de la Evolución Morfológica de Ríos de Llanura

Hector Daniel Farias <sup>1</sup>, Jorge Prieto Villarroja <sup>1,2,5</sup>, Alfredo Fabián Reuter <sup>3</sup>, Lucas Gerardo Domínguez<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Hídricos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago del Estero.

<sup>2</sup> Delta – Phi. Estudio de Ingeniería Hidráulica, Fluvial y Ambiental. Santiago del Estero. <sup>3</sup> Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (INSIMA). Facultad de Ciencias Forestales. Santiago del Estero <sup>4</sup> CONICET. FICH-UNL, Santa Fé, Argentina

Contactos: [jorgeprietovillarroja@yahoo.com.ar](mailto:jorgeprietovillarroja@yahoo.com.ar) (2)

---

## RESUMEN

**Este trabajo analiza una serie de casos en los que se desarrolló una metodología particular (que se estima replicable a otros casos de ríos de llanura) para estimar una escala de grados de estabilidad fluvial, basada en la aplicación de técnicas de percepción remota, fundamentalmente apoyadas en el uso de Sistemas de Información Geográfica, análisis multi-temporal de imágenes satelitales e información hidrológica complementaria. Se ha desarrollado un procedimiento metodológico que permite mapear e identificar movimientos del cauce a través del tiempo, lo que posibilita la definición de un índice para poder caracterizar la mayor o menor actividad de procesos erosivos y la definición de posibles sitios de emplazamiento de las obras, zonas de divagación lateral de cauces y espacio de movilidad fluvial. El trabajo presenta ejemplos de aplicación, características de la metodología aplicada, ventajas y limitaciones, información necesaria y resultados obtenidos**

**Palabras clave: Ríos, Evolución Morfológica, Migración Lateral.**

---

## 1. Introducción

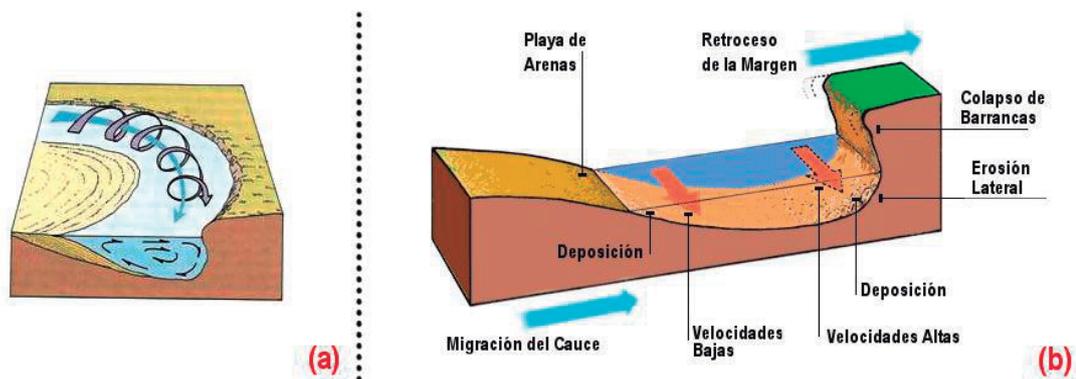
Los ríos de llanura tienden a desarrollar una conformación en planta de carácter meandriforme. Esta geometría planimétrica es consecuencia de la interacción de la corriente fluvial con complejos procesos morfológicos de erosión de márgenes en la región cóncava de las curvas, sedimentación en la región convexa, que evolucionan permanentemente a través de migraciones laterales (y longitudinales) del curso del río. Es importante caracterizar estos procesos evolutivos para optimizar el diseño de obras civiles en el ambiente fluvial, tales como caminos, puentes o cruces de conductos, o bien actividades productivas, como agricultura y ganadería.

Los cursos aluviales exhiben habitualmente patrones de alineamiento planimétrico que tienden a seguir un trazado de tipo curvilíneo, materializado a través de secuencias de curvas y contra-curvas en un tren zigzagueante y continuo (Yalin & Silva, 2001). Esta

configuración adquiere a través de la interacción de la corriente fluvial (un flujo tridimensional) con complejos procesos de erosión de márgenes en la región cóncava de esas curvas, sedimentación en la región convexa, que finalmente se manifiestan en la forma de migraciones laterales (y longitudinales) a través de la planicie aluvial del curso del río (Julien, 2002).

La importancia de estos procesos morfológicos es altamente significativa desde la perspectiva práctica (Rocha, 2009), y su estudio y cuantificación es un tópico de indudable interés para la ingeniería fluvial (Chang, 1988). El objetivo fundamental radica en poder reunir elementos cuantitativos de análisis que permitan inferir estas tendencias de evolución morfológica, con la finalidad de planificar con cierta racionalidad actividades humanas en el ambiente fluvial, tanto sobre el cauce principal como sobre su planicie de inundación asociada. El diseño de obras civiles tales como caminos, puentes o cruces de conductos, o bien actividades productivas, tales como agricultura y ganadería, impone la necesidad de conocer el comportamiento de los cauces que interactúan con estas intervenciones humanas sobre el medio natural (Farias, 2005; Rocha, 2009). Sin embargo, la complejidad de los fenómenos físicos involucrados y el escaso nivel de conocimiento actual de los mecanismos asociados a ello hacen muy dificultosa la cuantificación precisa de estos fenómenos, fundamentalmente los referidos a las tasas de migración de los cursos (Constantine et al., 2009).

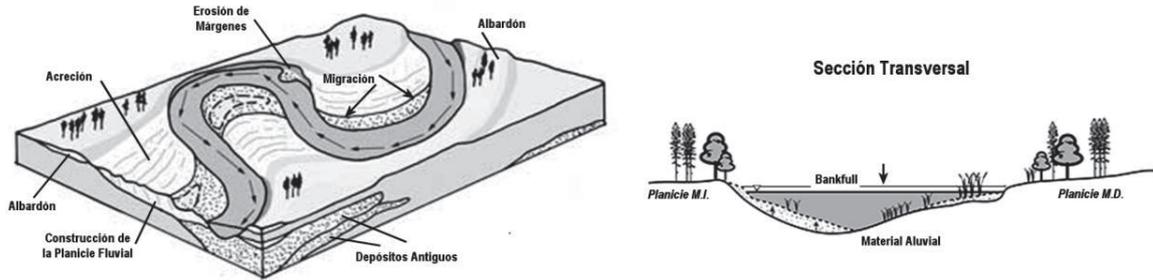
En tal sentido, el uso creciente de técnicas SIG combinadas con imágenes satelitales de alta resolución, ha contribuido al desarrollo de metodologías simplificadas, de modo tal de poder enfocar el problema en un primer nivel de aproximación, al menos en la cuantificación de las tasas de migración que permitan la aplicación de modelos más o menos sofisticados para predecir el comportamiento morfo-dinámico de tramos de ríos aluviales teniendo en cuenta variables y parámetros hidrológicos, geomorfológicos, hidráulicos, sedimentológicos, geotécnicos, edafológicos y botánicos (Schumm, 1977; Knighton, 1984).



**Figura 1.** Esquema del proceso de erosión de márgenes en un meandro

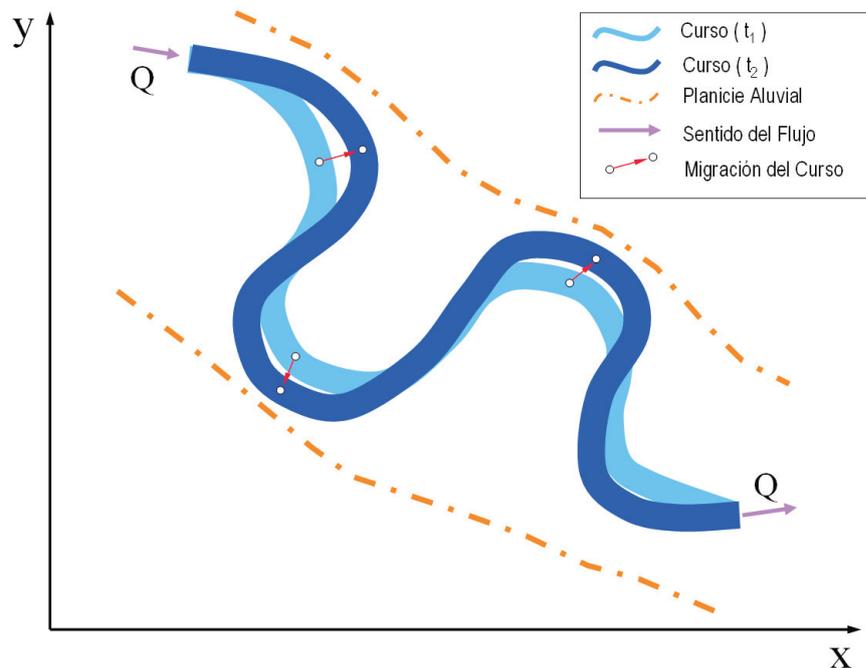
## 2. Caracterización geométrica de los proceso de migración lateral

En las siguientes figuras se muestra se presenta un esquema de la sección de un río (sistema 'cauce-planicie') y se consignan los niveles característicos que es necesario considerar en el análisis.



**Figura 2.** Esquema de migración de un río meandriforme e indicación del umbral de desborde o bankfull

Considérese un tramo "T" de un río de llanura, cuyo patrón de alineamiento en planta es de tipo meandriforme, tal como el que se esquematiza en la Figura 2, en la que se supone que el flujo discurre de izquierda a derecha



**Figura 3.** Migración de un curso entre dos instantes de tiempo  $t_1$  y  $t_2$

### 3. Materiales y métodos

La utilización de tecnologías de percepción remota es una herramienta de gran valía para el mapeo de ríos y elaboración de cartografía digital de base para el estudio de las características morfológicas de sistemas fluviales. Estas técnicas se han desarrollado considerablemente durante las últimas cuatro décadas (Brice 1975; Deb et al 2012), y en la actualidad se puede disponer de manera relativamente fácil y expeditiva de estos recursos a través de Internet.

En los casos tratados en este trabajo, se usaron imágenes satelitales de distintos orígenes y resoluciones. Para cada una de ellas, uno de los aspectos fundamentales lo constituye la fecha de captura de cada una, lo cual permite conocer la condición hidrológica del río en el instante correspondiente. Este aspecto permite catalogar las imágenes y se puede simbolizar como  $IM_{t[Q(h)]}$ , donde IM: imagen; t: tiempo (fecha); Q: caudal; h: tirante (o nivel del flujo). Es decir, cada imagen (IM) está asociada a un instante t, en el cual escurre por el río un caudal Q con un nivel del flujo h. En la Figura 4 se presenta un esquema de la sección de un río (sistema 'cauce-planicie') y se consignan los niveles característicos que es necesario considerar en el análisis de ríos.



**Figura 4.** Esquema de la sección transversal de un río de llanura con los niveles característicos.

Para el análisis multi-temporal de imágenes (que permite visualizar la evolución de un curso fluvial (desde el punto de vista planimétrico) a lo largo de  $\Delta t$  años ( $t_2-t_1$ )), se recomienda la compilación de varias escenas, de las que deberán seleccionarse las más representativas en cuanto a los criterios de resolución, cobertura nubosa, fechas y condición hidrológica asociadas. En cuanto a este último aspecto, debe procurarse que las condiciones hidrológicas en el río correspondan aproximadamente a caudales dominantes, asociados a niveles de la superficie libre próximos al umbral de desborde o "bankfull" (Chang, 1988; Garde & Ranga-Raju, 1985)

## **4 Metodología**

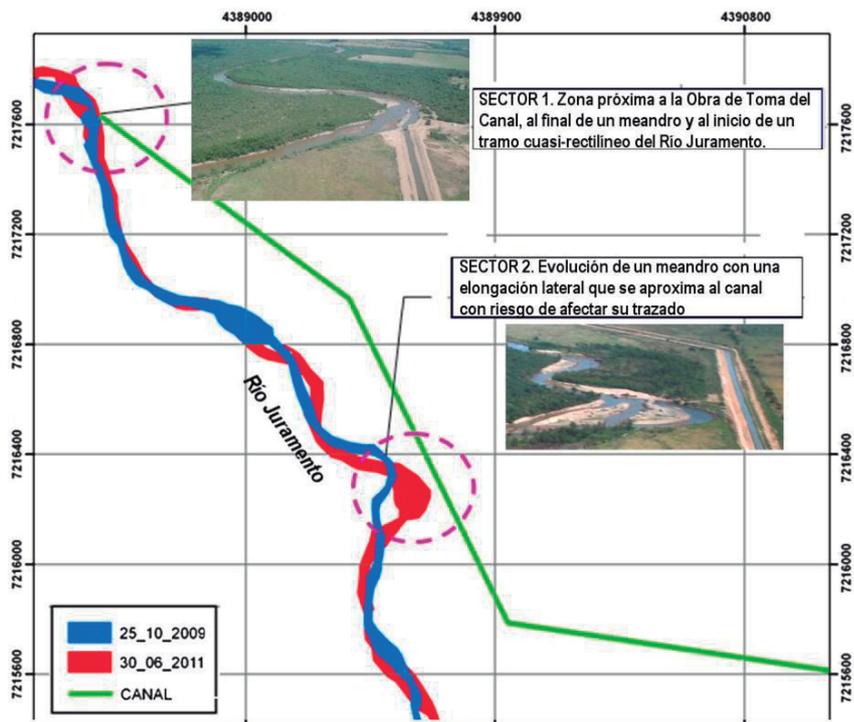
### **4.1 Desarrollo Metodológico**

Una vez compiladas las escenas, y luego de su geo-referenciación y procesamiento primario, se procede a la digitalización de las trazas de los cauces activos detectados y luego llevar a cabo la superposición para la evaluación de los desplazamientos relativos y las tasas de migración observadas entre los años analizados. El análisis posterior consistió en identificar las áreas de superposición de las trazas de flujo activo, asignándoles valores crecientes de frecuencia en la medida que crecieran los eventos de superposición. En efecto, un área que haya sido ocupada por tres polígonos superpuestos en otros tantos años, indica que en esos años las zonas de flujo activo del cauce se ubicaron en ese sector. De esta manera, resulta evidente que este criterio se puede usar como un indicador de la presencia del cauce activo un determinado número de ocasiones a lo largo del intervalo de tiempo analizado, y por lo tanto, un indicador de estabilidad fluvial en ese sector (Brice, 1982). Si se observan los tramos de ríos analizados, puede visualizarse que en la mayoría de los segmentos meandriformes, las formas de los bucles no siguen geometrías sencillas, sino más bien resultan ser combinaciones de diferentes clases de patrones simples, tales como los propuestos por Brice en su clasificador

No es objeto del presente estudio indagar en la geometría de las curvas, sino simplemente identificar los movimientos (laterales y longitudinales) del curso fluvial, para detectar sectores de alta inestabilidad así como también otros de moderado equilibrio dinámico (e.g., Schumm 1977; Yalin & Ferreira 2001). El resultado final del procesamiento indica la escala de estabilidad codificada en colores del verde (mínimo) al rojo (máximo) [  $1 < F < F_{\max}$  , donde  $F$  es la frecuencia]. El valor absoluto de la frecuencia máxima ( $F_{\max}$ ) dependerá del número final de escenas que se hayan seleccionado para ser incluidas en el análisis de cada uno de los casos. Teniendo en cuenta las escalas de tiempo involucradas, las cuales deberían ser de un orden de magnitud equivalente a las vidas útiles de las obras u acciones que se planifiquen en el entorno fluvial del segmento de curso analizado, se recomienda que el valor de  $F_{\max}$  se ubique en el rango de 10 a 20, aunque no hay una regla fija en este sentido, y, desde el punto de vista práctico, la mayor disponibilidad de escenas consideradas le otorgará un mayor rango a  $F$ .

### **4.1 Casos de Aplicación**

Para la aplicación del procedimiento se han seleccionado seleccionaron cuatro casos de estudio, ubicados sobre tramos de ríos característicos de la región chaqueña, como el Juramento-Salado y el Bermejo. Los mismos corresponden a sectores donde se planean obras o proyectos de intervención sobre el cauce. En el caso del Río Juramento en proximidades de la localidad de Gaona (Figura 5) se aplicó la metodología sobre un tramo en el que el río había experimentado una evolución significativa, afectando terrenos productivos (ganadería) y erosionando y descalzando una obra de toma (sector 1) para un canal sobre la margen izquierda, cuya integridad se veía afectada por el avance del desplazamiento de la margen por migración lateral (sector 2).



**Figura 5.** Río Juramento en Gaona, Salta

En la Figura 5 sólo se muestra el producto final del análisis indicando las posiciones del cauce en dos instantes (años 2009 y 2011). Puede observarse que se trata de un segmento de actividad morfodinámica significativa, con desplazamientos por migración lateral muy importantes, especialmente en el sector. El mapa de todo el tramo permite apreciar la magnitud de los procesos de erosión de márgenes e identificar los sectores para planificar intervenciones tales como obras de protección y control de erosión, así como también adecuaciones hidráulicas en ciertos lugares.

En la Figura 6 se muestra el otro tramo estudiado del Río Salado, en las proximidades del paraje denominado Cruz Bajada, en la zona limítrofe entre las provincias de Salta y Santiago del Estero. En este caso, la finalidad del estudio estaba orientada a la identificación de sectores del curso fluvial dinámicamente estables, propicios para el emplazamiento de un azud nivelador para derivación de caudales hacia zonas clave en el marco del sistema hidráulico de aprovechamiento del Río Salado en Santiago del Estero, como Canal de Dios, Canal de la Patria y Embalse Figueroa. Para ello, se analizó un tramo de aproximadamente 15 km de longitud, y en la Figura 7 se presenta el resultado final del análisis. Se indica la escala de frecuencias calculadas sobre la base de siete escenas seleccionadas, cubriendo un rango temporal de 18 años de actividad morfodinámica del río. Obviamente, los sectores con  $5 < F < 7$  son los que se muestran como más estables, y proporcionan un criterio de referencia para la selección de los sitios probables para el emplazamiento de la obra de derivación.

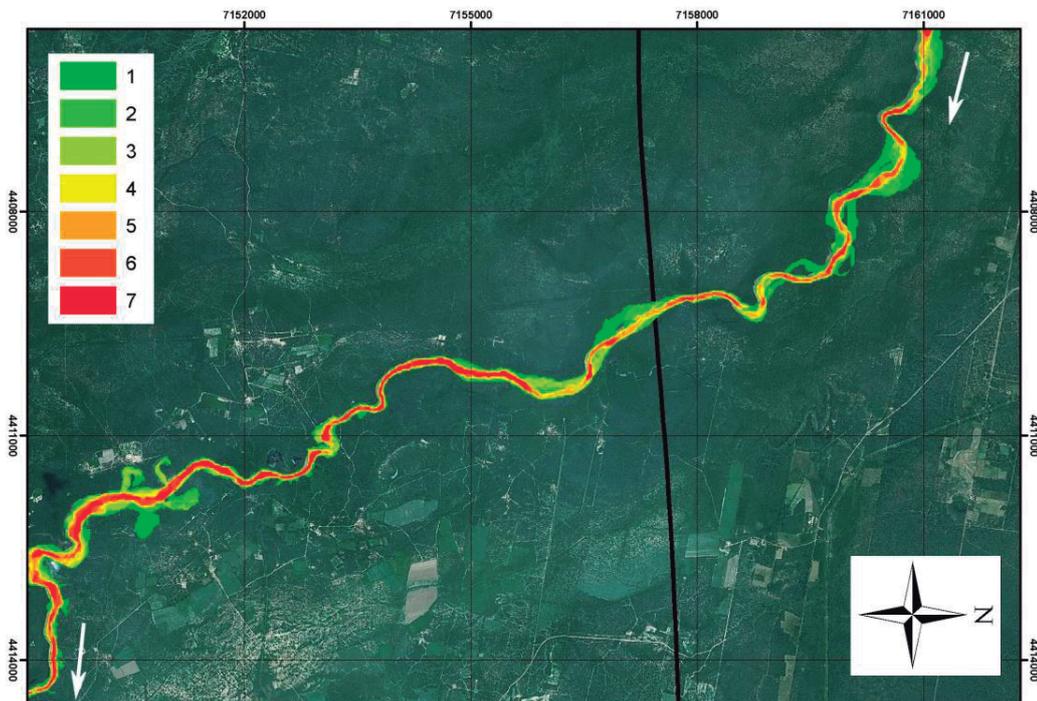


Figura 7. Río Salado en Cruz Bajada, Santiago del Estero (S1)

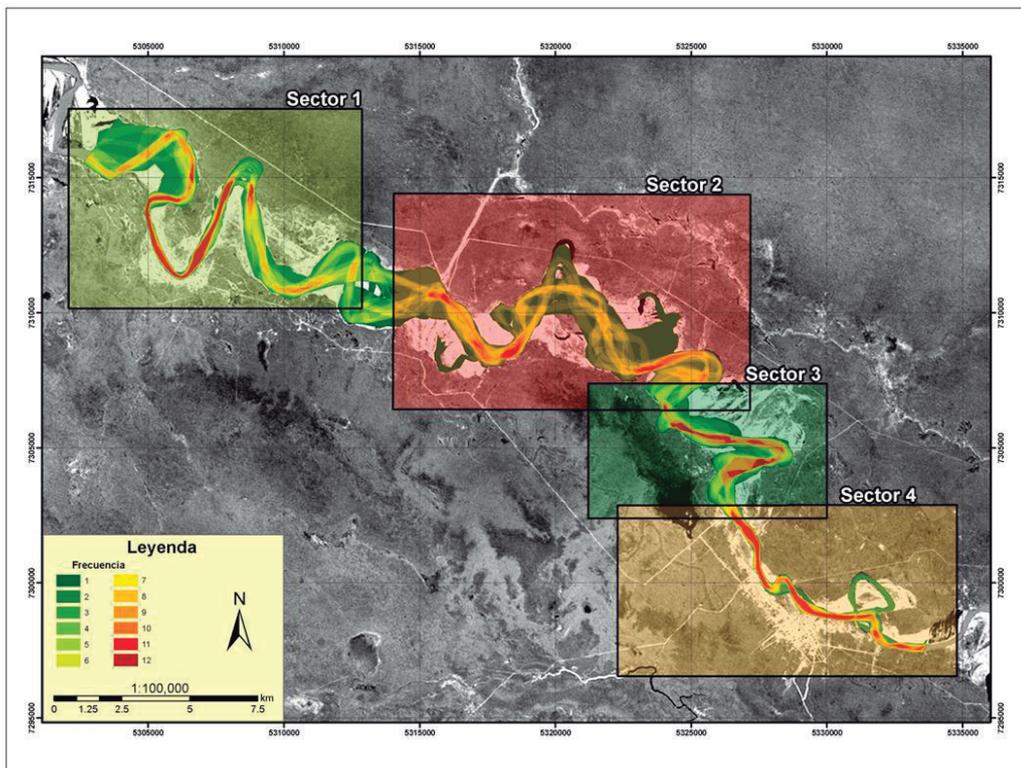


Figura 8. Río Bermejo en Laguna Yema, Formosa (B2)

En la Figura 8 se indica un tramo estudiado en el Río Bermejo en el área de Laguna Yema, Provincia de Formosa (sitio B2). El mismo se ha segmentado en cuatro sectores a los efectos del análisis. La finalidad era la de identificar un conjunto de sitios propicios para implantar una obra de toma lateral para alimentar el canal de aducción al Embalse Laguna Yema. Para el análisis multitemporal de imágenes, que permitiera visualizar la evolución del curso fluvial (desde el punto de vista planimétrico) a lo largo de 22 años (1988-2010), se compilaron alrededor de 50 escenas, de las cuales fueron usadas finalmente 12. El resultado final del procesamiento se presenta en la Figura 8, con la escala de estabilidad codificada en colores del verde (mínimo) al rojo (máximo) [ $1 < F < 12$ , en este caso, donde  $F$  es la frecuencia]. Se superponen los trazos vectoriales sobre la imagen general del tramo global, ubicándose los 4 sectores de análisis. Teniendo en cuenta el criterio de frecuencia considerado, los segmentos más estables resultan aquellos (de forma elongada) que resulten más próximos al máximo (rojo) y, en particular, los sectores que se ubiquen más cercanas a las zonas extremas del curso son los que evidencian mayor estabilidad de márgenes. En este caso, para conferirle flexibilidad al criterio, se consideraron “tramos dinámicamente estables” a aquellos con un índice  $F$  de 10 a 12. Es decir, los que corresponden a situaciones en las que el curso activo dominante experimentó una frecuencia de ubicación en un dado sector de 10 a 12 para el período considerado (1988-2010).

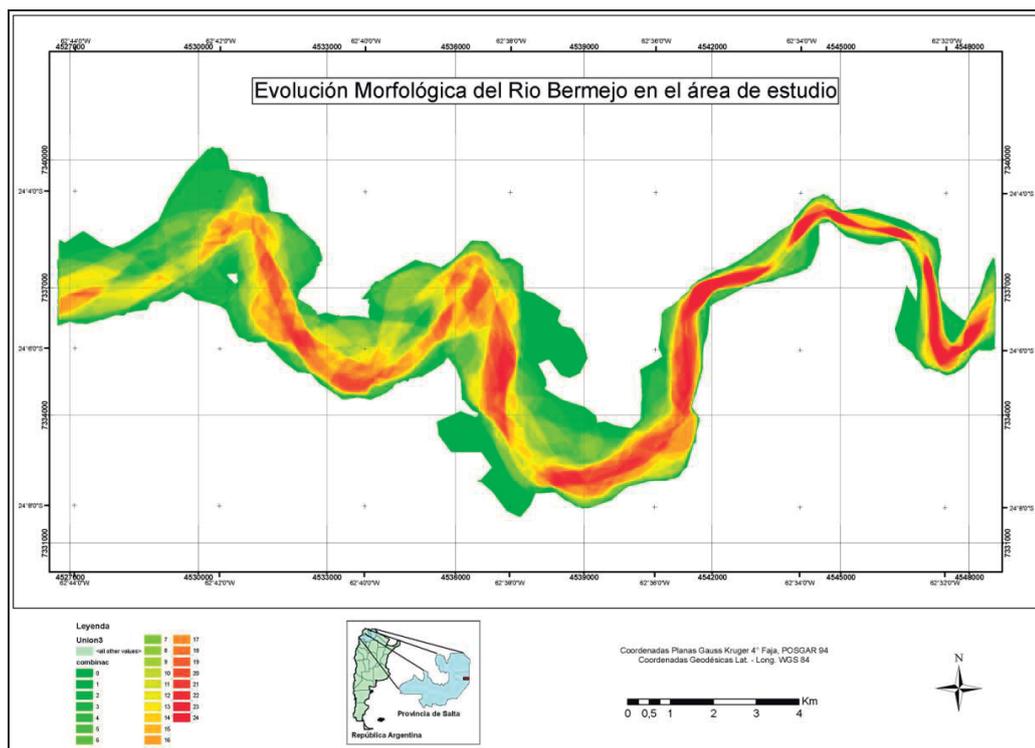


Figura 9. Río Bermejo en Rivadavia, Salta (B1)

El último caso que se presenta corresponde a un tramo del Río Bermejo en cercanías de la localidad de Rivadavia, en la provincia de Salta, próxima a la zona limítrofe con Chaco y Formosa (Figura 9, zona B1). En esa zona se estudió el posible emplazamiento de una obra de toma sobre la margen derecha, para derivar aguas a un canal que alimentara al sub-sistema del Río Bermejito, un sub-sistema de gran importancia regional para proveer del recurso hídrico a las comunidades rurales enclavadas en una franja de territorio de gran extensión. En este caso, luego de compilar alrededor de 60 escenas cubriendo un rango temporal de 24 años, se seleccionó  $F_{\max} = 24$ . Los resultados indican que los sectores ubicados en el sub-segmento más estable (segundo meandro, ubicado en el sector más al sud del tramo) aparecen como los más convenientes para el emplazamiento de la futura obra de toma, sujetos a la decisión final impuesta por las restricciones topográficas (altimetría dominante respecto a la zona a comandar con la derivación) y geotécnicas (aptitud para fundaciones y resistencia a la erosión de las márgenes en el sector).

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha introducido una metodología basada en la aplicación de técnicas de percepción remota y SIG (Sistemas de Información Geográfica), particularizadas en el análisis multitemporal de imágenes satelitales, y la inclusión de un criterio para estimar una escala de grados de estabilidad fluvial lateral (asociada a procesos evolutivos de erosión de márgenes y migración de meandros). A partir de estas herramientas, se han presentado las pautas para el análisis fluvio-morfológico de tramos de ríos aluviales, con la finalidad de definir zonas propicias para el emplazamiento de obras de toma para derivación de caudales.

La metodología propuesta, basada en un criterio de frecuencia de localización del cauce activo a lo largo de un lapso asociado a una escala de tiempo comparable con la vida útil de obras de tomas libres, se ha aplicado a varios tramos meandriformes. Se estima que la metodología propuesta resulta replicable a otros casos de ríos de llanura con características fluvio-morfológicas comparables a los considerados en este trabajo. El criterio desarrollado constituye un elemento de ayuda para identificar segmentos dinámicamente “estables” en ríos meandriformes caracterizados por una “alta inestabilidad”, es decir, sistemas proclives a evolucionar a través de procesos de migraciones laterales y longitudinales del curso fluvial. Cuando se ha aplicado como aspecto a tener en cuenta para definir el emplazamiento de obras sobre el cauce, el método ha mostrado que no siempre es posible ubicar las obras rigurosamente en la sección de máximo índice de estabilidad (en el sentido definido con el criterio aquí presentado), puesto que hay otros factores que operan como restricciones adicionales (por ejemplo, características geotécnicas de las márgenes y del sustrato). En virtud de ello, debe considerarse a la metodología propuesta como un criterio cuantitativo objetivo de primera aproximación para definir zonas con “distintos grados de estabilidad lateral” (considerando sólo la forma en planta, incorporando en parte la hidrología –a través de los niveles asociados a cada escena considerada- y haciendo completa abstracción de aspectos relevantes, tales como geotécnica y vegetación). Por lo tanto, este criterio sólo debería servir como un elemento adicional de ayuda a la toma de decisiones en cuanto al posible emplazamiento de obras o actuaciones con medidas

estructurales (y no-estructurales) para ríos con características fluvio-morfológicas comparables a los casos tratados.

## Referencias

Brice, J. C. (1975). "Airphoto interpretation of the form and behavior of alluvial rivers." *Final Report to the U.S. Army Research Office*, Washington, D.C.

Brice, J. C. (1982). "Stream channel stability assessment." *Report no. FHWA/RD-82/021, Federal Highway Administration*, Washington, D.C.

Chang, H. H. (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. J. Wiley and Sons, New York, USA.

Deb, M., Das, D. & Uddin, M. (2012). "Evaluation of Meandering Characteristics Using RS & GIS of Manu River". *Journal of Water Resource and Protection*, 2012, 4, 163-171.

Farias, H.D. (2005). "Geometría Hidráulica de Ríos de Llanura. Enfoques Analíticos considerando la Influencia de las Márgenes". *Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Neuquen, Argentina. [[http://irh-fce.unse.edu.ar/TC/TC\\_Farias\\_Forma\\_en\\_Planta.pdf](http://irh-fce.unse.edu.ar/TC/TC_Farias_Forma_en_Planta.pdf)]

Farias, H.D., Reuter, A.F. & Dominguez Ruben, L.G. (2011). "Determinación de Tramos Estables en Ríos de Llanura para definir el Emplazamiento de Obras sobre el Cauce". *Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2011*, Resistencia, Chaco, Argentina.

Garde, R.J. & Ranga-Raju, K.G.R. (1985). *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. (2nd edition) Wiley Eastern Ltd., 618 pages [ISBN 0-85226-306-6].

Julien, P. Y. (2002). *River Mechanics*. Cambridge University Press, United Kingdom.

Knighton, D. (1984). *Fluvial Forms and Processes*. Arnold Publ. & J. Wiley and Sons, London, UK.

Leopold, L. B., Wolman, M. G. & Miller, J. P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. Dover Publications, Inc. New York, USA.

Rocha Felices, A. (2009). "La Morfología Fluvial y su Incidencia en la Estabilidad de las Obras Viales". *VII Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial*. Academia Peruana de Ingeniería, Lima, Perú (<http://www.apiperu.com/Articulos/Fluvial.pdf>)

Schumm, S. A. (1977). *The Fluvial System*. Blackburn Press, UK & USA.

Yalin, M.S. & Ferreira Da Silva, A.M. (2001). *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

# Evaluación de emergencias ambientales mediante el uso de la percepción remota y los SIG: las inundaciones del año 2015 en el sudeste de la provincia de Santiago del Estero

Hugo Raúl Zerda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de SIG-SIGL@b, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero

Contacto: [hzerda@unse.edu.ar](mailto:hzerda@unse.edu.ar) (1)

---

## RESUMEN

Durante el inicio del año 2015 llovió copiosamente en el sudeste de la provincia de Santiago del Estero, una región con características de planicie con sistemas hidrológicos no típicos que conforman un área de riesgo de inundación ante eventos extraordinarios de precipitaciones pluviales. La percepción remota satelital, con su posibilidad de registro de amplias extensiones y vigilancia temporal continua o monitoreo, como el manejo de la información resultante mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitieron evaluar las inundaciones sobre un área de investigación con cerca de 3 millones de ha. Estas tecnologías y metodologías, permiten además contar con información en los tiempos necesarios para gestionar diversas tareas, tanto para atenuar los problemas en el terreno, como para la gestión política de subsidios para los sectores afectados. El estudio mostró la distribución espacial de las 435.947 ha inundadas y permitió realizar la correspondiente cartografía para el organismo de gobierno provincial responsable.

Palabras clave: inundaciones, MODIS, SIG.

---

## 1. Introducción

El agua cubre aproximadamente el 74% del planeta Tierra y en ningún lugar del universo conocido por el hombre, existe tal abundancia. Casi el 97% del volumen de agua se encuentra en los grandes océanos salinos, y solo cerca del 0,02% del agua está presente en ríos de agua dulce, lagos y reservorios; el resto está en los acuíferos subterráneos (0,6%), en la atmósfera como vapor de agua (0,001%) y en forma de hielo (2,2%) (Jensen 2007). Estas grandes magnitudes en superficies y volúmenes, hacen que para su estudio deba recurrirse a tecnologías como la percepción remota, mediante la cual puede estudiarse el recurso agua desde grandes distancias, p.ej. mediante sensores montados en satélites, mediante imágenes que permiten cubrir grandes superficies. La posibilidad de tomar imágenes en forma repetitiva de una misma porción del planeta, permite el seguimiento temporal de fenómenos como las inundaciones. Por ello existen programas de mapeo global de inundaciones mediante imágenes MODIS (NRT Global MODIS Flood Mapping) de la NASA (NASA 2015), que permiten a organizaciones internacionales y nacionales contar con valiosa información para atender las urgencias que suceden en fenómenos como las inundaciones.

El período comprendido entre los meses de diciembre 2014 y febrero 2015 fue de lluvias extraordinarias en el sudeste de la Provincia de Santiago del Estero. Debido a

ello el Ministerio de la Producción, Recursos Naturales, Forestación y Tierras, de esa provincia solicitó al SIGL@b el análisis del estado hidrológico, de los Departamentos declarado en Emergencia y Desastre por el Senado de la Nación Argentina, y en estado de Emergencia Agropecuaria y Climática por el Gobierno Provincial. El estudio permitió apoyar gestiones de la Provincia de Santiago del Estero ante el Gobierno Nacional, para la obtención de recursos económicos ante la emergencia, ayuda prevista por leyes que atienden el estado de emergencia como en este caso.

## 2. Objetivos y limitaciones del estudio

El objetivo de este trabajo fue determinar las áreas inundadas de los Departamentos en emergencia durante el mes de marzo del año 2015, a través de la detección de los cuerpos de agua sobre el terreno. Las limitantes del presente estudio son: i) alta nubosidad en el período de estudio, ii) escasa disponibilidad de imágenes satelitales ópticas. Por lo que, las fechas a utilizar son las más cercanas en el tiempo del fenómeno indicado, convenientemente seleccionadas por el estado atmosférico.

También, la baja resolución espacial del sensor MODIS utilizado, 250 metros presentaría inicialmente limitaciones para la determinación de superficies, aunque la cobertura de toda el área en emergencia se cubre con una muy pequeña porción de escena captada por este sensor, lo cual es una gran ventaja para en casos de emergencias ambientales. La alta resolución temporal dada por los 4 registros diarios de los satélites TERRA/AQUA que portan el sensor MODIS, facilita el seguimiento de fenómenos que como las inundaciones, requieren registros de la situación con alta periodicidad.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el sector sudeste de la provincia de Santiago del Estero, con siete departamentos: Aguirre, Avellaneda, Belgrano, Gral. Taboada, Mitre, Rivadavia, Salavina, los cuales abarcan en total 2.757.900 ha (IGN 2015). El “Estado de Emergencia” es producto de declaraciones del Senado Nacional y el Gobierno Provincial e indicadas con anterioridad.



**Figura 1.** Área de estudio: sudeste de la provincia de Santiago del Estero.

Para cumplir con el objetivo indicado anteriormente, se utilizaron imágenes satelitales del satélite TERRA, captadas por el sensor multiespectral MODIS. Estos datos satelitales provienen de la base de datos pública del proyecto de la Agencia Espacial de los EEUU (NASA), denominado “Sistema Respuesta Rápida de MODIS”, y accesible a través de Internet en: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/rapid-response/modis-subsets>.

Los sensores MODIS instalados en el conjunto de satélites TERRA y AQUA, y a modo de una constelación registran la superficie terrestre en fajas de 2.330 Km. de ancho, dos veces al día cada uno de ellos. El satélite TERRA a las 10:30 a.m. hora local y el satélite AQUA a las 14:30 p.m. hora local, aproximadamente. En este estudio se utilizó un producto multiespectral de 3 bandas espectrales (1, 2, 7), del 8 de marzo del 2015, el producto con menor nubosidad sobre el área de emergencia (Tabla 1). Estas mismas bandas espectrales son utilizadas por el programa de la NASA para el mapeo global de inundaciones mediante un algoritmo que automatiza las detecciones (Nigro et al. 2014). También Jensen (2007) indica la conveniencia de utilizar imágenes de estas porciones del espectro electromagnético para la diferenciación entre agua y tierra.

**Tabla 1.** Características de los canales espectrales del sensor MODIS.

Banda espectral	Región del espectro	Resolución espacial
1	Visible	250 m
2	Infrarrojo cercano	250 m
7	Infrarrojo cercano	500 m

También, se utilizaron imágenes del satélite LANDSAT 8, captadas por el sensor multiespectral OLI, para reconocer en mayor detalle las áreas a muestrear en la clasificación digital y controlar las áreas clasificadas. Las imágenes del sensor OLI, satélite LANDSAT 8, poseen una resolución espacial de 30 metros en el modo multiespectral, cerca de 65 veces superior que las imágenes del sensor MODIS, por lo cual permiten detectar y discriminar menores elementos del paisaje, motivo del uso como control en este trabajo.

**Tabla 2.** Características de las bandas espectrales del sensor OLI del satélite LANDSAT 8 utilizadas.

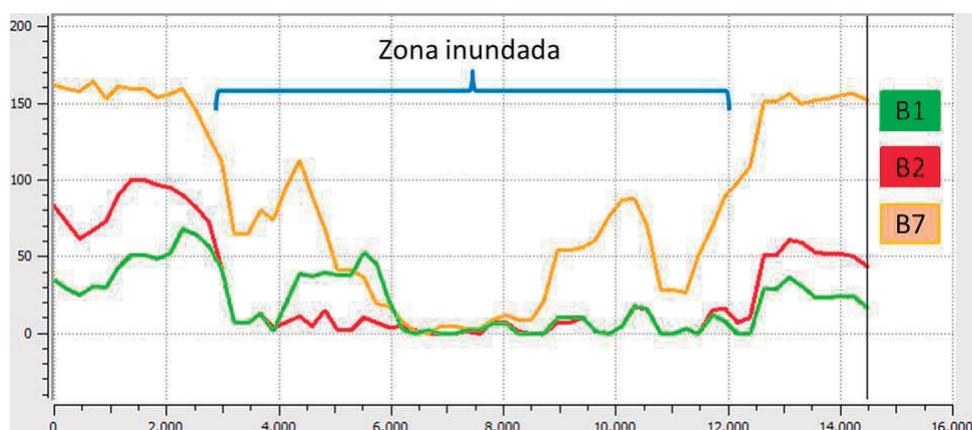
Banda espectral	Región del espectro	Resolución espacial
4	Rojo	30 m
5	Infrarrojo	30 m
6	Infrarrojo de onda corta	30 m

Este material de propiedad de la Agencia Espacial de los EEUU (NASA), es de libre y gratuita distribución a través del banco de Datos Earthexplorer del Servicio Geológico de los EEUU (USGS) en: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Las escenas se identifican como: LC82280802015009LGN00 y LC82290802015096LGN00, para las coordenadas WRS2 228/080 del sistema LANDSAT.

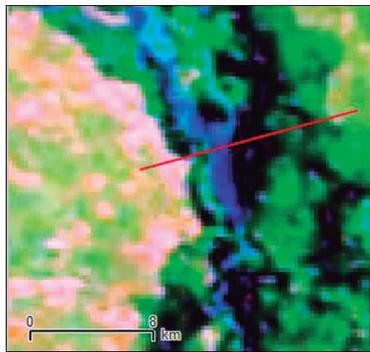
Para la cartografía base, se recurrió a la Base de Datos Geográficos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la República Argentina, disponibles en los servidores institucionales en: <http://www.ign.gob.ar/sig>, de donde se descargaron las siguientes capas de información geográfica: i) límites provinciales y departamentales, ii) centros poblados, iii) red vial y iv) cursos de agua.

Los archivos en formato shape (shp) de intercambio entre sistemas de información geográfica (SIG), fueron procesados mediante el software libre QGIS, extrayendo las capas para el ámbito provincial y los departamentos declarados en emergencia.

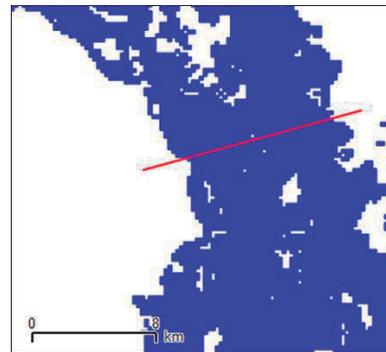
La capa de área inundada se obtuvo de la imagen MODIS TERRA de fecha 08.03.2015, debido a que de la colección de escenas existentes era la que no presentaba nubosidad en el área de emergencia. Se extrajeron muestras multispectrales de diversos tipos de cuerpos de agua y áreas inundadas: i) bañados del Río Dulce -con y sin vegetación hidrófila-, ii) de la laguna de Mar Chiquita, iii) de bajos y cañadas naturales anegadas en los Deptos. Belgrano y General Taboada, iv) de anegamientos con patrones geométricos -campos anegados-, v) vegetación en áreas inundadas, bañados del río Dulce. De esta manera se cubrió el rango espectral del fenómeno, con sus diversos tipos de cuerpos de agua y áreas inundadas/anegadas, profundidades y características diversas, para realizar la clasificación multispectral. El criterio de selección de las áreas de muestra para la clasificación es de singular importancia, ya que requiere de documentos de resolución adecuada al esquema de clasificación (p.ej.: fotografías aéreas, imágenes satelitales de alta o media resolución), especialmente el conocimiento de la zona y de las características del fenómeno en estudio en ella, al efecto de contar con las estadísticas de los tipos de sub-clases (variabilidad interna) presentes en la clase que se desea mapear (Richards & Jia 1999). El mapa raster generado por la clasificación de la imagen MODIS fue transformado a formato vectorial (shp) y modelado en el ambiente SIG con las otras capas de información (IGN).



**Figura 2.** Perfiles espectrales de las bandas de MODIS, remarcando la región a clasificar como zona inundada.



MODIS 721-RVA



Área inundada

**Figura 3.** Región de la imagen MODIS clasificada, mostrando el transecto de los perfiles espectrales de la Fig. 2.

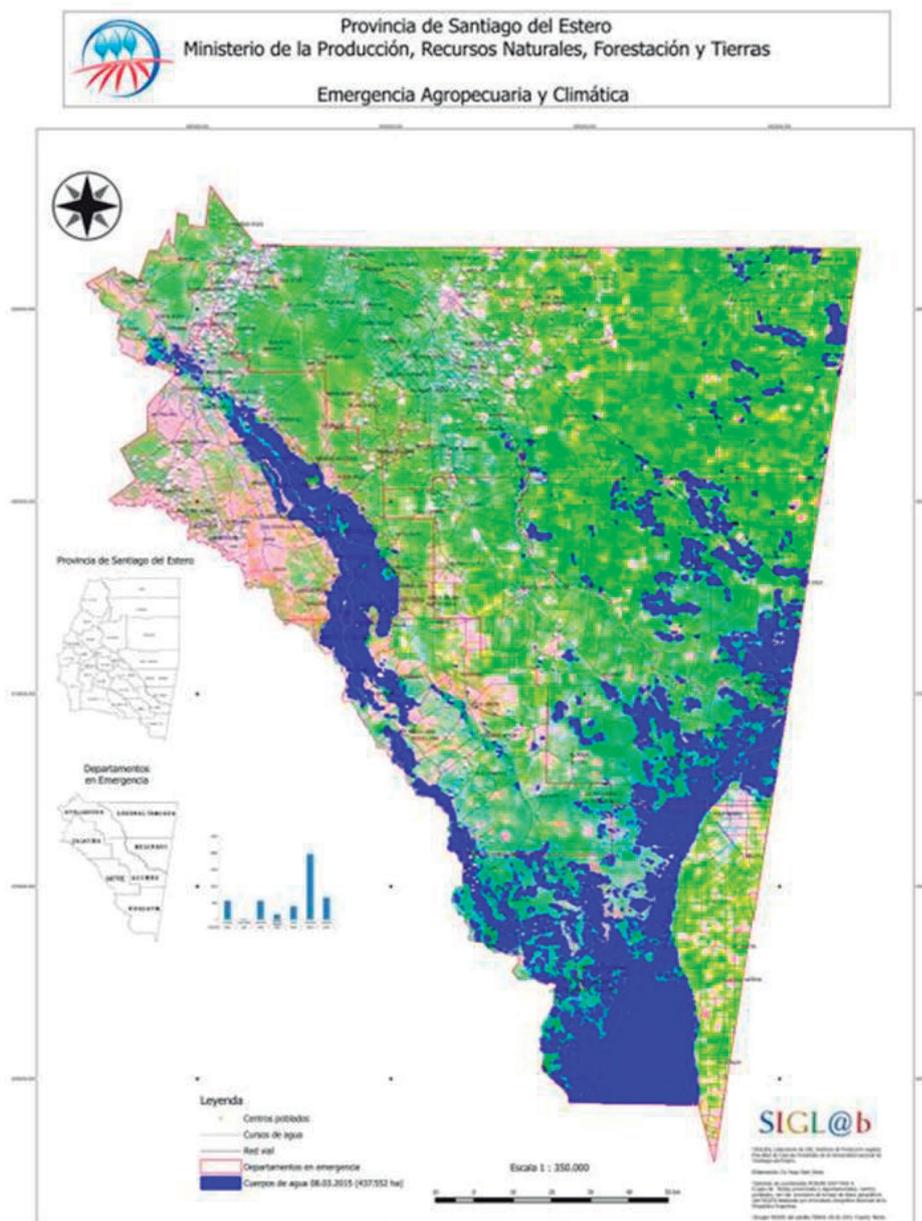
#### 4. Resultados y discusiones

La clasificación multispectral la imagen MODIS utilizada permitió generar el mapa de cuerpos de agua, que presentó una superficie total de 453.947 hectáreas. Producto de la organización de los antecedentes cartográficos oficiales del Instituto Geográfico Nacional (IGN), se obtuvo la base para generar las estadísticas finales; mediante el uso de operadores SIG se obtuvo el mapa de cuerpos de agua y otras áreas inundadas, cruzando luego informaciones con el mapa de Departamentos (Tabla 3).

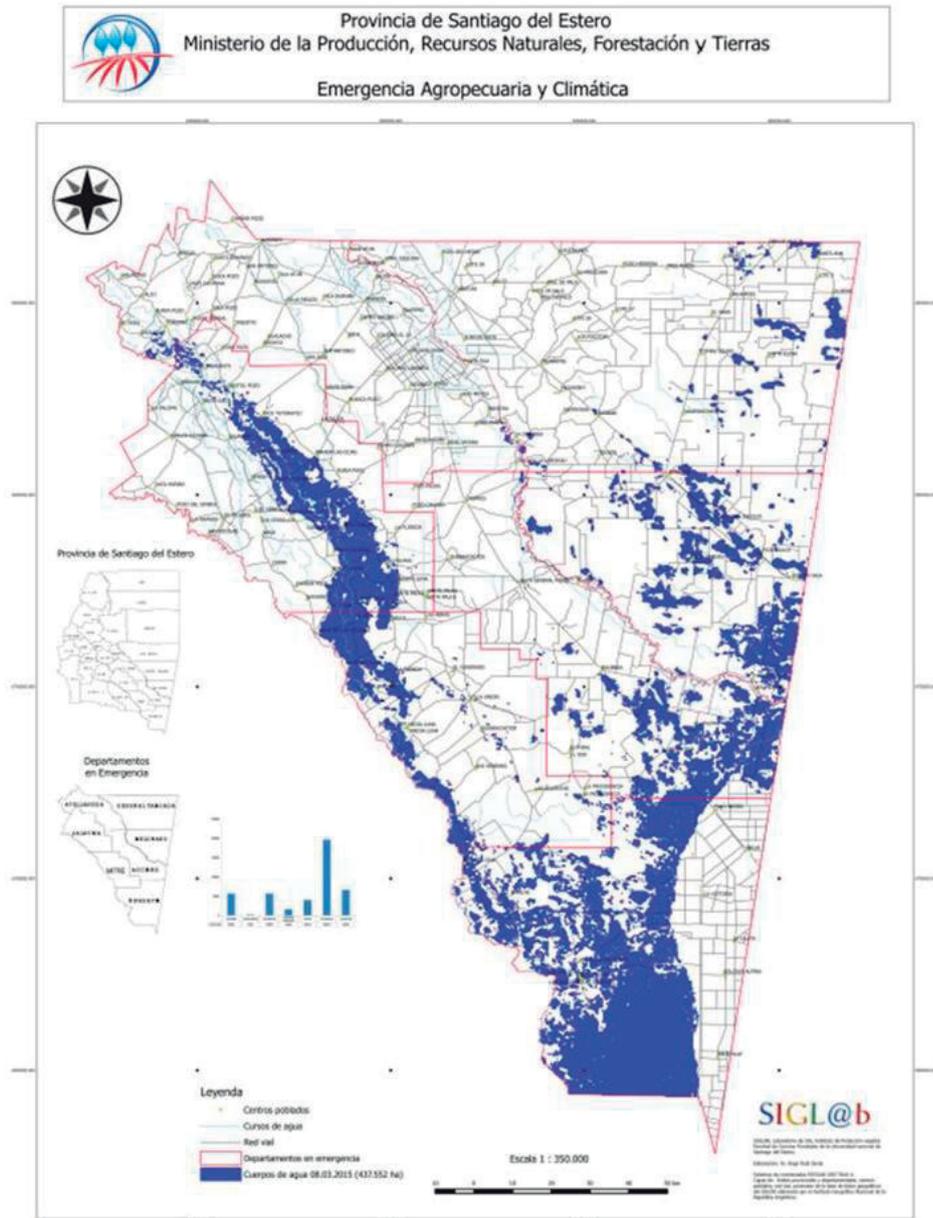
**Tabla 3.** Magnitudes y distribución espacial de los cuerpos de agua mapeados (Fecha: 08.03.2015).

Departamento	Superficie (ha)	Inundado (ha)	Inundado (%)
Aguirre	369.200	56.955	15,4
Avellaneda	390.200	1.934	0,5
Belgrano	331.400	57.089	17,2
Gral. Taboada	604.000	16.303	2,7
Mitre	366.700	40.414	11,0
Rivadavia	340.200	196.517	57,8
Salavina	356.200	66.735	18,7
<b>Total</b>	<b>2.757.900</b>	<b>435.947</b>	<b>15,8</b>

Los resultados cartográficos se resumen en dos mapas, uno con base en escenas MODIS y modelado mediante los datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y otro solamente con las capas vectoriales (cuerpos de agua, cursos de agua, centros poblados y red vial).



**Figura 4.** Mapa derivado de la escena MODIS TERRA, con superposición de diversas capas de información del Instituto Geográfico Nacional.



**Figura 5.** Mapa de cuerpos de agua y superposición de diversas capas de información del Instituto Geográfico Nacional.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

La información satelital permitió una rápida estimación de fenómenos de gran amplitud territorial como la inundación estudiada. La característica multispectral provee información adecuada para la determinación de cuerpos de agua y su posterior utilización en un ambiente SIG, al efecto del análisis espacial comparativo entre las diversas capas de información disponibles.

Según la información de centros poblados del IGN, los departamentos Salavina y Mitre presentan el mayor número de poblaciones en inmediaciones del Río Dulce, cuya área de derrame se ha incrementado en gran forma. Esta información en momentos de máxima de la inundación debería ser compilada con otras fechas, al efecto de definir diversas zonas de peligrosidad en función de variables como precipitación y caudales derivados por los ríos provinciales que también aportan a estas áreas inundadas.

Las áreas agrícolas en esta región se concentran en Belgrano y Gral. Taboada, por lo que contar con relevamientos y estadísticas de cultivos permitirá bordar estados de emergencia con cifras precisas para las posteriores gestiones y políticas de rescate económico, y ayuda en general como en esta ocasión.

Es de gran importancia para la provincia el poder contar con un sistema de monitoreo de esta región, de gran productividad agropecuaria, como también de importancia ambiental al ser continuidad del sitio RAMSAR Mar Chiquita, por lo que se sugiere la implementación del mismo, el cual debería hacer un uso intensivo de imágenes satelitales de diversos tipos, desde ópticas hasta de microondas (Radar) que permitan atender estas emergencias y también la planificación territorial general de la zona.

## **6. Agradecimientos**

A la Facultad de Ciencias Forestales y a la Universidad Nacional de Santiago del Estero que financia el proyecto de investigación Cód. 23/B131. Al Ministerio de la Producción, Recursos Naturales, Forestación y Tierras, de la Provincia de Santiago del Estero, por confiar la realización de este trabajo al SIGL@b.

## **7. Referencias**

IGN (2015). Instituto Geográfico Nacional. Proyecto SIG 250. En: <http://www.ign.gob.ar/sig> Acceso: 23.03.2015.

Jensen, J. R. (2007). Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Prentice Hall series in geographic information science; 2 edition.

NASA (2015). NRT Global MODIS Flood Mapping. En: <http://oas.gsfc.nasa.gov/floodmap/index.html> Acceso: 01.10.2015

Nigro, J.; Slayback, D.; Policelli, F.; Brakenridge, R. G. (2014). NASA/DFO MODIS Near Real-Time (NRT) Global Flood Mapping Product. Evaluation of Flood and Permanent Water Detection. Science Systems and Applications, Inc., NASA GSFC, Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado. Oct. 14, 2014.

Richards, J. A. & Jia, X. (1999). Remote sensing digital image analysis. Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York.

# Estudio mediante percepción remota y SIG de los patrones espaciales de deforestación en los departamentos: Moreno y Figueroa de la provincia de Santiago del Estero, Argentina.

Maria Yisell Mazur <sup>1</sup>, Hugo Raul Zerda <sup>2</sup>

*1 Estudiante avanzada de Lic. en Ecología y Conservación del Ambiente; Facultad de Ciencias Forestales (FCF), Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Argentina*

*2 Laboratorio SIGL@b, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago del Estero. Contactos: [piachip14@gmail.com](mailto:piachip14@gmail.com) (1), [hzerda@unse.edu.ar](mailto:hzerda@unse.edu.ar) (2)*

---

## Resumen

Argentina se encuentra en el décimo lugar entre los países con mayor pérdida de cobertura forestal, durante la década 1990-2000. La mayor superficie deforestación ocurrió en el norte del país, particularmente en Santiago del Estero. El monitoreo satelital es un componente de importancia en el control este fenómeno, por ello el objetivo de este trabajo fue explorar la dinámica de la deforestación en dos departamentos de la provincia de Santiago del Estero (Moreno y Figueroa) y especialmente en los años 2014-2015, mediante procedimientos de la percepción remota y los SIG. Los datos satelitales de base fueron imágenes OLI LANDSAT 8 (2014 y 2015). Los mapas resultantes permitieron determinar la distribución espacial y los patrones espacio-temporales de la deforestación, todo ello mediante el software libre. De las imágenes LANDSAT 8 se derivó que durante el periodo 2014 y 2015 la deforestación creció en 43.506 ha. En el departamento Figueroa la deforestación presenta: a) un patrón lineal de deforestación que coincide con las poblaciones y siguiendo la infraestructura de los canales de riego del río Salado; b) lotes mayores agrupados en el suroeste, área de riego del Río Dulce, c) lotes medianos en el noroeste. En el departamento Moreno, el patrón de la deforestación tuvo una tendencia inicial de crecimiento desde el sector este a oeste y cubrió la totalidad del departamento, produciendo la gran fragmentación del bosque nativo, quedando grandes fragmentos aislados en el este.

**Palabras claves:** bosque, deforestación, fuego, Chaco argentino.

## 1. Introducción

El mundo posee poco menos de 4000 millones de hectáreas de bosques, que cubre alrededor del 30 por ciento de la superficie terrestre mundial. La pérdida forestal neta a nivel mundial es de 7,3 millones de ha/año, lo que equivale a 20.000 hectáreas por día (FAO 2007).

El proceso de pérdida de bosques nativos en Argentina se ha acelerado durante los últimos 10 años. Según datos de la (UMSEF 2007) entre 1987-1998 y 1998-2002 se deforestaba a una tasa de 180.000 y 235.100ha/año, respectivamente,

mientras que en las últimas dos décadas alcanzó los 6,45 millones de ha (AGN 2013).

En términos absolutos, la Argentina se encontraba en el noveno lugar entre los países con mayor pérdida de cobertura forestal, durante la década 1990-2000 (FAO 2007) y actualmente está en el noveno lugar según el estudio del período 2010-2015 también realizado por FAO (2015).

Los bosques chaqueños en Argentina cubren aproximadamente 20,7 millones de ha, y presentan altas tasas de deforestación (SAYDS 2012), la mayor de ella ocurrió en el norte del país, particularmente en Santiago del Estero, Salta y Chaco (Collazo et al. 2013). Durante el período 2002-2006, la deforestación continuó en aumento: 123% en Salta, 83% en Santiago del Estero, 56% en Formosa y 14% en Chaco, por encima del periodo anterior (Volante et al. 2006, 2012; UMSEF 2007).

La Provincia de Santiago del Estero, presentaba al año 1998 una superficie de tierras forestales de 8,31 millones de ha, de las cuales 6,28 millones de ha corresponden a bosques en diversos estados de aprovechamiento (SAYDS, 2005). Aquí el proceso de deforestación tuvo sus inicios a principios de la década de los 80, con la apertura del sector oeste provincial a proyectos agrícolas de grandes extensiones, y sobre la base en el cambio de uso de la tierra basado en la eliminación de la cubierta de bosques nativos (Zerda 1991), también se ha caracterizado la dinámica del fuego, como el mayor agente de degradación de la vegetación nativa (Zerda 1991). A finales de los años 90 comienza una segunda etapa del proceso, expandiéndose a casi toda la provincia, favorecida por el incremento de las precipitaciones en los extremos este y oeste, limítrofes con regiones más húmedas (Zerda y Moreira 2001). De acuerdo con el análisis efectuado por la SAyDS, la pérdida de bosque nativo en la provincia de Santiago del Estero se debió principalmente al avance de la frontera agropecuaria, en especial a nuevos cultivos de soja (AGN 2013).

Argentina cuenta con varias experiencias de ordenamiento territorial pero hasta el momento no ha sancionado una ley integral. Uno de los principales antecedentes es el denominado Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos (OTBN) a través de la Ley Nacional No. 26331/2007, que establece "los presupuestos mínimos de protección ambiental para el enriquecimiento, la restauración, conservación, aprovechamiento y manejo sostenible de los bosques nativos y de los servicios ambientales que éstos brindan a la sociedad". Es la primera experiencia a nivel nacional de ordenamiento territorial que regula cambios en el uso del suelo, aunque la provincia de Santiago del Estero ya contaba con la Ley Provincial No. 6841 de conservación y uso múltiple de áreas forestales, que establece una zonificación con once categorías y los porcentajes de deforestación permitidos.

Sin embargo los resultados de la zonificación realizada por provincias del norte argentino sugieren que no han resultado consistentes debido al bajo nivel de concordancia en la categorización de sus bosques (Collazo et al. 2013). El mismo autor indica algunas de las fallas cometidas por la provincia, en la categoría II. Santiago del Estero ha flexibilizado los usos permitidos, admitiendo cambios de uso del suelo y aprovechamientos silvopastoriles, reduciendo la superficie destinada a la conservación y manejo sostenible a un porcentaje menor del 50% de lo asignado inicialmente. La provincia utilizó información con un nivel de detalle

menor que otras, y la superficie de protección que incorpora es nula (Collazo et al. 2013).

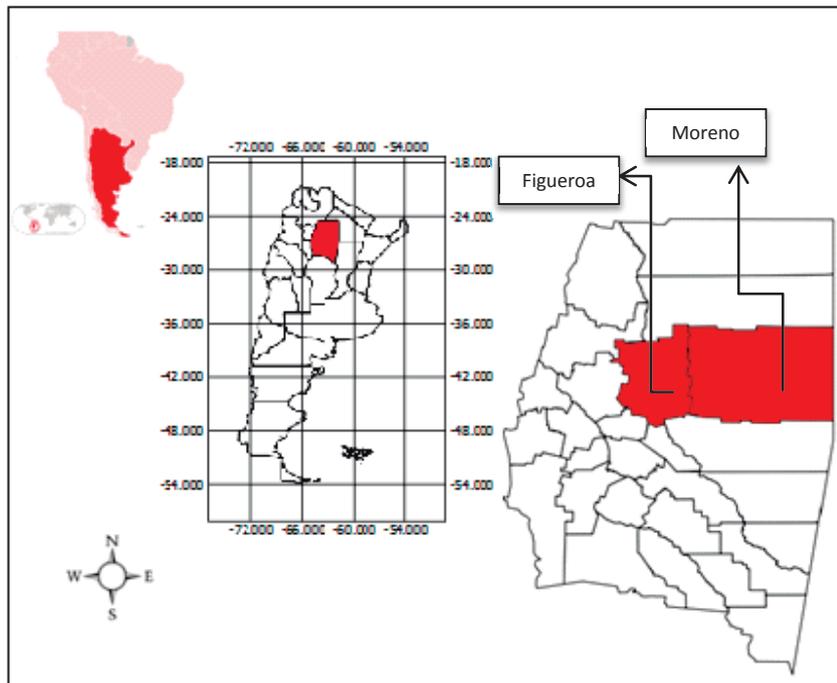
En este marco desfavorable para los bosques nativos, la percepción remota satelital y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden jugar un rol trascendente en el control de las actividades del uso y cambios en las coberturas del suelo, debido a que permite analizar grandes áreas a lo largo del tiempo.

El objetivo principal de este trabajo fue analizar el avance de la deforestación en el período 2014 a 2015 en los departamentos Moreno y Figueroa, de la provincia de Santiago del Estero; como objetivo secundario, se buscó ubicar y relacionar este período dentro de las series temporales disponible sobre deforestación.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Área de estudio

Los departamentos Moreno y Figueroa se encuentran en el centro este de la provincia de Santiago del Estero (**Figura 1**), poseen en conjunto una superficie total de 22.822 km<sup>2</sup>, siendo Moreno el departamento de mayor superficie.



**Figura 1.** Área de estudio: Dpto. Moreno y Figueroa, Provincia de Santiago del Estero, Argentina.

La selección de estos Departamento para efectuar la investigación, parte de considerar la estructura poblacional contrastante, entre los minifundios en Figueroa y los grandes emprendimientos agropecuarios en Moreno.

## 2.2. Digitalización y monitoreo

El software Libre QGIS versión 2.12.0-Lyon es un software que permitió la lectura, transformación y estandarización geométrica, visualización, análisis y almacenaje de los datos relacionado con el espacio físico para la obtención de nuestros resultados geoespaciales.

Los lotes deforestados durante el periodo 2014 a septiembre 2015 fueron digitalizados manualmente por interpretación visual de imágenes OLI LANDSAT 8 432-RVA, imágenes que se importaron y reproyectaron a POSGAR 2007 faja 4, el sistema de referencia de coordenadas correspondiente el área investigada. La información se digitalizó de las escenas:

- LC82290792015256LGN00 (229/079)
- LC82280792015249LGN00 (228/079)
- LC82300792015231LGN00 (230/079)

Cada periodo anual de deforestación se representó mediante las capas de polígonos correspondientes. El criterio utilizado para definir los lotes deforestados mediante interpretación, fue considerar la interrupción de la continuidad espacial del bosque con evidencias de la acción humana, representadas con formas regulares y límites definidos. Es importante considerar que “las transformaciones debidas a los agentes naturales como por ejemplo los incendios, presentan formas irregulares, elipses individuales o coalescentes” (Zerda 2009), debido a que en la provincia es frecuente utilizar las áreas incendiadas para posteriormente realizar actividades agrícolas y pecuarias, las que luego sí presentan formas regulares, tonos, colores y texturas características. Se calculó la pérdida de superficie boscosa del año 2014 y 2015 mediante el empleo de la herramienta calculadora de campos en QGIS para obtener el área de todos los polígonos, obteniéndose finalmente la sumatoria total anual para cada departamento.

Además de la obtención de información utilizando las imágenes OLI LANDSAT 8, para el estudio de los patrones espaciales de la deforestación y actualización se utilizó la siguiente información multitemporal de diferentes fuentes:

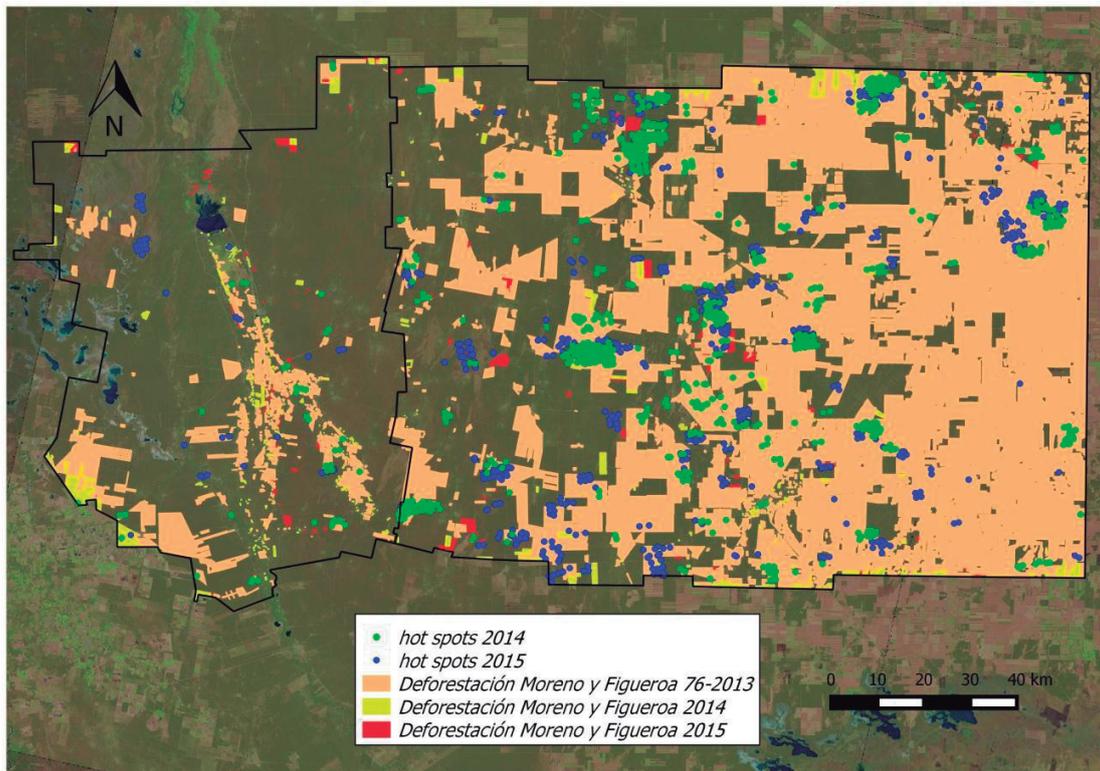
- Colección de polígonos de áreas deforestadas del período 1976-2013 de la región Chaco seco Argentino (formato shapefile) en: <http://www.worldwildlife.org/publications/terrestrial-ecoregions-of-the-world>
- Imágenes satelitales OLI LANDSAT 8 de los años 2014 y 2015, en: <http://www.earthexplorer.usgs.gov>
- Base de asentamientos humanos en el área de estudio, (formato shapefile) en: <http://www.bahra.gob.ar>
- SIG Queimadas (INPE Brasil), puntos calientes derivados del sensor MODIS, de los años 2014 y 2015, (formato shapefile) en: <http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas>

- Base de datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de la República Argentina, Censo Nacional 2010. En: <http://www.indec.gov.ar>

### 3. Resultados

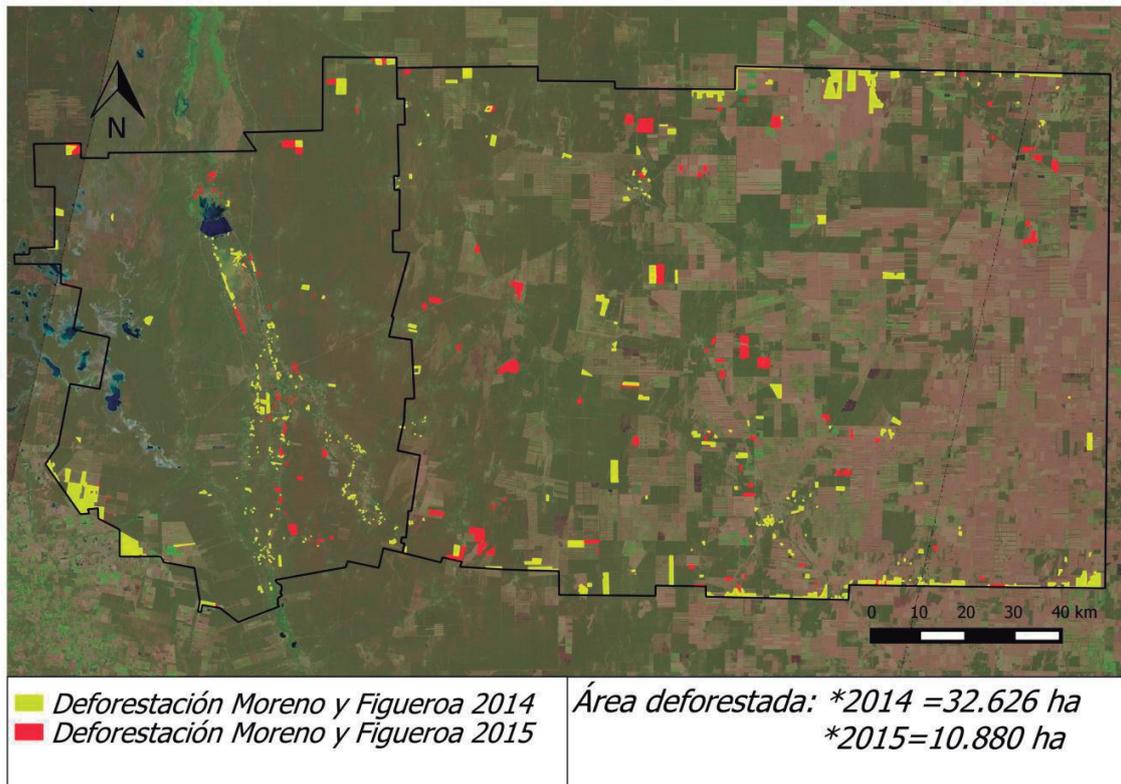
A partir de los polígonos generados por digitalización y actualización, se obtuvieron los resultados cartográficos que se muestran en las **Figuras 2, 3, y 4**. Mediante los mapas se pudo determinar nueva información sobre la pérdida de superficie boscosa y su relación con las detecciones de puntos calientes durante el período 2014-2015.

La Figura 2, muestra la gran superficie deforestada períodos anteriores al 2014-2015, siendo el Departamento Moreno el más afectado. Menor fue el fenómeno en Figueroa, fuertemente localizado en dos zonas: i) sobre la infraestructura hídrica, ii) al suroeste, correspondiente al área de riego del Río Dulce. En el mapa también se observa la distribución de los puntos calientes detectados en los años 2014 y 2015, los cuales indican una posible relación espacial entre el fenómeno del fuego y la pérdida de superficie boscosa. Los puntos calientes más frecuentes, concentrados y en mayor número se presentan en el departamento en Moreno, menor en Figueroa.



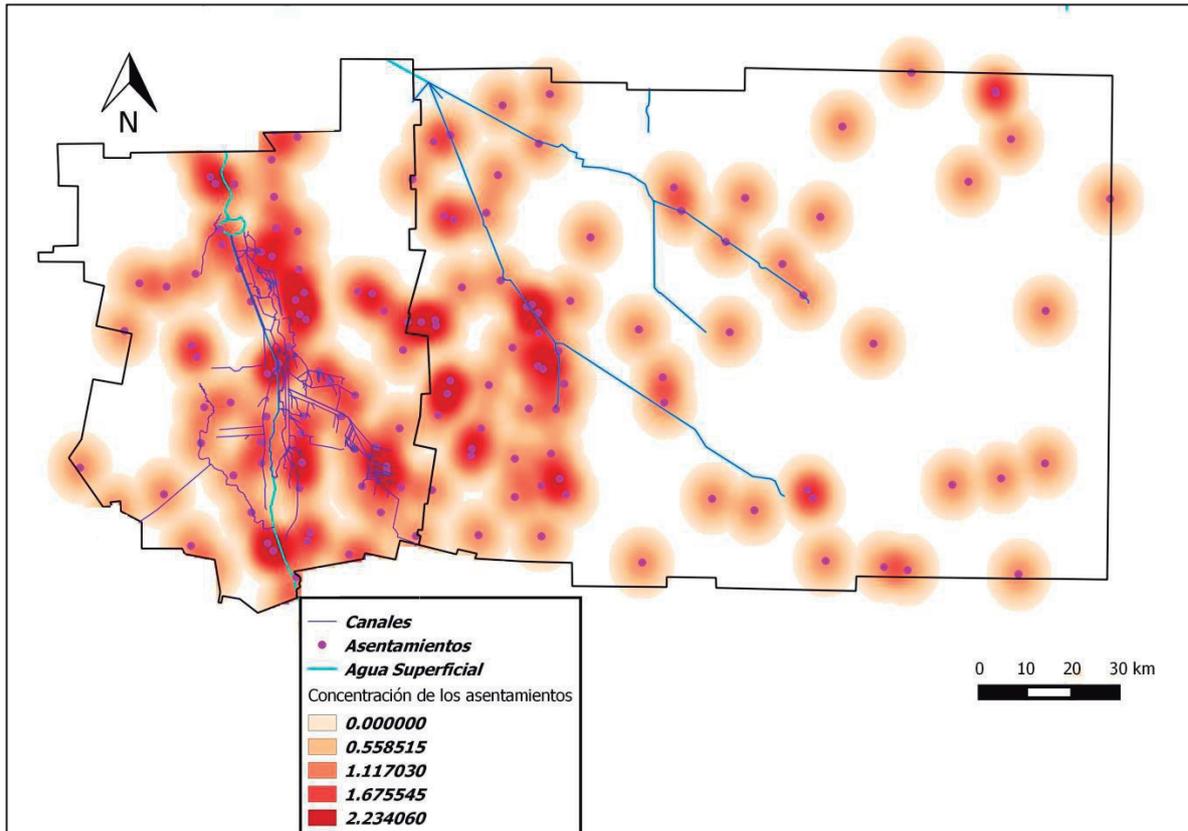
**Figura 2.** Detección de puntos calientes y avance de la deforestación (1976-2015).

En la Figura 3, se puede observar el avance de la deforestación actualizada del periodo 2014-2015, en Figueroa se puede observar dos patrones: i) a lo largo de la infraestructura hídrica, ii) superficies mayores concentradas en la zona de riego del Río Dulce, al sudoeste del departamento y en Moreno se observa al fenómeno en crecimiento en forma menos ordenada, distribuida en toda la superficie departamental con una leve concentración en las zonas limítrofes. El total del área deforestada en la zona de estudio durante el periodo estudiado fue de **43.506 ha**.



**Figura 3.** Área correspondiente a la deforestación para el año 2014 y 2015.

La Figura 4, muestra la distribución de los asentamientos de la población en relación a la disponibilidad de agua, en Figueroa se encuentra ligada a la infraestructura hídrica del Río Salado, como factor de localización; en Moreno la concentración de los asentamientos se da con mayor frecuencia en dos zonas, i) al límite con Figueroa y ii) a lo largo de los canales de riego de La Patria.



**Figura 4.** Distribución de los asentamientos de la población en relación con la disponibilidad de agua (canales y agua superficial).

### **Análisis y evaluación de los resultados**

En referencia a los patrones de deforestación se puede observar en la **Tabla 1**, la densidad poblacional de ambos departamentos en estudio, mostrando que la medida de distribución de la población es mayor en Figueroa que en Moreno, a pesar de la diferencia en sus superficies, Figueroa presenta su población distribuida siguiendo una concentración bastante marcada a lo largo de la infraestructura de riego del departamento y pertenecientes a pequeños productores, por lo cual su densidad poblacional es mayor, mientras que la concentración de los asentamientos en Moreno se encuentran más disperso, aunque la mayoría ubicados al oeste del mismo, como resultado de las áreas ocupados por grandes productores al este.

En cuanto a la superficie deforestada en valores medios y absolutos por departamentos se muestran en la **Tabla 2**, en la cual se puede evidenciar la pérdida de superficie boscosa mayor en Moreno siendo de 21.873ha para el año 2014 y 8.713ha para el año 2015. De acuerdo a los resultados, la superficie deforestada en los departamentos Moreno y Figueroa, correspondieron a 43.506 ha (**Figura 3**).

De acuerdo a los datos obtenidos del último censo (INDEC 2010) y en base a los patrones (espacial y temporal), la densidad poblacional en el departamento Figueroa es mayor que en Moreno (**Tabla 1**), esto se debe a que en el segundo los centro poblados se encuentran distribuidos de forma irregular en toda la superficie (**Figura 4**), en cambio en Figueroa los asentamientos se encuentran agrupados respondiendo a los patrones lineales de los canales de riego. En Moreno se registró la mayor pérdida de bosque siendo de 30.608ha para el año 2014 y parte del 2015 estudiado.

**Tabla 1.** Número de población, superficie y densidad correspondiente a los departamentos en estudio.

	<b>Figueroa</b>	<b>Moreno</b>
Población	17.820	32.130
Superficie	6.695 km <sup>2</sup>	16.127 km <sup>2</sup>
Densidad poblacional	2,6	1,9

**Tabla 2.** Superficies (hectáreas) deforestadas de cada departamento en valores absolutos y valores medios.

<b>Superficie deforestada</b>						
	<b>Año 2014</b>		<b>Año 2015</b>		<b>Año 76-2013</b>	
	Valor medio	Valor absoluto	Valor medio	Valor absoluto	Valor medio	Valor absoluto
<b>Moreno</b>	78,67	21.873	88,15	8.735	101,36	847.538
<b>Figueroa</b>	29,39	10.788	27,85	2.145	109,22	58.980
<b>total</b>	50,27	32.626	65,54	10.880	101,77	906.116

**Tabla 3.** Características distintivas de los departamentos en estudios, en cuanto a la ocupación territorial y detección de fuego.

	<b>Figuroa</b>	<b>Moreno</b>
Ocupación	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Áreas de pequeñas y medianas superficies</li> <li>* Mayor concentración sobre infraestructura de canales de riego dando un patrón lineal</li> <li>* Pequeña concentración al sur oeste del departamento en la zona de riego del Río Dulce.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Áreas de grandes superficies abarcando casi la totalidad de la extensión del departamento</li> <li>* Transformación de la matriz de bosque al uso agropecuario con un avance en sentido este a oeste,</li> <li>* Presenta parches aislados de bosques.</li> </ul>
Fuego	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Los puntos calientes se presentan en menores concentraciones y son coincidentes con la zona de uso agropecuaria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Los puntos presentan mayor frecuencia y concentración</li> <li>* Es utilizado para la limpieza de los campos y producción de pasturas.</li> </ul>

**Tabla 4.** Numero de detecciones de puntos calientes de los años 2014 y 2015, correspondiente a los departamentos en estudio.

<b>Detección de puntos calientes</b>		
	<b>Figuroa</b>	<b>Moreno</b>
2014	55	837
2015	42	579

#### **4. Conclusiones**

Mediante los análisis e interpretación de la composición cartográfica y tablas obtenidas, se puede evidenciar que la deforestación es un fenómeno dinámico que continua en crecimiento.

La distribución espacial de la deforestación en el departamento Figuroa responde a un patrón lineal, que coincide con la distribución de la población, presentando una mayor concentración sobre la infraestructura de canales de riego del Río Salado, en la cual se encuentran los medianos y pequeños productores; otra región concentrada a lo largo de la zona de riego del río Dulce al suroeste del departamento. En el caso de Moreno, se observa que el patrón de la deforestación corresponde a grandes áreas distribuidas por toda la superficie, los cuales pertenecen a grandes productores.

La distribución de los puntos calientes muestra un menor número de detecciones en Figueroa y coinciden con la distribución de la deforestación; en cambio en Moreno presentan un mayor número y densidad en las zonas más deforestadas, lo cual se debe a al fenómeno del fuego se encuentra relacionada fuertemente con la deforestación, debido a la eliminación por quema del material leñoso residual, y luego por la producción de pasturas.

Una vez más se hace visible que la efectividad de los instrumentos de la gestión aplicados hasta la fecha para el control de la deforestación es muy baja, y se debe seguir reforzando las capacidades operativas para prevenir la pérdida y degradación de los bosques nativos.

## Referencias

AGN (2013). Implementación de la Ley 26.331 de Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. Auditoría General de la Nación. En: [http://www.agn.gov.ar/files/informes/2014\\_038info.pdf](http://www.agn.gov.ar/files/informes/2014_038info.pdf)

Collazo MA; Panizza A & Paruelo JM. (2013). Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos: Resultado de la Zonificación Realizada por Provincias del Norte Argentino. Ecología Austral. Vol. 23 No. 2. Córdoba, Agosto 2013, Argentina.

FAO (2007). Situación de los bosques del mundo: Panorama mundial. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Mundial. Roma. En: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/a0773s/a0773s08.pdf>

FAO (2015). Global Forest Resources Assessment 2015. How are the world's forests changing? Roma. En: <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>

INDEC. Atlas Estadístico de la República Argentina. Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina 2010.

SAYDS (2012). Monitoreo de la superficie de bosque nativo de la Argentina. Período 2006-2011. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal, Dirección de Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina.

SAYDS (2005). Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Informe Regional Parque Chaqueño. Proyecto bosques nativos y áreas protegidas BIRF 4085-AR 1998-2001. Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina.

UMSEF (2007). Monitoreo de Bosque Nativo, Período 1998- 2002 y Período 2002-2006 (Datos Preliminares). SAyDS& UMSEF. Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal.

Volante, JN; AR Bianchi; HP Paoli; YE Noé & HJ Elena. (2006). Dinámica del Uso del Suelo Agrícola del Noroeste Argentino Mediante Teledetección y SIG. Período 2000- 2005. INTA. Argentina.

Volante, J; D Alcaraz-Segura; MJ Mosciaro; EF Viglizzo & JM Paruelo. (2012). Ecosystem functional changes associated with landclearing in NW Argentina. Agriculture, Ecosystem&Environment,

Zerda, H.R. (1991): Monitoreo de los desmontes en el NO de Santiago del Estero con el uso de imágenes LANDSAT MSS. En: Resúmenes II Jornadas de Ciencia y Técnica, Universidad Nacional de Santiago del Estero-UNSE, SECyT, Argentina.

Zerda, H.R. y Moreira, M. L. (2001). Superficies afectadas por el fuego en el Chaco Santiagueño. Evaluación mediante percepción remota y sistemas de información. Revista de la SECyT, N° 6 Noviembre del 2001, Universidad Católica de Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina.

Zerda, H. R. (2009). Quemadas e incendios en el proceso de cambios de usos de la tierra en la provincia de Santiago del Estero. p. 275-294. En: Gianuzzo, A. N. y Ludueña M. E. (Eds.) "Cambios y problemas ambientales: perspectivas para la acción". Universidad Nacional de Santiago del Estero, Ed. Brujas. ISBN: 978-987-22475-8-4, 468 p.