

Uso de observaciones satelitales para la delimitación y caracterización de lagunas en el Bajo Río Paraná

Maira Gayol, Natalia Morandeira, Rafael Grimson y Patricia Kandus

Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, 3iA, Universidad Nacional de San Martín

E-mail: mgayol@unsam.edu.ar

RESUMEN

Los humedales de la planicie de inundación del Paraná se expresan como paisajes complejos cuya extensión depende principalmente del régimen hidrológico. El área de estudio se encuentra en Entre Ríos frente a la localidad de Puerto Gaboto y se caracteriza por extensos bajos ocupados con un mosaico de comunidades de herbáceas y gran cantidad de lagunas. La vegetación arraigada y flotante de las lagunas responde rápidamente a disturbios y cambios ambientales. El objetivo de este trabajo fue delimitar las lagunas de un sector de la planicie de inundación del Río Paraná a partir de datos multitemporales Landsat e identificar tipos de laguna de acuerdo a la secuencia de cambios de sus coberturas. A partir del análisis del NDVI de 83 imágenes satelitales ópticas Landsat 5-TM y 8-OLI, se identificaron 303 lagunas con una superficie total de 58,6 km2 (23% del área). Para cada laguna se determinaron parámetros morfométricos y conectividad a cursos de agua. El 97% de las lagunas posee una superficie inferior a 1,3 km² y el 11% está conectado con al menos un curso de agua. En el contexto del pulso de inundación 2010-2011 se caracterizaron las lagunas según el porcentaje de las siguientes coberturas: agua con alta concentración de sedimentos, agua con baja concentración de sedimentos, vegetación verde con agua debajo, vegetación verde sin agua debajo y vegetación senescente. Para ello se realizaron clasificaciones supervisadas en siete escenas Landsat 5-TM que representan diferentes momentos del pulso. Según la sucesión de los porcentajes de coberturas, se definieron ocho grupos de lagunas mediante el algoritmo k-means. El grupo con mayor cobertura espacial (72% de la superficie de lagunas) está compuesto por lagunas vegetadas que presentan con predominancia la siguiente transición: agua con alta concentración de sedimentos, vegetación senescente y finalmente vegetación verde con y sin agua debajo.



INTRODUCCIÓN

Sudamérica es el continente que posee la mayor área de humedales del mundo (> 3.000.000 km²) involucrando más del 20% de su superficie, lo cual está muy por encima del 7% estimado globalmente (Junk, 2013). A su vez, se habla de un continente fluvial, dado que la mayor parte de los humedales están asociados a los cursos de los grandes ríos de Sudamérica: Amazonas, Orinoco y Paraná. El Paraná se trata del único de los grandes ríos del mundo que nace en zonas subtropicales y desemboca en áreas húmedas, con un caudal medio de 17 mil m³ seg⁻¹ (Neiff, 1996; Latrubesse et al., 2005).

En la planicie de inundación del Río Paraná los humedales se expresan como paisajes complejos, cuya extensión depende principalmente del régimen hidrológico. Una de sus características distintivas es la presencia de un gran número de lagunas someras. Estas lagunas son importantes para las actividades productivas de la zona, ya que son zonas de cría de peces comerciales, son utilizadas por el ganado y la oferta de polen de sus cubiertas vegetales se aprovecha para la producción de miel (Borro et al., 2014), además ofrecen una gran diversidad de hábitats para la fauna silvestre. Conocer la distribución de las lagunas y los patrones de cambio asociados a los pulsos de inundación del río permite entender el funcionamiento de la planicie de inundación. Las lagunas también se utilizan como indicadores ya que integran los cambios ambientales y climáticos como así los derivados de las actividades del hombre (Sheng et al., en prensa).

Dada la extensión, complejidad y dificultad de acceso a estos ecosistemas, la teledetección se transforma en una herramienta crítica para su monitoreo a escala de paisaje (Morandeira, 2014). A su vez, la reciente liberación de los datos adquiridos con la serie de sistemas satelitales Landsat (desde 1980 hasta la actualidad), puso en disponibilidad largas series de tiempo de observaciones de la superficie terrestre, con una frecuencia de 16 días y una resolución espacial de 30 metros. Estas series de tiempo permiten que el mapeo y monitoreo de la dinámica de los cuerpos de agua sea viable incluso a una escala global (Sheng et al., en prensa; Bovolo et al., 2013). En el caso del mapeo de cubiertas de la superficie terrestre resulta de interés explotar la disponibilidad de las múltiples observaciones a través del tiempo para reforzar o facilitar la discriminación entre clases de cubiertas (Wheman y Liu, 2015).

Los objetivos del presente estudio son: delimitar las lagunas de un sector de la planicie de inundación del Río Paraná a partir de datos multitemporales Landsat utilizando el método propuesto por Borro et al. (2014) e identificar tipos de laguna de acuerdo a la secuencia de cambios de sus coberturas identificadas con imágenes satelitales ópticas.

Las lagunas de las planicies de inundación, sometidas a inundaciones periódicas, son elementos dinámicos que sufren cambios en su forma y extensión espacial, además se encuentran parcial o totalmente cubiertas por



vegetación. Esto dificulta la discriminación de su entorno y por lo tanto la identificación de sus límites, por ello se vuelve fundamental el análisis de datos multitemporales que permite incorporar en el análisis la variabilidad temporal de las lagunas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio comprende un sector de la planicie de inundación del Bajo Río Paraná (Figura 1). Se encuentra en la provincia de Entre Ríos, Argentina, con una superficie de 254,4 km² (coordenadas centrales: 32° 25' S, 60° 39' O). Se caracteriza por la presencia de cuerpos de agua lacunares con vegetación herbácea arraigada y flotante (Malvárez, 1997). Entre las actividades productivas de mayor relevancia de la zona se destacan la ganadería, la pesca y la apicultura (Baigún et al., 2008). En particular en el área de estudio la ganadería mantiene bajas cargas, lo que la hace de particular interés para el estudio de procesos ecológicos-ambientales.



Figura 1. Área de estudio. **a**. Ubicación del Río Paraná y el área de estudio en Sudamérica. **b**. Detalle del área de estudio en la planicie de inundación del Río Paraná. Imagen Landsat 8 OLI tomada el 04/12/2015 (Path/Row 227-82); la composición RGB es "color real" (R= banda del rojo, G= banda del verde, B=banda del azul).



El régimen hidrológico está dominado por las crecidas del Río Paraná. El pulso de inundación del Paraná se caracteriza por fases de aguas altas (con un caudal de hasta $25.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) que ocurren entre octubre y marzo, con el pico principal hacia el final del verano (marzo); y por fases de aguas bajas (con caudales menores $16.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) entre abril y septiembre, con un pico relativo entre junio y julio (Figura 2a) (Marchetti y Aceñolaza, 2012; Borro et al., 2014). Además durante los eventos El Niño la planicie se ve sometida a inundaciones extraordinarias.

En el presente trabajo se considerará el pulso de inundación que tuvo lugar entre noviembre de 2009 y enero de 2011 (Figura 2b). Este pulso comenzó en la fase final de un niño moderado (http://ggweather.com/enso/oni.htm).



Figura 2. Nivel hidrométrico del Río Paraná en el puerto de Diamante. **a**. Altura media mensual del Río Paraná en el puerto de Diamante en el período 1987-2015. El recuadro gris señala el pulso de inundación 2010-2011. **b**. Detalle del pulso de inundación 2010-2011. Los círculos negros señalan las fechas y la altura del día en que se tomaron las imágenes Landsat utilizadas. Se señala la altura de desborde, es decir, el nivel hidrométrico del Río Paraná para el que el agua ingresa a la planicie de inundación (400 cm, según Salvia et al. 2012).



Delimitación de lagunas

Las lagunas se delimitaron mediante un procedimiento multitemporal en base a la frecuencia de inundación siguiendo el método propuesto por Borro et al. (2014). Se utilizaron 83 imágenes (70 Landsat 5 TM y 13 Landsat 8 OLI), Path/Row 227/82, de libre distribución (United States Geological Survey), tomadas durante el período 1987-2015 (Figura 2a). Las imágenes fueron transformadas a reflectancia en superficie (relación entre la radiación reflejada y radiación incidente) a partir del modelado de la influencia de la atmósfera considerando los efectos de la dispersión Rayleigh. Para los píxeles de cada imagen se calculó el índice verde normalizado (NDVI) según la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{IRc - R}{IRc + R} \tag{1}$$

donde IRc es la reflectancia en superficie en la longitud de onda del infrarrojo cercano y R es la reflectancia en la longitud de onda del rojo.

Luego, para discriminar las lagunas de los humedales vegetados a su alrededor se utilizó el valor de NDVI umbral encontrado por Borro et al. (2014) de 0,34. A partir del valor umbral se clasificó a los píxeles de cada imagen en dos clases: presencia (NDVI < 0,34) y ausencia de agua (NDVI > 0,34). De esta manera se obtuvo para cada una de las 83 imágenes una capa binaria de píxeles con y sin agua, en la que los píxeles con agua formaban parte de una laguna o se encontraban inundados para esa fecha.

A partir de estas capas se realizó un análisis de frecuencia de inundación. Se definieron las siguientes categorías de frecuencia según el grado de permanencia del agua en cada píxel: permanentemente con agua (con agua en 80-100% de las imágenes), usualmente con agua (con agua en el 60-80% de las imágenes), regularmente con agua (40-60%) y ocasionalmente con agua (0-40%). Se consideró que los píxeles formaban parte de una laguna si se encontraban con agua en al menos un 40% de las imágenes analizadas. Los cursos de agua (ríos y arroyos), diagramados mediante interpretación visual, se eliminaron de la capa de lagunas. Se obtuvo así un mapa de lagunas en la zona de estudio.

El mapa de lagunas obtenido se comparó con el documento cartográfico nacional SIG250 (Instituto Geográfico Nacional, 2001) y con el Mapa Internacional de Cuerpos de Agua. Este último deriva de los datos producidos por el SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Para analizar la concordancia entre el mapa de lagunas y los mapas preexistentes se calculó el índice Kappa (K), considerando los siguientes criterios (Landis y Koch, 1977): Kappa=0% grado de acuerdo pobre, Kappa=1-20% grado de acuerdo leve, Kappa=21-40% grado de acuerdo justo, Kappa=41-60% grado de acuerdo moderado, Kappa=61-80% grado de acuerdo considerable y Kappa=81-100% grado de acuerdo perfecto o casi perfecto.



Con un sistema de información geográfica (QGIS 2.12.2) se determinó el número de conexiones entre las lagunas y los cursos de agua y se calcularon los parámetros morfométricos de cada laguna: superficie, perímetro y desarrollo de la línea de costa (DLC). El DLC se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$DLC = \frac{Perimetro}{2*\sqrt{\pi*Superficie}}$$
(2)

Patrones de cambio de las lagunas

En el contexto del pulso de inundación 2010-2011 (Figura 2b) se caracterizó la cobertura de las lagunas mediante una clasificación supervisada (basada en el algoritmo de máxima verosimilitud) en un conjunto de siete imágenes Landsat 5 TM. Se consideraron cinco clases de cobertura: agua con baja concentración de sedimentos, agua con alta concentración de sedimentos, vegetación verde con agua debajo, vegetación verde sin agua debajo y vegetación senescente. En cada imagen se tomaron muestras de las diferentes coberturas y luego para cada cobertura se generó una firma típica promedio (con su media y desvío estándar). Las firmas típicas se utilizaron para clasificar todas las escenas. Se obtuvo como producto un mapa de cobertura de las lagunas para cada fecha.

Para analizar la dinámica de las lagunas en el tiempo, en cada laguna se calculó el porcentaje de cada cobertura para las siete escenas. Según los cambios de los porcentajes de cobertura en el tiempo se definieron ocho tipos de lagunas, para lo que se utilizó el algoritmo k-means.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Delimitación de lagunas

En el área de estudio se delimitaron 303 lagunas (Figura 3) que ocupan una superficie de 58,7 km² (23% del área total). Con respecto a la frecuencia de inundación, el 52% de la superficie de lagunas se encuentra regularmente con agua, el 38,5% se encuentra usualmente con agua, y el 9,5% restante permanentemente con agua. En cuanto a los parámetros morfométricos (Tabla 1), se observa un predominio de lagunas relativamente pequeñas (el 95% tiene una superficie menor a 1,3 km²), desconectadas de los cursos de agua (89% de las lagunas). La mayor parte de las lagunas poseen una superficie dentro del rango encontrado por Paira y Drago (2007) en lagunas del Paraná Medio, y resultan considerablemente más pequeñas que las grandes lagunas pampeanas relevadas por Quirós et al. (2002). El DLC es una medida del grado de irregularidad de la línea de costa (Paira y Drago, 2007). El 69% de las lagunas posee un DLC menor a la media. Todas las lagunas poseen un DLC mayor a uno, lo que indica que sus formas se alejan de la circular.





Figura 3. Mapa de lagunas y frecuencia de inundación del área de estudio.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de las lagunas del área de estudio (58,7 km²). DE: desvío estándar

Parámetro	Rango	Media ± DE*
Superficie (km ²)	0,004 - 11,649	$0,\!193\pm0,\!948$
Perímetro (km)	0,240 - 61,801	$1,\!963\pm5,\!155$
DLC	1,128 - 6.391	$1{,}72\pm0{,}59$
Conexiones con cursos de agua	0 - 12	-

La superficie de las lagunas obtenida es mucho mayor que la superficie considerada en el SIG250 para la zona de estudio $(26,27 \text{ km}^2)$, con un grado de acuerdo moderado entre ambos mapas (K=47,5%). Estas diferencias se deben a que el SIG250, a diferencia del método de Borro et al. (2014), no incluye a los cuerpos de agua temporales, ni a las áreas periféricas fluctuantes de las lagunas permanentes. El mapa internacional de cuerpos de agua considera



una superficie de lagunas aún menor (5,71 km²) y el grado de acuerdo fue leve (K=14,3%). El mapa obtenido y el SIG250 coinciden en cuatro lagunas, que presentan una superficie y forma muy similar. Con el Mapa Internacional de Cuerpos de Agua, el número de lagunas que coinciden es mayor (ocho lagunas) pero la superficie total de lagunas es mucho menor.

Patrones de cambio de las lagunas

Las firmas espectrales de las clases de cobertura de las lagunas se presentan en la Figura 4. En las clases de vegetación se observa el incremento de la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano característico de esta cobertura. Las firmas espectrales de vegetación verde tienen la misma forma, pero difieren en las bandas del infrarrojo, siendo mayor la reflectancia en la clase sin agua debajo. Esto se debe a que el agua absorbe fuertemente la radiación en la región óptica del espectro electromagnético, amortiguando significativamente la reflectancia (Silva et al., 2008). Con respecto a la vegetación senescente, el contenido de agua de la vegetación es uno de los principales factores que afecta la reflectancia en las longitudes de onda del infrarrojo medio, lo que permite distinguirla de otros tipos de vegetación.

La variación de la concentración de sedimentos en el agua se detecta en la zona visible del espectro, principalmente en el rojo (620-740nm) y en el infrarrojo (Pavelsky y Smith, 2009). Esto permitió distinguir dos clases agua: agua con baja concentración de sedimentos y agua con alta concentración de sedimentos. A medida que aumenta la concentración de sedimentos en suspensión en el agua se observa un aumento en la reflectancia de las bandas del visible y del infrarrojo cercano.



Figura 4. Firmas espectrales de las cinco clases de cobertura de lagunas del pulso de inundación 2010-2011. B1: banda del azul, B2: banda del verde, B3: banda del rojo, B4: banda del Infrarrojo cercano, B5: banda del infrarrojo medio 1, B6: banda del infrarrojo medio 2.



De acuerdo a la secuencia de cambios de los porcentajes de las diferentes coberturas para cada laguna, se identificaron ocho grupos que presentan la siguiente dinámica (Figura 5):

Grupo 1 (3,2% de la superficie de lagunas, 25 lagunas). Las lagunas presentan inicialmente un ambiente heterogéneo con un porcentaje de cobertura similar para las clases de agua y de vegetación verde; luego se observa un importante aumento en la clase agua con alta concentración de sedimentos que se mantiene hasta el final del pulso, esto indicaría la entrada del agua en la planicie de inundación.

Grupo 2 (2,1% de la superficie de lagunas, 29 lagunas). Se observa al inicio del pulso una cobertura predominante de agua con alta concentración de sedimentos; luego el agua sedimenta y comienza a crecer la cobertura de vegetación. La sedimentación podría deberse a una baja energía del agua que entra a las lagunas.

Grupo 3 (2,5% de la superficie de lagunas, 37 lagunas). Incluye lagunas vegetadas en las que se observa un aumento en la vegetación verde con agua debajo, lo que indicaría que la inundación entra dentro de la matriz de vegetación; luego la vegetación verde sin agua se recupera.

Grupo 4 (72% de la superficie de lagunas, 54 lagunas). Es el de mayor cobertura espacial (73% de la superficie de lagunas), e incluye 54 lagunas. Al comienzo del pulso se observa un ambiente heterogéneo similar al del grupo 1. En segundo término se observa un importante aumento en la clase agua con alta concentración de sedimentos. Al bajar la inundación se observa un aumento de la vegetación senescente. Hacia el final del pulso la vegetación se recupera y se observa un aumento en la cobertura de vegetación verde con y sin agua debajo.

Grupo 5 (12,5% de la superficie de lagunas, 39 lagunas). Se observa un patrón similar al grupo 1 y 4 en las dos primeras fechas. Luego el agua de la inundación se retira y comienza a aumentar la cubierta de vegetación con agua debajo; finalmente al final del pulso se observa una cobertura similar a la inicial.

Grupo 6 (1,2% de la superficie de lagunas, 33 lagunas). Incluye a lagunas vegetadas. En la fase de aguas bajas se observa un aumento en la vegetación senescente que luego disminuye, recuperándose la vegetación verde sin agua debajo.

Grupo 7 (4,1% de la superficie de lagunas, 58 lagunas). Presenta al inicio del pulso cobertura similar a los grupos 1, 4 y 5. Luego entra la inundación pero no disminuye la cobertura de vegetación. En las siguientes fechas aumenta la cobertura de vegetación con agua y de agua con baja concentración de sedimentos. La disminución de los sedimentos en suspensión podría asociarse a una baja energía del agua que entra a las lagunas y a la presencia de vegetación.

Grupo 8 (1,6% de la superficie de lagunas, 28 lagunas). Presenta al inicio cobertura similar a los grupos 1, 4 y 5 y 7, luego entra la inundación y aumenta la cobertura de vegetación senescente. Hacia el final del pulso las lagunas recuperan la vegetación verde.

IFRH 2016 3^{er} ENCUENTRO DE INVESTIGADORES en Formación en Recursos Hídricos



Figura 5. Porcentaje de cada tipo de cubierta en las siete imágenes del pulso de inundación 2010-2011 para cada grupo de lagunas. **a**. Grupo 1. **b**. Grupo 2. **c**. Grupo 3. **d**. Grupo 4. **e**. Grupo 5. **f**. Grupo 6. **g**. Grupo 7. **h**. Grupo 8.

23/01/2011

Vegetación

senescente



Conclusiones

El método para delimitar las lagunas permitió obtener una importante base de datos de las lagunas del área de estudio, que mejora y modifica la información disponible en las bases de datos preexistentes. Asimismo, fue posible identificar ocho patrones diferentes de comportamiento de las lagunas de acuerdo a la secuencia de cambios de sus coberturas, que pueden interpretarse en términos de dinámica asociada a los pulsos de inundación. El trabajo se continuará evaluando otros pulsos de inundación y comparando los patrones de comportamiento de las lagunas (por ejemplo: entre eventos El Niño de distinta intensidad o entre pulsos que ocurrieron antes y después de la construcción del Puente Rosario-Victoria). De este modo, se buscará analizar cuál es el grado de predictibilidad de la dinámica de la planicie de inundación. Asimismo, a partir de los datos morfométricos y de las trayectorias de cambio de las lagunas en los distintos pulsos se elaborarán hipótesis sobre las respuestas de la vegetación de las lagunas, que serán puestas a prueba en futuros estudios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baigún, C.R.M., Puig, A., Minotti, P.G., Kandus, P., Quintana, R., Vicari, R., Bo, R., Oldani, N.O., Nestler, J.A., 2008. Resource use in the Parana River Delta (Argentina): moving away from an ecohydrological approach? *Ecohydrol.Hydrobiol.*, 8 (2–4), pp. 245–262.
- Borro, M.M., Morandeira, N.S., Kandus, P., Salvia, M.M., Minotti, P.G., Perna, P., 2014. Mapping shallow lakes in a large South American floodplain: a frequency approach on multitemporal Landsat TM/ETM data. *Journal of Hydrology*, 512, pp.39-52.
- Bovolo, F., Bruzzone, L., King, R.L., 2013. Introduction to the special issue on analysis of multitemporal remote sensing data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51 (4), pp. 1867–1869.
- Instituto Geográfico Nacional, 2001. SIG 250. http://www.ign.gob.ar/sig250 y http://www.ign.gob.ar/sig250 y http://www.ign.gob.ar/sig250 y
- Junk, W.J., 2013. Current state of knowledge regarding South America wetlands and their future under global climate change. *Aquatic Sciences*, 75,113–131.
- Latrubesse, T., Stevaux, J.C. y Sinha R., 2005. Tropical rivers. Geomorphology, 70, pp. 187-206.
- Landis, J.R. y Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, pp. 159–174.
- Malvárez, A.I., 1997. El Delta del Río Paraná como mosaico de humedales. En Malvárez A.I. (Ed.): Tópicos Sobre Humedales Subtropicales y Templados de Sudamérica. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Montevideo, Uruguay, pp. 35-53.
- Marchetti, Z. Y., y Aceñolaza, P. G., 2012. Pulse regime and vegetation communities in fluvial systems: The case of the Parana River floodplain, Argentina. *Flora Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 207(11), pp. 795–804.
- Morandeira, N.S., 2014. *Tipos funcionales de plantas en humedales de la planicie de inundación del Bajo Río Paraná (Entre Ríos, Argentina) y su observación con datos polarimétricos de radar (Tesis de doctorado)*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Neiff J.J., 1996. Large rivers of South America: toward the new approach. Verh. Internat. Verein. Limnol., 26, pp. 167–180.
- Paira, A.R. y Drago, E., 2007. Origin, Evolution and Types of the Floodplain Water Bodies. En Iriondo, M.H., Paggi, J.C., Parma, M.J. (Eds): *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*. Berlín, Alemania, pp. 53 81



- Pavelsky, T.M. y Smith, L., 2009. Remote sensing of suspended sediment concentration, flow velocity, and lake recharge in the Peace-Athabasca Delta, Canada. *Water Resources Research*, 45, pp. 1-16.
- QGIS Development Team. 2016. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. http://www.qgis.org/
- Quiros, R., Rennella, A., Boveri M., Rosso, J, Sosnovsky A., 2002. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología austral*, 12, pp. 175-185.
- Sheng, Y., Song, C., Wang, J., Lyons, E. A., Knox, B. R., Cox, J. S., y Gao, F., en prensa. Representative lake water extent mapping at continental scales using multi-temporal Landsat-8 imagery. *Remote Sensing of Environment*.
- Salvia, M.M., Grings, F., Barraza, V., Perna, P., Karszenbaum, H. y Ferrazzoli, P., 2012. Active and passive microwave systems in the assessment of flooded area fraction and mean water level in the Paraná River floodplain. *Proceedings of the 12th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad)*. Frascati, Italia, pp. 1-4.
- Silva, T. S. F., Costa, M. P. F., Melack, J. M., y Novo, E. M. L. M., 2008. Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 140(1-3), pp. 131–145.
- Wehmann, A., y Liu, D., 2015. A spatial-temporal contextual Markovian kernel method for multi-temporal land cover mapping. (ISPRS) Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 107, pp. 77–89.