

Aplicación de una metodología a partir del Modelo de Elevación Digital ASTER para la estimación de volúmenes de agua asociados a inundaciones en la región de Paraná, Entre Ríos, Argentina

Díaz, Gonzalo^{1,2}; Doyle, Moira^{1,2}

¹ Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CONICET-UBA, UMI-IFAECI),

² Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN - UBA
Intendente Guiraldes 2160, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
gmdiaz@cima.fcen.uba.ar. doyle@cima.fcen.uba.ar.

Resumen

A la hora de analizar eventos severos como pueden ser inundaciones, las herramientas más confiables son la tecnología satelital o sensoramiento remoto y el uso de modelos hidrológicos. Estos eventos tienen un fuerte impacto sobre la región de la Cuenca del Plata debido al incremento en la intensidad y frecuencias de las precipitaciones en los últimos años y debido a la pequeña pendiente del terreno. El objetivo de este trabajo consiste en comparar la estimación de volúmenes de agua asociados a inundaciones a partir de una metodología que asume como base el uso del Modelo de Elevación Digital ASTER, con los resultados obtenidos de excesos de agua para los primeros niveles del terreno del modelo hidrológico CLASS U3M 1D. Se analizaron tres imágenes Landsat 5 TM de banda 7 para obtener, en una primera instancia, el valor del área inundada en cada fecha particular. Luego, se propuso una metodología a partir del Modelo de Elevación Digital ASTER para obtener el volumen de agua de estas áreas inundadas y así, también obtener la lámina de agua. Los resultados mostraron que la metodología propuesta tiende a sobreestimar los valores de lámina de agua con respecto al CLASS U3M 1D. Sin embargo, al contrastar temporalmente entre un día y otro, los resultados fueron muy positivos, dando valores de 0.53 m para el DEM y de 0.54 m para el modelo hidrológico. Por lo tanto, se puede concluir que la metodología es confiable para un análisis temporal de la situación analizada.

Palabras claves: máscaras de agua, Landsat, excesos, lámina de agua, modelo hidrológico

1. Introducción

Entre los eventos severos que tienen lugar en la Argentina, uno de los más importantes es la inundación, causando significativas pérdidas económicas en el ámbito de la agricultura y de la ganadería, además de provocar una gran cantidad de pérdidas humanas. El sur de Sudamérica y la Cuenca del Plata en particular, constituyen áreas en las que se ha observado un incremento en las precipitaciones (Barros et al (2000); Doyle y Barros (2011)). En base a esto y dada la pequeña pendiente del terreno en la Cuenca, se han producido eventos de inundación de considerable duración (Camilloni y Barros (2003); Latrubesse y Brea (2009)).

Por lo tanto, es aconsejable mantener un monitoreo constante de estos sucesos a lo largo del tiempo. Para llevar a cabo esta tarea, existen diversas formas y herramientas, entre ellas se encuentra el uso de sensoramiento remoto y la utilización de modelos hidrológicos (MH). Considerando estas implicancias, el objetivo de este trabajo se centró en llevar a cabo una comparación entre la estimación de excesos de agua en el suelo, mediante tecnología satelital y a través de un MH, de un evento en el que se produjo poca precipitación en octubre del 2009 y un evento de inundación ocurrido en enero del 2010 que afectaron principalmente la provincia de Entre Ríos, Argentina. Debido a la disponibilidad de información y a que el MH utilizado tuvo una buena respuesta sobre la estación de Paraná, el análisis se focalizó sobre los alrededores de la ciudad de Paraná, ubicada en la provincia de Entre Ríos, Argentina.

2. Datos y Metodología

El modelo hidrológico utilizado en este trabajo fue el CLASS U3M 1D (Unsaturated Moisture Movement Model). El mismo fue desarrollado en Australia por el Departamento de Infraestructura, Planeamiento y Recursos Naturales (Tuteja et al. 2004) para resolver la ecuación de Richards en una dimensión, simulando la zona no saturada del suelo y con un modelo hidráulico acoplado. El período de calibración se comprendió entre el 01 de junio del 2009 y el 31 de marzo del 2010; y se utilizó la serie de datos diarios de la estación de Paraná en provincia de Entre Ríos, ubicada geográficamente en 31° 43' 19.20" S y 60° 31' 51.60" O, la cual pertenece a la Dirección de Hidráulica de la provincia de Entre Ríos. La misma cuenta con sensores de temperatura y precipitación en superficie, y humedad del suelo a distintas profundidades (5 cm, 10 cm, 20 cm. y 60 cm.) y la estimación de la evapotranspiración se realiza mediante la ecuación de Penman – Monteith. La calibración del modelo consistió en modificar los diferentes parámetros del mismo con el objetivo de obtener un buen ajuste con los datos respecto a la variable de salida de humedad del suelo.

Las imágenes de satélite utilizadas para determinar los excesos de agua en la región afectada se obtuvieron del Departamento del Interior de Estados Unidos a través de la página web de U.S. Geological Survey (<http://glovis.usgs.gov/>). Las mismas corresponden al sensor Landsat 5 TM, con una resolución de 30 metros, 09 de octubre del 2009 y 13 y 29 de enero del 2010, y para la pasada 226_082. En esta ubicación se encuentra la ciudad de Paraná. La banda espectral utilizada fue la banda 7 (2.08 – 2.35 micrómetros). También se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) obtenido a partir del Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica de Avanzada (ASTER, por sus siglas en inglés), el cual cuenta con una resolución espacial de 30 metros y fue obtenido del Centro de Análisis de Datos de Sensores Remotos Terrestres (ERSDAC, por sus siglas en inglés) de forma gratuita (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>).

El software utilizado para el procesamiento de estas imágenes fue el ILWIS 3.3 Academic, el mismo es un programa de servicio gratuito (<http://www.itc.nl/ilwis/downloads/ilwis33.asp>).

En principio se enmascaró una región propensa a inundaciones, ubicada en las cercanías de la ciudad de Paraná (Díaz y Doyle (2012)). Para llevar a cabo esta tarea se utilizó la banda 7 del sensor Landsat, la cual fue previamente calibrada a valores de radiancia por la siguiente curva de calibración:

$$L_7 = -0.15 + 0.057980 \cdot DN_7 \quad (1)$$

donde L_7 es el valor de radiancia espectral medida por el sensor en la banda 7 y DN_7 es el número digital en la banda 7. Luego de calibrada la imagen se hizo una corrección atmosférica, con el objetivo de obtener valores de reflectancia, esto se logró mediante la siguiente expresión:

$$\rho^*_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_7 \cdot d^2}{E_{0,\lambda} \cdot \cos(\theta_i)} \quad (2)$$

donde ρ^*_{λ} es la reflectancia de la superficie, $E_{0,\lambda}$ es la irradiancia solar en el tope de la atmósfera, θ_i es el ángulo cenital solar, la cual depende del punto central de la imagen y d es la distancia Tierra-Sol, que se encuentra relacionada con el día juliano.

Algunos trabajos han utilizado y comentan sobre la confianza de utilizar la banda 7 como delimitador de superficies de agua (Westra y De Wolf (2009); Jung et al (2011)) y su

preferencia, en algunos casos, ante el índice normalizado de agua (NDWI, por sus siglas en inglés). El procedimiento utilizado para enmascarar las regiones afectadas fue mediante funciones condicionales, se llevó a cabo la metodología propuesta por el software ILWIS 3.3, esta metodología permite discriminar entre los reservorios de agua asociados a inundaciones y los cauces de algún río que pueda aparecer en la imagen (Díaz y Doyle (2012)).

Primero se identificaron algunos píxeles inundados a través de la imagen de la banda 7 y luego, se compararon estos píxeles con píxeles vecinos, los que estuvieran por debajo de un determinado umbral eran considerados cubiertos de agua. A partir de este procedimiento, se obtuvo la máscara de agua asociada a la inundación. Basándose en Jung et al (2011), el umbral utilizado fue de 0.08 en unidades de reflectancia, píxeles por debajo de este valor eran considerados píxeles inundados. Luego, para el cálculo del volumen de agua, se utilizaron el DEM ASTER y la máscara de agua obtenida previamente. Debido a que la región afectada se encuentra en una zona deprimida del terreno, la cual se puede identificar a partir de los puntos con tinte azul claro y fuerte (**Figura 1a**), la metodología propuesta consiste en identificar el punto más elevado del área inundada ($z_{p_{max}}$) a partir del DEM y luego haciendo la diferencia entre $z_{p_{max}}$ y la altura del DEM de cada píxel (z_i) se obtiene el valor de la altura del pelo de agua (p_i) para cada píxel inundado (**Figura 1b**). Vale destacar que se está considerando que el nivel de agua del área no varía dentro del reservorio analizado.

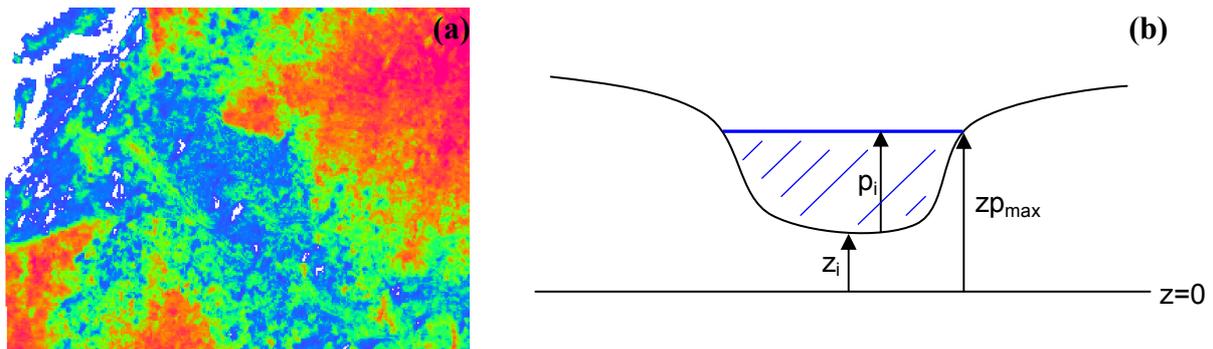


Figura 1: (a) Imagen DEM de la región de estudio, colores azules corresponden a alturas de DEM bajas, colores verdes corresponden a valores intermedios y colores rojizos a valores altos. Píxeles blancos representan dato faltante o $z_i=0$. (b) Esquema representativo de la metodología realizada para la estimación del volumen de agua a partir de una imagen DEM.

Finalmente, una vez obtenido el campo de p_i para la región de estudio propuesta, se lleva a cabo el cálculo del volumen de agua. Considerando que cada píxel de la banda 7 de Landsat, de la cual se determinó la máscara de agua, tiene un tamaño de 30m x 30m, lo que es decir que cada píxel tiene un área de 900 m², al hacer la sumatoria del producto del campo de p_i con el área de cada píxel obtenemos el valor de volumen total del área inundada. La lámina del volumen de agua se obtiene haciendo el cociente entre el volumen y el área de la zona afectada. A continuación, se muestra el conjunto de ecuaciones realizadas para obtener el resultado final de la lámina de agua:

$$p_i = z_{p_{max}} - z_i \quad (3)$$

$$Vol_{inu} = \sum_i (p_i \cdot A_i) \quad (4)$$

$$L_{\text{agua}} = \frac{\text{Vol}_{\text{inu}}}{A_{\text{inu}}} \quad (5)$$

donde A_i es el área de cada píxel, Vol_{inu} y A_{inu} es el volumen y el área total de agua de la zona inundada de la imagen respectivamente, y por último, L_{agua} es la lámina de agua correspondiente al volumen de agua Vol_{inu} . Este procedimiento se llevó a cabo para cada región inundada en los tres casos de análisis, 09 de octubre del 2009, 13 de enero del 2010 y 29 de enero del 2010.

3. Resultados y Discusión

La estación analizada fue Paraná, ubicada al sur de la provincia de Entre Ríos. Esto se debió a que el MH, CLASS U3M 1D, tuvo una buena respuesta en esta estación para el período de calibración utilizado. Como el objetivo del trabajo consistía en comparar los excesos de agua del modelo con los obtenidos a partir del DEM, se identificó un mes dentro del período de calibración en el cual hubiese ocurrido un evento de inundación y se propuso analizar los valores simulados y estimados por el DEM. El mes elegido fue enero del 2010, ya que este mes tiene un valor acumulado de precipitación de 202.12 mm, el cual es un 50% mayor comparado con el valor acumulado medio de enero de precipitación entre 1953 y 2009 de 128.96 mm. Otro evento elegido para el análisis fue el ocurrido a principios de octubre del 2009, el cual consistió en un período de escasa precipitación en la región pero con un acumulado de días anteriores de 88 mm, la elección de este evento fue para estudiar el comportamiento de la metodología propuesta en el caso de poca acumulación de agua en la región de estudio. Se hubiese deseado poder hacer un análisis con mayor cantidad de imágenes en diferentes momentos del período de calibración, pero la disponibilidad de información Landsat limitó esta tarea.

La **Figura 2** muestra la banda 7 para la región de estudio propuesta del 13 de enero del 2010. Observando la imagen, se puede apreciar las zonas que se encuentran inundadas con respecto a las condiciones normales de la región, estas se determinan con círculos rojos en la figura.



Figura 2: Reflectividades de la banda 7(Landsat 5) correspondiente al 13 de enero del 2010. Con círculos rojos se indican las zonas en donde se notan excesos de agua con respecto a las condiciones normales de la zona.

Una vez identificada estas zonas inundadas en los tres casos mencionados anteriormente, se llevó a cabo la metodología propuesta para el enmascaramiento de la región afectada. En la **Figura 3** se muestran las tres fechas analizadas superpuestas con las máscaras de agua de cada caso, de esta manera se determinó el área afectada en cada evento. La máscara de agua se encuentra representada sobre la imagen de Landsat en color azul.

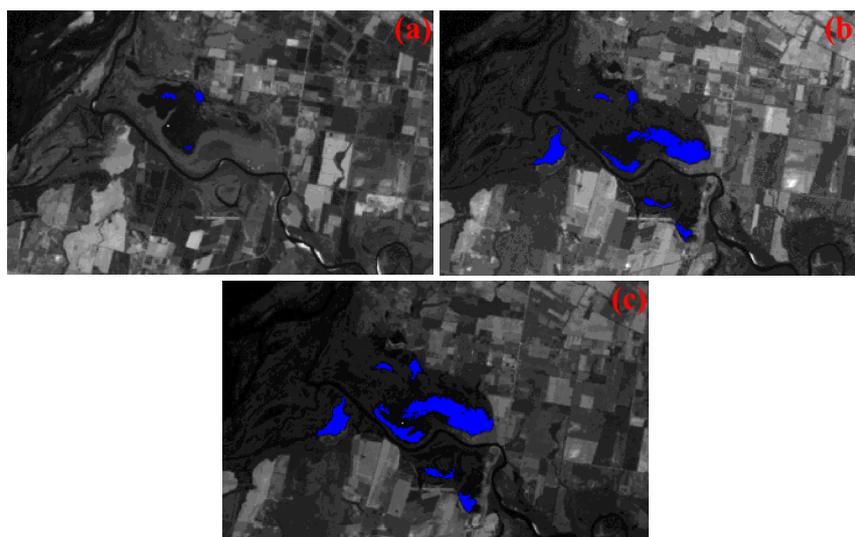


Figura 3: Reflectividades de la banda 7(Landsat 5) del (a) 09 de octubre del 2009, (b) 13 de enero del 2010 y (c) 29 de enero del 2010 superpuestas con la máscara de agua correspondiente en cada caso. La máscara se encuentra en color azul.

Por último, aplicando la metodología descrita anteriormente, partiendo de las ecuaciones (3) y (4), se obtuvieron los resultados del volumen de agua de la región inundada para los tres casos. Los resultados fueron 466200 m^3 para el caso del 09 de octubre del 2009, 12041100 m^3 para el caso del 13 de enero del 2010 y 17653500 m^3 para el 29 de enero del 2010. En la **Tabla 1** se muestran las lámina de agua obtenidas del volumen estimado a partir del DEM (ecuación (5)) para cada caso y también excesos acumulados a partir del modelo CLASS U3M 1D.

Tabla 1: Valores de lámina de agua de los volúmenes obtenidos a partir del DEM para cada una de las imágenes analizadas (Lámina DEM, indicado en amarillo claro). Las demás filas muestran el acumulado de agua del modelo a partir de la fecha indicada hasta la fecha de la imagen analizada. La columna de Δ (Enero) muestra la diferencia de las láminas de agua entre el 29 y el 13 de enero del 2010 para la estimación mediante el DEM. Todos los resultados se encuentran expresados en m.

| Excesos de agua (m) | 09-Oct-09 | 13-Ene-10 | 29-Ene-10 | Δ (Enero) |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| Lámina DEM | 5.08 | 9.65 | 10.18 | 0.53 |
| MH desde 14 Enero 2010 | *** | *** | 0.54 | *** |
| MH desde 1 Enero 2010 | *** | 2.21 | 1.65 | *** |
| MH desde 1 Diciembre 2009 | *** | 3.67 | 4.21 | *** |
| MH desde 1 Septiembre 2009 | 1.07 | *** | *** | *** |

Se puede apreciar que los valores obtenidos del DEM sobreestiman absolutamente todos los valores de exceso del MH cualquiera sea el período tomado de acumulación. Sin embargo, al analizar los casos del 13 y 29 de enero, podemos observar que la diferencia Δ (Enero) vale 0.53 m, la cual es muy similar al valor acumulado del MH desde el 14 de enero hasta el 29 de enero del 2010, siendo de 0.54 m. Por lo tanto, esto indicaría que a pesar de que la estimación de la lámina de agua a partir del DEM sobreestima el valor de exceso del modelo en un día dado, la diferencia entre un día y otro se encuentra bien representada por la metodología. Vale destacar que la sobreestimación producida por el método propuesto, se deba probablemente a la resolución vertical del DEM, la cual es de un 1 m. Para obtener una mejor estimación, se debería contar con un DEM de resolución del orden del cm, ya que la pendiente de la región es muy pequeña.

Por otro lado, debido a que casi la totalidad del período de calibración del 2009 fue una época medianamente seca (con poco exceso en los primeros niveles de suelo), se podría considerar tomar el valor obtenido de la imagen del 09 de octubre como un valor de corrección para los valores estimados de las demás imágenes. En este caso, el valor de corrección sería 5.08 m y se lo asociaría con un total de exceso de agua de 1.07 m. Suponiendo una relación lineal en el error de la estimación, obtendríamos los siguientes valores de lámina de agua para la metodología del DEM, 2.04 m para el 13 de enero y 2.15 m para el 29 de enero. Los cuales rondan más cercanos a los valores acumulados del MH (**Tabla 1**).

4. Conclusiones

Actualmente, el uso de sensores remotos para el análisis de eventos severos tales como inundaciones, se puede considerar como una de las herramientas más confiables y accesibles a utilizar. Mediante las imágenes de satélite se puede llevar a cabo un registro de estas situaciones y por lo tanto, planificar técnicas para la estimación de áreas inundadas. Asimismo, se pueden idear procedimientos para la estimación de volúmenes de agua producto de estas áreas inundadas, como se propuso en este trabajo, y corroborar los resultados con MHs. Mediante el volumen y el área, se puede obtener la lámina de agua en cuestión.

La región de estudio analizada se encuentra ubicada en los alrededores de la ciudad de Paraná, Entre Ríos, Argentina. Se eligió esta zona debido a que el MH, CLASS U3M 1D, tuvo una buena respuesta con respecto a la humedad del suelo para esta región. El período de calibración se comprendió entre el 01 de junio del 2009 y el 31 de marzo del 2010.

Se analizaron tres imágenes Landsat 5 TM para los días 09 de octubre del 2009 y 13 y 29 de enero del 2010. Para la estimación de volúmenes de agua de eventos de inundación, se utilizó el DEM obtenido del radiómetro ASTER. Previamente, se hizo un enmascaramiento de las áreas afectadas a partir de la banda 7 de Landsat 5. Con estos dos productos, se obtuvo finalmente la lámina de agua asociada a inundaciones.

Los resultados obtenidos mostraron que el método para calcular láminas de agua a partir de imágenes DEM y de la banda 7 de Landsat, sobreestima con respecto a los valores de exceso de agua del CLASS U3M 1D. Lo cual es probable que sea producto de la resolución vertical del DEM. Sin embargo, vale destacar que al considerar la variación con el tiempo del volumen entre un día y otro (en este caso, entre el 13 y el 29 de enero del 2010), los resultados son satisfactorios. La diferencia de excesos del MH entre estas dos fechas en particular y las de la estimación a partir del DEM son muy similares, por lo tanto esto indicaría que se obtienen buenos resultados al analizar temporalmente el evento en cuestión.

Por último, si se utilizan los resultados alcanzados en la imagen del 09 de octubre del 2009 como un valor de corrección del método y se recalculan los excesos de agua para las fechas posteriores, los resultados del DEM se vuelven comparables con los resultados obtenidos del MH.

A futuro se propone hacer un análisis más exhaustivo de la situación (o de un evento similar en el cual se pueda contar con mayor información satelital), considerando otras componentes del sistema hidrológico, como podrían ser la evapotranspiración y el escurrimiento superficial. De esta manera, se podría comprender qué cantidad de acumulado de exceso de agua del MH es representada por la imagen de satélite que se está estudiando, ya que como se mencionó recientemente entre un día y otro estarán actuando todas las componentes hidrológicas del sistema. Si el estudio se centra sobre la época de verano (diciembre, enero, febrero) el aporte de evapotranspiración será mayor, además debido a la pequeña pendiente del terreno en la región, la componente de escurrimiento tendrá un aporte menor.

Agradecimientos: El presente trabajo fue realizado como parte del proyecto *CLARIS LPB* del European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) financiado por el Grant Agreement N° 212492

Referencias

- Barros V., Castañeda M.E. y Doyle M. Recent precipitation trends in Southern South America to the East of the Andes: an indication of a mode of climatic variability. En: **Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates**. Concepts, Methods, Problems. Springer Science Publishers. 2000, P. 187 – 207. ISBN: 3-540-66589-7, 2000.
- Camilloni I. y Barros V. Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. **Journal of Hydrology**, **278**, 94 – 106, 2003.
- Díaz G. y Doyle M. Cálculo de máscaras de agua para áreas inundadas mediante la aplicación de modelos de elevación digital e imágenes de satélite para la región de las ciudades de Basavilbaso y Nogoyá, Entre Ríos. En: Congreso Argentino de Teledetección (CAT), 2012. Disponible en <http://cms.iafe.uba.ar/tele/tele_congreso>. Septiembre 2012.
- Doyle M. y Barros V. Attribution of the river flow growth in the Plata basin. **International Journal of Climatology**. **31**: n/a. doi: 10.1002/joc.2228. ISSN: 0899-8418, 2011.
- Jung, H. C., Alsdorf, D., Moritz, M., Lee, H. y Vassolo, S. Analysis of the relationship between flooding area and water height in the Logone floodplain. **Physics and Chemistry of the Earth** **36**, 232-240, 2011.
- Latrubesse E. y Brea D. Floods in Argentina. *Developments in Earth Surface Processes*, **13**, 333 – 349, 2009.
- Tuteja N., Vaze J. y Teng J., **The CLASS Modelling Framework: A platform for distributed eco-hydrological modelling**. NSW Department of Natural Resources, Queanbeyan, Australia, 2004.
- Westra T. y De Wulf, R.R. Modelling yearly flooding extent of the Waza-Logone floodplain in northern Cameroon based on MODIS and rainfall data. **International Journal of Remote Sensing** **30**, 5527–5548, 2009.