

# Modelos digitales de elevación: Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información

*Ing. Victor H. Burgos y Lic. Ana Paula Salcedo*

Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino

vburgos@ina.gov.ar

**RESUMEN:** En la actualidad se encuentra cada vez más difundido el uso de los modelos digitales de elevación (MDE) en las ciencias de la Tierra como por ejemplo en la Hidrología o en la Geomática, con el objeto de representar en forma fidedigna el relieve terrestre. Sin embargo el uso indiscriminado de los MDE, sin tener en cuenta consideraciones importantes así como también sus alcances y limitaciones, impacta en los resultados finales y en la calidad del producto generado.

Las tendencias en el avance de los Sistemas de Información Geográfica indican que es más valioso crear modelaciones de variables o fenómenos, como por ejemplo la mancha de inundación de un evento supuesto y sus escenarios o análisis de riesgos; y sus implicaciones ante cambios de variables, que representar un estado estático de la realidad.

En este trabajo se presentan discusiones y recomendaciones acerca del uso de los MDE en las Geociencias, en particular en la Hidrología e Hidráulica. Asimismo, se evalúan las tendencias actuales y se presenta una metodología para los arreglos y tratamientos previos a realizar en los MDE teniendo en cuenta aspectos hidrológicos. Por último se indican sitios y procedimientos para la obtención de MDE globales y gratuitos.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el conocimiento de los procesos hidrológicos y la estimación de variables asociadas que permitan evaluar procesos y eventos como por ejemplo riesgo de inundaciones, sequías, desertificación, entre otras, son temas de primer orden en la gestión y administración del territorio, cuya inclusión en la agenda política conducen a la toma de decisiones inteligentes sobre un espacio determinado.

El desarrollo rural, la desertificación, la mitigación de los efectos del cambio climático, la gestión de riesgos, o la protección y mejora de nuestros ecosistemas son algunos de los grandes temas cuyo tratamiento depende en gran medida del conocimiento que seamos capaces de desarrollar sobre el comportamiento espacial de las componentes del ciclo hidrológico.

La Hidrología se enfrenta a la demanda social de dar respuestas que sean de aplicación en el territorio. Este hecho implica la necesidad de superar la concepción clásica de la hidrología que subyace en los modelos agregados para extender sus resultados de la determinación del valor de una variable en un punto a identificar que sucede en un área (modelos distribuidos) para luego analizar su variabilidad temporal.

## OBJETIVOS

En los estudios hidrológicos, contar con información confiable de la topografía, es de vital importancia para el arribo a resultados de calidad. Por ello, en el presente trabajo se plantean los siguientes objetivos:

- a) proponer una metodología acerca del adecuado manejo de la información topográfica en el procesamiento hidrológico, para la correcta obtención de parámetros morfométricos necesarios en la modelación hidrológica;
- b) indicar los procedimientos para la obtención de modelos digitales de elevación en servidores gratuitos.
- C) comentar acerca de las tendencias y nuevos paradigmas en los modelos digitales de elevación y su uso en hidrología.

## MARCO CONCEPTUAL

### *Sistema de Información Geográfica*

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, modificación, análisis espacial, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada.

Los SIG ofrecen una gran variedad de utilidades y aplicaciones relacionadas con la Hidrología. Por ejemplo, contribuyen en:

- las tareas de almacenamiento y sistematización de la información en bases de dato geográficas, de entes públicos y privados.
- la identificación, cuantificación y análisis de la distribución espacial de cualquier variable del ciclo hidrológico: precipitaciones, evaporación, infiltración, escorrentías y flujos tanto subterráneos como superficiales;
- el análisis de tendencias espaciales de fenómenos a diversas escalas.
- los diagnósticos de situación y el diseño de políticas territoriales diversas.

Los SIG son herramientas que permiten procesar geoinformación (cuya condición básica es su referencia espacial a un determinado sistema de coordenadas geográficas). Por esta razón, se han transformado en herramientas imprescindibles para la gestión y planificación del territorio.

## *Geomática*

Es definida como los procedimientos o técnicas para cartografiar o medir la superficie terrestre o cualquier elemento sobre ella, su análisis y representación de los resultados, y el aprovechamiento de las tecnologías de la información para apoyar todas o cualquiera de esas actividades (Newby, P. 2006). Asimismo, otros autores (Sandewall & Nilsson, 2001) la definen como un término científico moderno que refiere a aproximaciones integradas de mediciones, análisis, manejo y despliegue de datos espaciales. Incluye actividades como la cartografía, relevamientos, mapeo digital, geodesia, sistemas de información geográfica, fotogrametría, teledetección, entre otras disciplinas.

## *Proyecciones Cartográficas y Referencia Oficial*

Los sistemas de coordenadas son representaciones matemáticas de los espacios (modelos), es decir, son el marco de referencia matemático en el cual se ubican los objetos. Y la georreferenciación es la ubicación de los objetos en estos espacios de coordenadas.

Actualmente en Argentina se utiliza como marco de referencia geodésico nacional el sistema Posgar 2007 (Sistemas de Posiciones Geodésicas Argentinas 2007). Este marco se vinculó al Marco de Referencia Terrestre Internacional denominado ITRF05 (International Terrestrial Reference Frame 2005) y SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas, solución DGF08P01). La proyección es la cilíndrica transversal conforme de Gauss Krüger, la cual divide a la Argentina en siete fajas de 3° de longitud.

## *Modelos*

Un modelo es un esquema teórico de un sistema o una realidad compleja, que se elabora para facilitar su entendimiento y comprender su comportamiento. Por ejemplo, la cartografía y las bases de datos geográficos (BDG), son un modelo de la realidad (Robinson, 1987; Cuenin, 1972), y, por tanto, conllevan siempre una visión simplificadora, generalizada y más abstracta de lo real. Los modelos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Los modelos físicos: Modelos de la realidad contruidos a escala con materiales adecuados.
- Los modelos lógicos o simbólicos: Conjunto de entidades que satisfacen un conjunto de restricciones, axiomas y teoremas.

Desde un ámbito más cartográfico, existen diversas propuestas para entender el complejo sistema de abstracción que ocurre en Cartografía (Bernhardsen, 2002). Según Peuquet (1990) se pueden considerar cuatro niveles de abstracción para definir la geomática:

- La realidad: Fenómenos que realmente existen, que pueden ser o no ser percibidos por los individuos.

- Modelo de datos: Elemento necesario para permitir el paso desde el modelo del mundo real a las realizaciones codificadas en bases de datos
- Estructura de datos: Se construye sobre el modelo anterior y representa el modelo de datos detallando las relaciones explícitas, generalmente de forma gráfica de diagramas.
- Formato del archivo: Representación de la forma de almacenaje física de los datos en los soportes de almacenamiento.

La representación del terreno siempre ha sido un aspecto de interés para la Cartografía y en geociencias como la Hidrología, una buena representación del mismo conlleva a mejoras en los resultados obtenidos. La coherencia y calidad de un modelo depende de las características del terreno, la información altimétrica de partida y el método de generación empleado (Martínez et al., 2001).

### *Modelo Digital de Elevaciones*

Se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a un modelo simbólico, de estructura numérica y digital (Felicísimo, 1994) que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel de referencia) que se distribuye en un espacio bi-dimensional.

Los modelos de datos para la representación de los MDE pueden ser vectoriales o raster (grillados). En los primeros se encuentran las curvas de nivel, los perfiles y la Red de Triángulos Irregulares (TIN, por su acrónimo en inglés). En tanto que en los segundos, se encuentran las matrices de celdas regulares, con cotas sobre una grilla de filas y columnas equidistantes.

No todos los MDE son igualmente útiles: se diferencian entre sí por la resolución y por la exactitud, y diferentes aplicaciones plantearán diferentes requisitos.

### *Resolución*

La Resolución especifica la unidad de medida más pequeña que se adopta para registrar datos. El tamaño escogido para una celda o píxel de una grilla de un área de estudio, depende de la resolución de datos requerida para el análisis más detallado. El píxel debe ser bastante pequeño para capturar el detalle requerido, pero bastante grande de modo que el almacenaje y el análisis puedan ser realizados de manera eficiente.

### *Exactitud*

Todo MDE está sujeto a dos fuentes de error. La primera se denomina aleatoria y representa una sobre o sub estimación de los valores reales de elevación como resultado del azar. Estos errores no muestran un patrón determinado, en promedio su valor es igual a cero y los errores positivos y negativos tienen una frecuencia similar. El segundo tipo se denomina sistemático y tiene un patrón determinado y su promedio no es igual a cero (Maling, 1989).

Desde un punto de vista estadístico, la exactitud mide la magnitud y dirección del error en un conjunto de datos. Cuando no existe sesgo, el promedio de la variable es igual a su valor verdadero (estimador insesgado). Para aplicar este concepto a un MDE es necesario comparar las elevaciones derivadas del mismo con otra fuente de información que posea un mayor grado de exactitud; por ejemplo, un mapa con valores más exactos, valores de campo o GCP (Ground Control Points) (Cressie, 1993; Maling, 1989; Weibel y Heller, 1991).

La comparación resulta en una serie de diferencias denominadas "residuos", cuyos valores pueden ser positivos o negativos. Estas diferencias se expresan estadísticamente como error promedio, error absoluto promedio y raíz cuadrada del error medio cuadrático (Shearer, 1990).

De la definición de Exactitud, también deviene el concepto de Precisión, que alude específicamente a la dispersión que se pueda obtener mediante el instrumento de medición (p.e. GPS diferencial o sensor radar) en torno al valor esperado de la estimación, por lo cual cada fuente de dato tiene su precisión.

### *Escala*

La escala es un cociente que expresa una relación de proporcionalidad entre distancias medidas en el terreno y sus correspondientes en un mapa (Strahler, 1989). Se expresa en forma numérica, simplemente mostrando la relación de proporciones, por ejemplo: 1:10.000, o en forma gráfica a través de una regla graduada donde cada segmento representa esa relación de proporción. Se habla de escala grande, cuando su nivel de detalle es grande, por ejemplo una escala 1:5.000. Escalas medias por ejemplo 1:100,000 y escalas pequeñas inferiores a 1:1.000.000.

### *Métodos de Elaboración*

La variedad de métodos disponibles para obtener un MDE, ofrece posibilidades que deberán ser seleccionadas según un criterio técnico y económico. Una correcta decisión al respecto permite cumplir con los objetivos técnicos, con la mejor relación costo/beneficio posible. En términos generales, los datos para conformar un MDE, pueden provenir de:

- a) Relevamientos de campo usando receptores GPS o estaciones totales: En la hipótesis de un uso correcto del instrumental y de las herramientas informáticas de post proceso, los MDE que se generen con estos datos tendrán alta exactitud.
- b) Fotografías aéreas e imágenes satelitales: El uso de este tipo de imágenes, es una de las maneras más efectivas para producir y actualizar mapas topográficos en regiones de tamaño medio y grande, dando la mejor relación costo/beneficio. Los MDE obtenidos en base a fotografías aéreas, pueden presentar una enorme variedad en la exactitud del mismo, dependiendo de la altura de vuelo y la distancia focal de la cámara, la exactitud en el apoyo de campo, el método de aerotriangulación

utilizado, la resolución al escanear los fotos, así como la experiencia del operador y el instrumental utilizado. No hay tanta variedad cuando las imágenes son obtenidas por satélites.

- c) Radar con antena de apertura sintética (SAR): Son ampliamente utilizadas, ya que es muy sensible a las variaciones del terreno. La imagen radar es producida por un sensor activo que emite microondas, recibiendo y registrando los ecos reflejados por el objetivo. La ventaja sobre sistemas infrarrojos y ópticos, es que las imágenes radar siempre son nítidas independientemente de que se capten de día, de noche, o bajo cualquier condición climática. Es la base para 3 tipos de técnicas: radargrametría, interferometría y radarclinometría. La radargrametría adquiere datos a través de medidas de paralaje. La interferometría SAR (InSAR) capta los datos a través de la determinación de desfase entre dos ecos. Imágenes de la misma área tomadas desde posiciones distintas, pueden usarse para formar un interferograma, y la diferencia de fases registradas en el interferograma se utilizan para generar un mapa topográfico. La radarclinometría no tiene una exactitud suficiente para la generación de un MDE. La relación costo/beneficio es similar a la de otras imágenes de satélite, aunque en contrapartida la frecuencia de las observaciones es menor.
- d) LIDAR (Light Detection and Ranging): El LIDAR es un sistema activo, por lo que envía energía electromagnética y registra la reflejada por la superficie del terreno y los objetos sobre el mismo. El sistema fue mejorando la resolución y el scanner láser aerotransportado (ALS) se convirtió en una importante herramienta opcional para sensores remotos, fotogrametría, y mapeo (Ackermann, 1996). Este sistema es de gran ayuda cuando la fotogrametría falla o se torna demasiado costosa, como por ejemplo en áreas con vegetación muy densa (Estornell et al., 2007). El costo de producir un MDE con esta tecnología es alto.
- e) Mapas topográficos existentes y digitalización cartográfica: En general, los países tienen cartografiados sus territorios, y dependiendo de los recursos invertidos en esta tarea, la calidad de los mapas topográficos suele ser variable. Argentina dispone de cobertura completa a escala 1:250.000, con curvas de nivel con 50 m de equidistancia. Si bien existen cartas a escala 1:50.000 con curvas cada 5m, no cubren la totalidad del área nacional. Claramente, la escala de la carta topográfica, condicionará la equidistancia de las curvas, y en consecuencia la exactitud y resolución del MDE a realizar. En general, se espera que la exactitud de un punto aislado esté entre 1/2 y 1/3 del intervalo de la curva (Méndez, 2010).

## FUENTES DE DATOS LIBRES

### *Modelos globales*

Los MDE globales han sido generados en diferentes momentos por organismos como NASA, y gradualmente pasan a ser de acceso público mediante la Web. Se mencionan a continuación los modelos más usados en Argentina:

SRTM: La misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) se realizó en colaboración entre National Aeronautics and Space Administration (NASA) y National Imagery and Mapping Agency (NIMA), denominada NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) desde 2003. Originalmente los datos libres eran provenientes del proceso de datos en banda C, con 90 m de resolución, y luego se logró un modelo procesando la banda X, logrando mejorar la resolución a 30 m, pero con menor área de cobertura.

ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model): ASTER es un sensor de imágenes construido por el METI de Japón (Ministry of Economy, Trade and Industry), e instalado en el satélite Terra de la NASA. Puede realizar coberturas estereoscópicas y obtener un MDE de resolución de 30 metros y alturas con errores medios cuadráticos que van de 10 a 25 metros. Luego de generado el modelo, se creó el ASTER GDEM Validation Team, grupo de trabajo que tuvo por cometido la validación del modelo en todo el mundo.

Existen dos versiones de Aster GDEM, la primera versión distribuida en el año 2009, posee una exactitud vertical global de 20 metros, con el 95% de confianza. La versión 2 fue publicada en el año 2011 y reúne una serie de mejoras respecto a la anterior versión, lo que llevó a una exactitud en la vertical de 17 metros en el 95% de confianza. Hoy, el ASTER GDEM es un MDE auditado y de uso libre y gratuito.

### *Comparación entre SRTM y GDEM*

Diversos autores (Burgos, 2012; Oñate-Valdivieso y Bosque Sendra, 2007) luego de comparar MDE generados a partir de restitución estéreo con Aster (con 15 o 30 m de resolución espacial) versus MDE de SRTM de 90 m de resolución espacial (remuestreado a 30 m), indican que las diferencias en elevación son menores a 30 m con errores medios absolutos entre 21 y 27 m.

En la confección de un MDE a partir de estereoscopia cabe destacar la relevancia de la densidad y ubicación de los puntos de control o GCP (ground control points) antes que la cantidad.

De acuerdo a Md Ali, et. al (2014) el RMSE de precisión en la vertical entre puntos de SRTM DEM, ASTER GDEM en comparación con puntos GPS de relevamiento de campo, indican para SRTM DEM 6.47 metros, y para ASTER GDEM 7.01 metros.

## CORRECCIONES DE ELEVACION

Los MDE se obtienen con procedimientos que pueden ser muy variados en cuanto a su técnica, exactitud y costos asociados. Con el MDE terminado, se puede evaluar su exactitud con algún estándar adecuado. Es posible lograr también mejorar esa exactitud, ya sea con un procedimiento que detecte errores groseros, (Felicísimo, 1994; López, 1997/2000), o bien implementado un mecanismo por el cual, con puntos de campo seguros y ciertos métodos de interpolación, se pueda mejorar la exactitud (Eulliades y Vénere, 2003). Estos últimos autores proponen dos transformaciones, la primera rígida mediante un desfase fijo en elevación calculado por mínimos cuadrados seguida de un ajuste planimétrico que minimice el cambio en z. La segunda transformación flexible por medio de filtros pasa bajos para corregir en dos niveles areales, general y local.

### *Correcciones Hidrológicas*

Los avances en el análisis de la dirección y red de flujo derivados de un MDE llevaron a la generación de varios métodos para delineación de cuencas e hidrografía. Los pioneros en el tema: O'Callaghan y Mark, (1984); Jenson y Domingue, (1988); Tarboton, (1997) indican que estos métodos siguen tres pasos:

- Modificación del MDE para corregir puntos espúreos en depresiones (aberraciones), (*fill dem*)
- Asignación y construcción de la grilla de dirección de flujo que indica el potencial flujo entre celdas, (*flow direction*)
- Acumulación de celdas contribuyentes a través de la cuenca. (*flow accumulation*)

Una superficie de dirección de flujo puede identificar las celdas contribuyentes aguas arriba del punto de cierre (*outlet*) generando así la delimitación de la superficie de aporte hidrológico (cuenca).

Rara vez los mapas topográficos con que se dispone, coincidan con los mapas hidrológicos así generados. Tales desarreglos pueden ser más que un tema estético del mapa final, ya que pueden llevar a interpretaciones erróneas de los flujos y por ende de las cuencas generadas.

Existen varios métodos que intentan resolver, por medio de algoritmos de ajuste de cotas en el MDE, los problemas antes indicados, por medio de la combinación de datos topográficos con hidrográficos.

Método 1: “*Stream Burning*” (quemado de cauces) utiliza una versión rasterizada de vectores hidrográficos digitalizados, para profundizar las cotas de los pixeles cauce. De esta forma se excava o “quema” nuevos valles en el MDE en un intento por forzar la alineación entre la digitalización hidrográfica y el mapa de dirección de flujo. El mal uso de este método puede llevar a la aparición de “cauces paralelos” (uno original y otro excavado) o grandes distorsiones en los taludes transversales, por lo que no se indica el uso de estos modelos corregidos en estudios de inundación o delimitación de línea de ribera, o cualquier estudio de índole hidráulico.

Método 2: Una alternativa al anterior es el “*normalized excavation*” (excavación normalizada) el cual utiliza mínimos topográficos locales, para determinar la profundidad de excavación en cada pixel de tipo cauce. Este método ayuda a resolver los problemas de distorsión de borde, pero no los problemas de cauces paralelos.

Método 3: El algoritmo “*Agree*” combina excavación de cauce con reacondicionamiento de superficie e intenta resolver los problemas de flujos no deseados (Hellweger, 1997). El método involucra la pendiente inicial de una excavación uniforme de cauces desde un mapa vectorial hidrográfico. La excavación es aumentada por un reacondicionamiento dentro de una distancia (rango especificado) creando un descenso monótonico desde las inmediaciones a los pixeles cauce.

En algunas publicaciones recientes (Gemtzi & Christou, 2013) se han generado nuevos métodos para la mejora de los MDE. En este caso los mencionados autores diseñan una herramienta denominada LAN Tool (*Line Attribute Network*) la cual específicamente aumenta la densificación de puntos de altura en zonas donde los procesos de interpolación generan errores, como por ejemplo en zonas de escasa variación topográfica, planicies de inundación y lechos de ríos. El método se basa en un asignación automática de valores de altura a la red de drenaje, en los puntos de intersección entre las líneas de drenaje y las curvas de nivel, y también interpolando puntos intermedios.

Baker *et al* (2006) compararon delineaciones manuales con automáticas en 420 cuencas de la Bahía de Chesapeake (US), tanto en zona de costa, piedemonte, y montaña. Utilizaron los tres métodos mencionados con diferentes parametrizaciones, encontrando errores de hasta 25% en área, al comparar con delimitaciones manuales.

Según el estudio realizado, la relación más ajustada fue lograda usando acondicionamientos con *burning* de 10 m o excavación normalizada de 2 m. La conclusión final del estudio fue que los MDE no mejorados con alguno de estos métodos de reacondicionamiento son inadecuados para algunas condiciones topográficas. En terrenos de bajo relieve las diferencias se acentúan. Además se indica que cualquier método de acondicionamiento con los parámetros adecuados produce un buen ajuste.

Es importante recalcar que, en el reacondicionamiento hidrológico, es de vital importancia que la red hidrográfica digitalizada tenga la misma resolución espacial (o escala). La experiencia indica que una digitalización de la red hidrográfica, proveniente de imágenes satelitales con resoluciones del orden de los 30 o 15 m, es suficiente para corregir adecuadamente un MDE y trabajar con escalas del orden de 1:50.000.

Un paso final adecuado sería analizar los residuos o diferencias efectuadas entre el MDE original, el *Filldem* y el corregido por algún método mencionado.

## *Corrección del Perímetro*

Se recomienda, según experiencias previas en la determinación de parámetros o índices morfométricos, que se tenga en cuenta en la determinación del perímetro de la cuenca, una poligonal suavizada y no una escalonada, ya que al estimar parámetros como el índice de compacidad (Kc), coeficiente de forma (Kf), relación de circularidad (RCi) o rectángulo equivalente, se genera una sobreestimación de hasta una 25% si no se corrige el perímetro.

## FUENTES DE INFORMACION

### *Imágenes de Satélite*

Para descargar imágenes satelitales Landsat 8 (OLI), MSS, TM y ETM+, ASTER, MODIS, NOAA, AVHRR, etc., basta con dirigirse a uno de los servidores indicados, como el servidor *Global Land Cover Facility* de la Universidad de Maryland, o al visualizador del USGS [Earth Resources Observation and Science Center \(EROS\)](#) para obtenerlas de forma gratuita (revisadas al 30/07/2014).

- <http://glcfapp.glcg.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- <http://glovis.usgs.gov/>

Existen otros portales para el acceso a información espacial como por ejemplo:

- NASA Reverb Echo: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>
- Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos: <http://earthexplorer.usgs.gov/>
- NASA's EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System): <https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/>
- ESRI World Imagery: <http://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html>

### *Modelo Digitales de Elevación*

Fuentes de información para descargar, previa creación de cuenta de usuario (revisadas al 30/07/2014):

- <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/search.jsp>
- [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3/South\\_America/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/)
- <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>
- <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>
- <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>
- [ftp://ftp.glcg.umd.edu/glcg/GLSDEM/media/GLCF.TSM.B10-001/Degree\\_tiles/](ftp://ftp.glcg.umd.edu/glcg/GLSDEM/media/GLCF.TSM.B10-001/Degree_tiles/)
- <http://www.dlr.de/srtm/>
- <https://centaurus.caf.dlr.de:8443/eoweb-ng/template/default/welcome/entryPage.vm>

- <https://centaurus.caf.dlr.de:8443/eweb-ng/SRTMDownload>
- [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3/South\\_America/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/)
- <ftp://taurus2.caf.dlr.de/>

## TENDENCIAS

En 25 años la Web ha crecido y ha pasado de ser un grupo de herramientas de trabajo para científicos a convertirse en un espacio global de información con más de 2400 millones de usuarios. La web como tecnología y concepto se reconoce desde comienzos de los 90, denominándose web 1.0, entendida como un mecanismo organizado de publicación de información disponible en servidores, donde la información iba desde el servidor al usuario.

El concepto de Web 2.0, nace en el 2005 (O'Really, 2005) para enfatizar el contraste del cambio. Una de las características es el potencial uso de cualquier usuario como fuente de información. Ejemplos populares de estas tecnologías son *Wikipedia*, *Google Earth*, *Google Maps*, *Flicker*, y redes sociales como *Facebook*, *Twitter*, *blogs*, *RSS (Really Simple Syndication)*, etc. que comparten algunas características pero con diferencias sustanciales.

Las características comunes asociadas con las tecnologías de información y comunicación (TIC) son: participación, el usuario como contribuyente, aprovechar el poder de la multitud, experiencias de usuario enriquecidas, etc.

### *El Impacto de las TIC's en la Gestión Local*

Los cambios tecnológicos (Internet, SIG, potentes CPU, etc.) han hecho que se incremente el número de usuarios, se facilite el acceso de los mismos a la información, y se planteen nuevos desafíos utilizando para resolverlos más información que ahora está disponible.

En la actualidad se necesitan MDE de mayor exactitud. Para satisfacer esa necesidad en algunos países desarrollados, simplemente se adopta una nueva tecnología y se construye un nuevo MDE cuando es necesario. En otros casos se opta por utilizar MDE Globales, debido a la incapacidad económica de algunos países en afrontar el gasto que supone desarrollar un MDE de gran exactitud.

Las nuevas tecnologías de la información provocan grandes desafíos organizacionales y una carrera de innovación constante, tanto al interior de las empresas como de las administraciones públicas. La asimilación de estas tecnologías suscita varias discusiones, entre las que se pueden mencionar: las condiciones reales de acceso a la información, el supuesto pluralismo u horizontalidad, el discurso de eficiencia en la administración de la información, el control de las redes, la racionalidad técnica vs. la política, la participación y los dominios restringidos.

Estos nuevos paradigmas de la Web 2.0, que apuntan a explotar la inteligencia “colectiva” mediante participación de usuarios en la creación, validación o mejora del dato, llevaría tal vez en unos años, a que un grupo de usuarios (calificados) pudieran corregir la información de MDE incorporando información relevada que iría cambiando o mejorando la precisión. A su vez los usuarios estarían informados de estos cambios o actualizaciones continuas mediante lectores de RSS. Con esto se aprovecharía ese conocimiento compartido en beneficio de todos, y empezariamos a tener a disposición Modelos Digitales de Elevación de Mejora Continua (MDEMC).

Para lograr aquello, se deber tener los métodos y algoritmos para la mejora progresiva, criterios estándares y normas para aceptar o rechazar cambios. En esa línea, la tendencia en Argentina es que en algún momento se dispongan de normas y estándares, a través de los metadatos y la infraestructura de datos espaciales.

### *Metadatos e Infraestructura de Datos Espaciales*

El metadato es información sobre las características de un conjunto de datos. Los metadatos incluyen información anexa al cuerpo de datos principal (por ejemplo un modelo digital de elevaciones) sobre extensión geográfica, autoría, estadísticas, metodología, calidad de la información, etc.

Los metadatos son la información que nos permite encontrar los datos (indexarlos) e identificar la forma de construcción de los datos; son la documentación que responde a las preguntas quién, qué, cuándo, cómo, por qué y dónde se produjo determinada información. Es decir, son la descripción de los datos geográficos (tipo de dato, formato, contenido, calidad, actualización, fuente, autor, etc.) que el productor de la información debe registrar para difundir y poder comunicar las potencialidades y limitaciones que poseen los datos, de modo que otros usuarios puedan evaluar la aplicabilidad de dicha información en proyectos específicos.

Existen distintos estándares internacionales que marcan el rumbo, sin embargo todos convergen en el ISO19115 realizada por el *Technical Comitee 211* (TC211) de la Organización Internacional de Estandarización.

El logro de una verdadera integración entre los datos geográficos, los metadatos correspondientes, y los conocimientos relacionados con ambos y la relación entre ellos es un reto en el momento actual para la creación de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) sobre una base semántica.

Las IDE son una estrategia organizativa, generalmente asumida por los organismos públicos, que permiten poner a disposición del público catálogos de datos espaciales documentados, visibles y accesibles. El Instituto Geográfico Nacional (IGN) impulsa la formación de la IDE de la República Argentina (IDERA), así como las IDE provinciales, y fomenta la organización de jornadas. En abril de 2007 se realizaron las 1º Jornada IDE y la VIII Jornada se realizó en Bariloche, Río Negro, en Noviembre de 2013.

### *Nuevo enfoque: Las TIG's*

En el ámbito de las geociencias y gracias al avance de las TICs, surge un nuevo concepto que engloba las diversas disciplinas de índole geográfica como la Cartografía, los SIG, la Teledetección, la Geoestadística, los Sistemas de Posicionamiento Global, etc. (Chuvieco, 2005). Asimismo, en los últimos años las TIG's se han extendido a otros campos y fueron incorporadas por la ingeniería, la medicina o la biología en temáticas como por ejemplo la epidemiología panorámica, el estudio de vectores y epidemiología satelital.

Para la gestión de Riesgos de Desastres, se están desarrollando aplicaciones para alertar a la población durante la ocurrencia de desastres naturales, haciendo uso de herramientas GPS y SIG para celulares. Estas nuevas aplicaciones podrían, obteniendo su geolocalización, informar en tiempo real la ubicación y datos del centro de atención a emergencias más cercano al usuario del teléfono, indicando puntos de relevancia (hospitales, Defensa Civil, Cruz Roja, Bomberos, etc). En situaciones de inundación, obviamente los MDE juegan un papel fundamental para que las indicaciones de evacuación sean confiables.

### *GeoPDF*

Así como PDF (*Portable Document Format*) se transformó en normativa para la publicación de información en la web, la tendencia indica que en los próximos años las publicaciones de mapas se harían por medio de una nueva extensión denominada GeoPDF, en la cual se incorpore al ya conocido formato, las coordenadas, datos georeferenciados, capas de información y metadatos de mapas generados en diversos SIG.

### *Modelo Digitales de Elevación Dinámicos (DDEM – Dynamics Digital Elevation Model)*

Es una nueva tendencia para la actualización y mejora de los MDE, a través de bases de datos compartidas. A partir de la definición de estándares de calidad para la unificación de información topográfica y de un marco común de acceso para usuarios colaboradores, se procede a la mejora del modelo.

Un ejemplo de aplicación de los DDEM es llevado adelante por la Agencia de Colaboración de Desastres Naturales de la Costa Noreste del Golfo en la zona de Alabama, Mississippi y Luisiana, Estados Unidos. En este caso, la base del DDEM es combinar productos topográficos y batimétricos en la región que se extiendan entre los 200 metros de profundidad hasta una elevación de 20 metros en tierra emergida. El DDEM es actualizado por usuarios a través de herramientas informáticas que les permiten extraer una porción y sustituirlo por un set de datos más reciente. La herramienta de actualización permite a usuarios autorizados incorporar datos en el DDEM usando un algoritmo basado en distancia ponderada de la función para hacer mosaicos de ArcGIS, mientras que preserva la pendiente. El algoritmo combina datos en alta resolución con otros de baja resolución, mientras reduce el efecto de transición entre los dos. La herramienta de actualización genera y mantiene los metadatos de los nuevos datos ingresados (Gunter, B, et. al. 2013).

### *Topo-Drones*

Los drones son vehículos aéreos no tripulados, de pequeñas dimensiones que llevan a bordo distintos instrumentos. Para aplicaciones en las geociencias, los drones pueden llevar montadas cámaras fotográficas

de alcance en el rango visible, así como también cámaras multispectrales e hiperspectrales que incluyen otras regiones del espectro electromagnético (visible + infrarrojo cercano y medio), cámaras térmicas y dispositivos LIDAR para la elaboración de MDE.

Sin embargo, los drones no son solamente para aplicaciones científicas, también se equipan drones con cámaras de video para filmar eventos, como por ejemplo inundaciones, deslizamientos, tareas de emergencia y rescate.

## DISCUSION Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo constituye una reseña del estado del arte en cuanto a usos, aplicaciones y metodologías de obtención y validación de los MDE. Presenta una síntesis conceptual de los principales términos utilizados en geomática. Además se explican metodologías para una adecuada manipulación del MDE, con fines hidrológicos. A modo de compilación de fácil acceso, se exponen los principales sitios Web para la descarga gratuita de imágenes satelitales de distintas plataformas, así como también de MDE globales.

De la extensa revisión bibliográfica, se observa que en la actualidad los MDE en formato de grilla están ampliamente aceptados, debido a sus numerosas ventajas superadoras en comparación con otras superficies topográficas como curvas de nivel y TIN. La eficiencia computacional, la accesibilidad a bases de datos de información topográfica, y la mejora continua en resolución, están logrando que los MDE sean ampliamente difundidos para análisis hidrológico (Bertolo, 2000). Además, los MDE grillados han demostrado mayor exactitud en comparación con TIN (Kumler, 1994).

Respecto a la utilización de MDE globales y gratuitos para estudios hidráulicos, Md Ali, et. al, (2014), Burgos (2012) y Schumann et. al (2008) indican que con adecuados ajustes altimétricos al comparar un MDE de SRTM con LIDAR o GCP, permite la simulación de la propagación de ondas de crecida, delimitando áreas de inundación con un RMSE menor a 2 metros. Los autores sugieren que el SRTM es una fuente de gran valor para la extracción primaria de información y análisis de inundación.

Es importante tener en cuenta a la hora de descargar un modelo global vía Internet, o bien en la compra de MDE a distribuidores privados, la relación entre resolución del modelo y su aplicación. Si bien a menor tamaño del pixel se obtendrá mayor detalle, ello conlleva a generar un archivo que absorberá demasiados recursos informáticos, por lo tanto, la definición del tamaño del pixel se convierte en una negociación entre la necesidad de información topográfica para el estudio a realizar, y la infraestructura tecnológica que se dispone. Del mismo modo, si el área de estudio es relativamente homogénea, es posible utilizar MDE con pixel de mayor tamaño, sin afectar el resultado final.

## BIBLIOGRAFIA

- Ackermann, F., 1996. Digital Photogrammetry. An addendum to the manual of photogrammetry. ASPRS. ISBN: 1-57083-037-1
- Anderson, Paul, 2007. What is Web 2.0? Ideas, technologies and implications for education JISC (Joint Information Systems Committee).
- Ariza López, F. J., Ureña Cámara, M. A., y García Balboa, J. L., 2011. GeoPDF: Una alternativa para la integración de la Información Geográfica en las publicaciones electrónicas. Mapping: Map and Sig consulting, (149), 50-62.
- Baker, M. E., Weller, D. E., y Jordan, T. E., 2006. Comparison of Automated Watershed Delineations. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(2), 159-168.
- Bambangtrisakti, Itacarolita, 2007. Comparison result of DEM generated from Aster stereo data and SRTM, National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), en Remote Sensing Application and Technology Development Center, Vol. 4, Sept. 2007
- Bernhardsen, T., 2001. Geographic Information systems: an introduction / 3rd ed. Wiley, 435 pp.
- Bertolo, F., 2000. Catchment Delineation and Characterization, EC-JRC, (EUR 19563 EN), Space Applications Institute, Joint Research Center, European Commission, Ispra (VA), Italy
- Burgos, V. H., 2012. Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C/X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza en IFRH 2012, Ezeiza, B.A.
- Chuvienco, E., Bosque, J., Pons, X., Conesa, C., Santos, J.M. Gutiérrez Puebla, J. Salado, M.J. Martín, M. P. De la Riva, J. Ojeda, J. Prados, M.J., 2005. ¿Son las tecnologías de la información geográfica (TIG) parte del núcleo de la geografía? Boletín de la A.G.R. N° 40. Pag. 35-55.
- Cressie, N.A.C., 1993. Statistics for spatial data. Rev. Ed. Wiley Series in probability and Mathematical Statistics. New York, USA. 900p
- Cuenin, R., 1972. Cartographie Générale, Paris, Eyrolles, vol I, 324 pp.
- ERSDAC, 2003. Aster reference Guide Version 1.0. Earth Remote Sensing Data Analysis Center, Japan.
- Estornell, J., Ruiz, L.A., 2007. Generación de MDE y MDS en una zona de vegetación arbórea y arbustiva mediante datos Lidar e imágenes de satélite QB. VII Semana Geomática, Barcelona.
- Euillades, P.; Vénere, M., 2003. Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros Inst. CEDIAC, UNC – PLADEMA, CNEA en Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing. Vol 19, 1,33-44
- Felicísimo, A. M., 1994. Modelos Digitales del Terreno. Oviedo (España): Pentalfa. ISBN:84-7848-475-2
- Felicísimo, A.M., 1994b. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 49(4): pp.29-33.
- Finquelievich, S., 1999. Los Actores sociales de las decisiones tecnológicas urbanas. El caso de Argentina. Ciberrota.
- Gemitzi, A.; Christou, O., 2013. LAN Tool: A GIS Tool for the Improvement of Digital Elevation Models Using Drainage Network Attributes. Journal of Geographic Information System. 5, 325-336
- Gunter, B. Woolsey, A y Eason, G., 2013. Dynamic Digital Elevation Model for the Northern Gulf Coast. University of Mississippi. Mississippi Mineral Resources Institute. Annual NG-CHC Science Meeting.
- Hellweger, F., Maidment, D., 1997. AGREE-DEM surface reconditioning system. University of Texas.
- Jenson, S. K., Domingue, J. O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric engineering and remote sensing, 54(11), 1593-1600.
- Kumler, M. P., 1994. An Intensive Comparison of Triangulated Irregular Networks (TINs) and Digital Elevation Models (DEMs). Cartographica, 31, 1 99.
- Li, Z.; Zhu, Q. and Gold, Ch., 2005. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. ISBN 0-415-32462-9. CRC Press, 318 pp
- López, C., 1997. Locating some type of random errors. Int. Journal of Geographic Information Science. 11. 7,677-698.
- López, C., 2000. On the improving of elevation accuracy of Digital Elevation Models: a comparison of some error detection procedures. Transacticons on GIS. Vol.4 N°1, 43-64.
- Maling, D.H., 1989. Measurements from maps. Principles and methods of cartometry. Pergamon Press. Oxford.

Pp.153-177.

- Martínez, R., Gonzalez, F., Gordo, C., 2001. Análisis de las metodologías habituales para la generación de Modelos Digitales del Terreno. Mapping. N° 71
- Md Ali, A., Solomatine, D. P., Baldassarre, G. D., 2014. Assessing the impact of different sources of topographic data on 1-D hydraulic modelling of floods. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(7), 7375-7408.
- Méndez, R., López, C., 2009. Evaluación del ASTER GDEM 30 en el Uruguay. Informe interno 2/2009 del SGM.
- Méndez, R., López, C., 2010. Modelo Digital de Elevación de mejora continua con aporte voluntario de datos Proyecto PR\_FMV\_2009\_1\_2647 SGM
- Newby, P., 2006. *The Photogrammetric Record*. 21(114): 97–99. The Remote Sensing and Photogrammetry Society and Blackwell Publishing Ltd
- O'Callaghan, J. F., Mark, D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*,28(3), 323-344.
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque Sendra, J., 2007. Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. In *Teledetección: Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mar del Plata (pp. 457-464).
- Peuquet, D.J.; Marble, D., 1990. *Introductory readings in Geographic Information Systems*, Taylor & Francis, London, 371 pp.
- Robinson, A.H., Sale, R.D., Morrison, J.L. and Muerhcke, P.C., 1987. *Elementos de Cartografía (3ª Edición)*. Ed. Omega. 543 pp.
- Sandewall, M y Nilsson, N.E., 2001. The area production model: A tool and concept for sustainable land-use and forest-resource management. *J. Environ, Manage.* 62: 415-427.
- Shearer, J.W., 1990. The accuracy of digital terrain models. In. Petri, G. and Kennie, T.J.M (Ed.) *Terrain modelling in surveying and civil engineering*. Whittles Publishing. pp. 315-336.
- Strahler, Arthur N; Strahler, Alan H., 1989. *Geografía Física*. Edit. Omega.
- Tarboton, D. G., 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*,33(2), 309-319.
- Weibel, R y Heller, M., 1991. Digital terrain modelling. In Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. y Rhind, D.W. (Eds.). *Geographical Information Systems*. Longman, Scientific & Technical. Vol.1. Pp.269-297.