



Análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones SRTM y MDE-Ar 2.0 para la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos en un área urbana de llanura

Comparative analysis of SRTM and DEM-Ar 2.0 Digital Elevation Models for the identification of areas of danger from flooding and waterlogging in an area of plain

Meza, Julio C.

Instituto de Investigación para el Desarrollo Territorial y del Hábitat Humano (IIDTHH) (UNNE-CONICET). Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades UNNE. julio_4152@hotmail.com

RESUMEN

Palabras claves:

Inundaciones
Expansión urbana
Modelos Digitales de elevaciones
Chaco

Las inundaciones y los anegamientos en los centros urbanos constituyen unas de las principales peligrosidades en la Provincia del Chaco (Argentina). El objetivo de este trabajo es comparar los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) SRTM distribuido por la Sociedad Geológica de Estados Unidos y MDE-Ar 2.0 disponible a través del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, ambos de 30 metros de resolución espacial, para la identificación de potenciales áreas inundables y anegadizas en la ciudad de General San Martín (Chaco). Para alcanzar este objetivo se realizó un análisis visual y estadístico a escala municipal y urbana, se evaluó la calidad de los MDE mediante el cálculo del Error Medio Cuadrático (EMC) y finalmente, la información obtenida fue complementada con cartografía de la hidrografía local para identificar las áreas de peligrosidad. Los resultados indican que ambos MDE constituyen alternativas útiles al momento de utilizar datos altimétricos de la región estudiada. Estadísticamente no presentan diferencias significativas, los errores registrados se encuentran entre 2 y 5 metros, siendo mejor la precisión vertical del MDE-Ar-2.0.

ABSTRACT

Keywords:

Floods
Urban Sprawl
Digital Elevation Models
Chaco

Floods and waterlogging in urban centers are one of the main dangers in the Province of Chaco (Argentina). The objective of this work is to compare the Digital Elevation Models (DEM) SRTM distributed by the Geological Society of the United States and DEM-Ar 2.0 available through the National Geographic Institute of the Argentine Republic, both of 30 meters of spatial resolution, to the identification of potential flooding and waterlogging areas in the city of General San Martín (Chaco). To achieve this objective, a visual and statistical analysis was carried out at the municipal and urban levels, the quality of the MDE was evaluated by calculating the Mean Square Error (MSE) and finally, the information obtained was complemented with mapping of the local hydrography to identify dangerous areas. The results indicate that both DEMs are useful alternatives when using altimetry data from the studied region. Statistically they do not present significant differences, the recorded errors are between 2 and 5 meters, being better the vertical precision of the DEM-Ar-2.0.

Recibido: 19/11/2019

Aceptado: 08/07/2020

1. Introducción

En el oriente chaqueño se produjo el asentamiento inicial de los primeros núcleos urbanos de la provincia del Chaco, en sitios topográficamente más elevados, ubicados en los interfluvios de esta región, y a partir de allí, mediante las prácticas de la agricultura como sustento, surgieron como colonias agrícolas.

Con el tiempo el crecimiento de aquellos núcleos poblacionales demandó la ocupación de nuevos espacios para usos urbanos, principalmente residencial; de este modo las ciudades se fueron extendiendo hacia áreas que le restaron superficie a la actividad agropecuaria y a la vegetación nativa. Por otro lado, este crecimiento se fue encontrando con limitaciones por las características del paisaje, principalmente aquellas que encontraron condicionantes naturales para la expansión urbana tales como los cuerpos y cursos de agua.

En la actualidad las transformaciones que experimentan las ciudades del este chaqueño relacionadas con su crecimiento exige la planificación de la expansión hacia áreas aptas para el asentamiento humano y para el desarrollo de actividades productivas, siendo que la ocupación formal o informal en zonas poco adecuadas, pone en evidencia la falta de control de este tipo de prácticas en sitios desfavorables desde el punto de vista ambiental. La particularidad de estas zonas es la topografía plana, con sectores inundables y anegadizos, como llanuras de inundación de los ríos, lagunas, esteros, bañados y cañadas, muchos de ellos en cercanías o dentro de los ejidos urbanos. Esta situación se complejiza si tenemos en cuenta la cantidad y la intensidad de las precipitaciones propias del clima Subtropical de la región y la ocupación urbana de los márgenes de cauces fluviales y lagunas que trae como consecuencias efectos adversos ante eventos como las inundaciones y los anegamientos que generan daños y pérdidas que son directamente proporcional a su intensidad y duración.

El peligro latente de inundaciones urbanas por desborde de cursos de agua o anegamientos por lluvias constituye la principal peligrosidad que puede afectar a la población y sus actividades en el oriente de la Provincia del Chaco. De allí que el interrogante central que se pretende responder en este trabajo es: ¿Cuál de los modelos digitales de elevaciones (MDE) de alcance global o cuasi global disponibles y de acceso libre representa de manera cabal la topografía de la zona de estudio para la posterior identificación de áreas de peligrosidad provocada por dichos eventos?

En este sentido, el objetivo de este trabajo es comparar los resultados de distintos Modelos Digitales de Elevaciones para el municipio de General José de San Martín (Chaco, Argentina) generados por dos de los proyectos que ofrecen superficies para el territorio nacional, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y MDE Ar.2.0 del Instituto Geográfico Nacional. A partir de la comparación de los MDE este trabajo pretende ser, en primer lugar un aporte acerca de las particularidades de los MDE globales y nacionales disponibles para la región y por otro lado, determinar si éstos son aptos para análisis del riesgo hídrico a escala regional y urbana, entendiendo que, la topografía constituye uno de los datos primordiales para la representación cartográfica del medio natural al momento de identificar la peligrosidad y vulnerabilidad frente a inundaciones, en este caso para un área urbana de llanura.

2. Consideraciones Teóricas- Conceptuales

El concepto de peligrosidad adquirió relevancia en la última década al repensar el factor peligro que compone el riesgo y se refiere al potencial peligroso de los procesos y fenómenos que ocurren en el medio físico o antropizado, es decir, el efecto negativo de amenazas o peligros, carácter que es asignado socialmente (Natenzon, 2015). Las inundaciones son los procesos de crecidas de una corriente de agua que desborda de su cauce y se disponen fuera de él, y el anegamiento se produce por la acumulación temporal de agua en el suelo originado por lluvias locales, está asociado a sectores de relieve cóncavo y su entorno, zonas bajas o escasa pendiente donde el agua escurre de manera muy lenta y puede ser poco o nada predecible mientras que la inundación puede ser predecible. Asimismo, se puede presentar una situación mixta 'inundación' + 'anegamiento', donde las consecuencias serán mayores (González Uriarte y Navarro 2004; Ferrando y Francisco, 2006; Neiff, 2018). En ese sentido, la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos apunta a delimitar espacios afectados o afectables por estos procesos.

Teniendo en cuenta lo anterior, el componente topográfico, es decir, la distribución espacial de las altitudes del terreno y la Hidrogeomorfología, son aspectos que se presentan como una de las primeras instancias a considerar en el estudio de la dinámica territorial del espacio urbano y su relación con el medio natural. Su análisis es posible a través de productos obtenidos global y localmente mediante recursos tecnológicos disponibles para los análisis y la toma de decisiones referidas a la gestión territorial urbano-ambiental. En el caso particular de investigaciones sobre áreas urbanizadas, el estudio de los rasgos

topográficos se puede abordar mediante los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), es decir, estructuras de datos numéricos que representan la distribución de la altitud del terreno o la distribución espacial de la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados (z) con la localización de su posición asociada (x,y) y en un sistema de proyección geográfica determinado (Felicísimo, 1994). Éstas son en la actualidad fuentes de fácil y libre acceso ya que pueden descargarse a través de distintos servidores web de manera gratuita.

Los MDE son un recurso muy eficaz si no se dispone de otra fuente de información topográfica, son de acceso libre, bajo costo y se asocian a un sinnúmero de aplicaciones. En general presentan diferencias y las principales tienen que ver con la localización o alcance territorial, la precisión y la resolución espacial. Esto se debe a que su origen es diverso, tales como cartas topográficas, sensores de plataformas satelitales, tecnología de detección de luz y rango (LIDAR, por sus siglas en inglés), restitución fotogramétrica, vehículos aéreos no tripulados o levantamientos topográficos con estaciones GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite por sus siglas en inglés).

Se debe tener en cuenta que estos productos se refieren a una descripción aproximada de la realidad y nunca pueden ser exactos. Por lo tanto, su utilización conlleva diferentes fuentes de error donde las imprecisiones son inherentes a ellos (Pérez Vega y Mas, 2009). Es “ampliamente reconocido que una gran proporción de los valores altimétricos estimados está sujeta a un nivel determinado de error e incertidumbre. En consecuencia, la evaluación de la calidad del MDE de base resulta de extrema importancia, puesto que todo error contenido en el modelo de elevación de base afecta directamente la calidad de los modelos derivados del mismo” (Casado, et al., 2010, p.103). Por lo expuesto es necesaria la verificación del correcto funcionamiento que requiere de revisión mediante la comprobación de los errores con el objeto real que habitualmente se puede realizar tomando muestras de las altitudes en el terreno.

Generalmente, la evaluación de la calidad de los MDE se realiza en base a la cuantificación del error a través de la comparación de un conjunto de valores conocidos de altitudes con los correspondientes de puntos homólogos del modelo, usando estimadores estadísticos convencionales (Felicísimo, 1994). Esta comparación puede ser realizada con fuentes de información de mayor exactitud en la medición, como mapas con valores exactos, medición en el terreno u obtención de elevaciones mediante fotogrametría, y el resultado es 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 (Burgos, 2012).

El Comité Federal de datos geográficos (FGDC por sus siglas en inglés) (1998) del Servicio Geológico de Estados Unidos indican que el Error Medio Cuadrático es un cálculo recomendable para estimar la precisión de datos espaciales y en ese sentido se argumenta que:

La prueba para compararlos es con base en datos de alta precisión provenientes de una fuente independiente que deben ser bien definidos (mediante red geodésica, levantamientos de terreno con GPS, métodos fotogramétricos, o bases de datos existentes de alta precisión) y deben estar distribuidos densamente en la vecindad de áreas de interés. (Muñoz, 2013, p.2)

3. Antecedentes

A nivel global existen MDE que cubren toda la superficie terrestre o partes de ella: el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) obtenido mediante la técnica de interferometría radar, poseen una resolución espacial de 90 (3”) (SRTM 3) y 30 metros (1”) (SRTM 1) cuya misión se desarrolló del 11 al 22 de febrero del 2000; el *Advance Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global DEM* (ASTER GDEM) realizado mediante procesamiento fotogramétrico entre 2008 y 2011, obteniéndose una superficie de 30 metros (1”) de resolución; y el modelo de superficie digital 3D *Advanced Land Observing Satellite World* (AW3D30 DSM) derivado fotogramétricamente de imágenes estéreo generando productos de resoluciones entre 12,5 y 30 metros (1”) (Florinsky et al., 2018, Florinsky et al., 2019), son estos los más reconocidos.

El modelo abierto de elevación global ha logrado avances significativos con el lanzamiento de SRTM DEM, ASTER GDEM y AW3D30. Cubren la mayoría de las regiones pobladas del mundo y están disponibles públicamente (...). Entre estas fuentes de datos abiertas, SRTM 1 DEM para fuera de los EE. UU. Comenzó a lanzarse en 2014, mientras que AW3D30 ha estado disponible solo desde mayo de 2016. (Hu et al., 2017, p.1)

Si bien la tendencia actual de generación de MDE se basa en la utilización de sensores remotos

(Casado *et al.*, 2010) a través de los cuales se obtienen MDE globales o de una gran parte de la superficie terrestre, cuando no se dispone de un producto acorde a un área de interés mediana o pequeña, o también cuando el terreno es plano y el nivel de detalle no es el apropiado para determinados tipos de análisis, se debe recurrir a otras opciones disponibles y escoger la más adecuada para los fines del estudio, con previo análisis de sus características técnicas.

En la literatura científica se reconocen numerosas contribuciones que analizan y comparan los diferentes MDE globales como alternativas posibles para el análisis del territorio, por su fácil accesibilidad y asequibilidad. En general estos aportes tienen como objetivo comparar estas superficies con puntos de control terrestre correspondientes al área de interés. Asimismo, han demostrado que, respecto a la medición de la precisión de los MDE el cálculo de las diferencias altimétricas con base en dichos puntos, el cálculo de Error Medio Cuadrático y el análisis de residuos, significan indicadores apropiados para estimar la precisión de los MDE (Felicísimo, 1994; Pacheco y Barríos, 2004; Presutti, 2009; Díaz *et al.*, 2010; Lencinas y Díaz, 2011; Burgos, 2012; Muñoz, 2013; Garzón Barrero *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2017; Li y Zhao, 2018; Florinsky *et al.*, 2018; Florinsky *et al.*, 2019; Kovalchuk *et al.*, 2019; Kilinç y Alazaiza, 2019).

Por otro lado, existen contribuciones que tienen como objetivo comparar los MDE globales con otros construidos a partir de la digitalización de datos de las cartas topográficas para diferentes espacios geográficos (Galván *et al.*, s/f; Presutti, 2009; Campo *et al.*, 2016). Otros en cambio tuvieron como objetivo la construcción del MDE a partir de esta fuente convencional como las cartas topográficas para distintas aplicaciones o con el objetivo de comparar métodos de interpolación de los datos altimétricos (Barredo Cano y Bosque Sendra, 1996; López y López, 2006; Quintero *et al.*, 2009; Casado *et al.*, 2010).

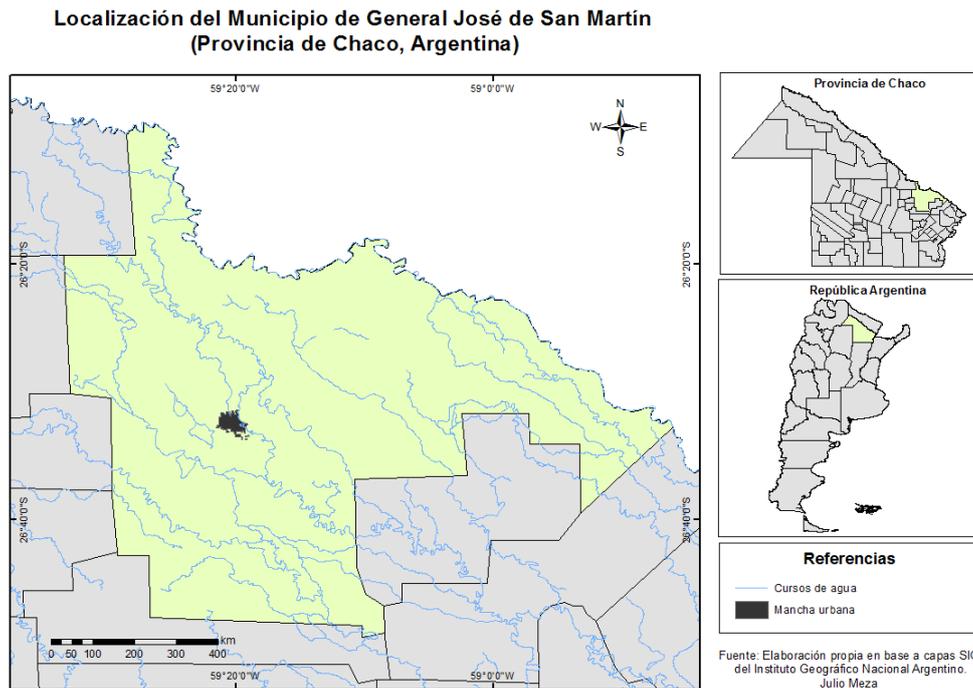
4. Área de estudio

El municipio de General José de San Martín (área urbana y rural), se localiza en el noreste de la provincia del Chaco, República Argentina (Figura 1) y se encuentra en el departamento Libertador General San Martín. Según proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) con base en el Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, el municipio posee en el año 2020 aproximadamente 36.765 habitantes, de los cuales 31.618 residen en el área urbana.

Dicho municipio se asienta en la subregión denominada 'de esteros, cañadas y selvas de ribera' (Morello y Adámoli, 1974); su geomorfología se encuentra representada por llanuras aluviales de 1 a 5 kilómetros de ancho, con meandros antiguos y actuales, lagunas y grandes cañadas dándose una intrincada red de ríos, alternando con albardones e interfluvios (Morello *et al.*, 2012). Si bien el ejido urbano actual de la ciudad se extiende sobre partes de las cuencas de los ríos Guaycurú y Oro, la mancha urbana se localiza sobre el último.

El análisis de los MDE se realizará en dos recortes espaciales: el municipio y, el área urbana y periurbana. Cabe aclarar que en la Provincia de Chaco la jurisdicción de los municipios comprende el área urbana y rural de las localidades, y el ejido urbano se utiliza para considerar, además de la ciudad, a las áreas aledañas previsibles para la expansión futura, ambos se delimitan mediante leyes. Por su parte, en este trabajo también se utilizará el concepto de mancha urbana para hacer referencia a la extensión de cobertura del suelo urbano.

Figura 1. Localización del municipio General San Martín (Provincia del Chaco, Argentina).



5. Materiales y métodos

Para cumplir con el objetivo propuesto se han llevado a cabo una serie de etapas metodológicas que se describen a continuación incluyendo los materiales y los recursos tecnológicos utilizados. Los análisis espaciales y la representación cartográfica se realizaron mediante Sistemas de Información Geográfica utilizando el software *ArcMap 10.5*.

5.1. Datos y fuentes de información

Se utilizaron los MDE generados por la misión SRTM de 30 metros de resolución espacial proporcionados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y el MDE de 30 metros del proyecto MDE-Ar 2.0 del Instituto Geográfico Nacional Argentino (<https://www.ign.gov.ar/>).

La misión *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* se llevó a cabo entre la *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, *National Imagery and Mapping Agency (NIMA)* y las Agencias Espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI). Las imágenes, distribuidas por la Sociedad Geológica de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), de acceso libre son de 90 metros de resolución y estuvieron disponibles para todo el globo terrestre, asimismo se logró un modelo digital de 30 metros, pero con menor área de cobertura y que fueron liberados en el año 2015 para el resto del mundo. La misión se desarrolló entre el 11 y el 22 de febrero del 2000 y se utilizó la técnica de interferometría radar, en la cual dos imágenes radar de un mismo sitio son tomadas desde dos posiciones diferentes (Presutti, 2009). En este trabajo se utiliza el MDE de 30 metros de resolución espacial.

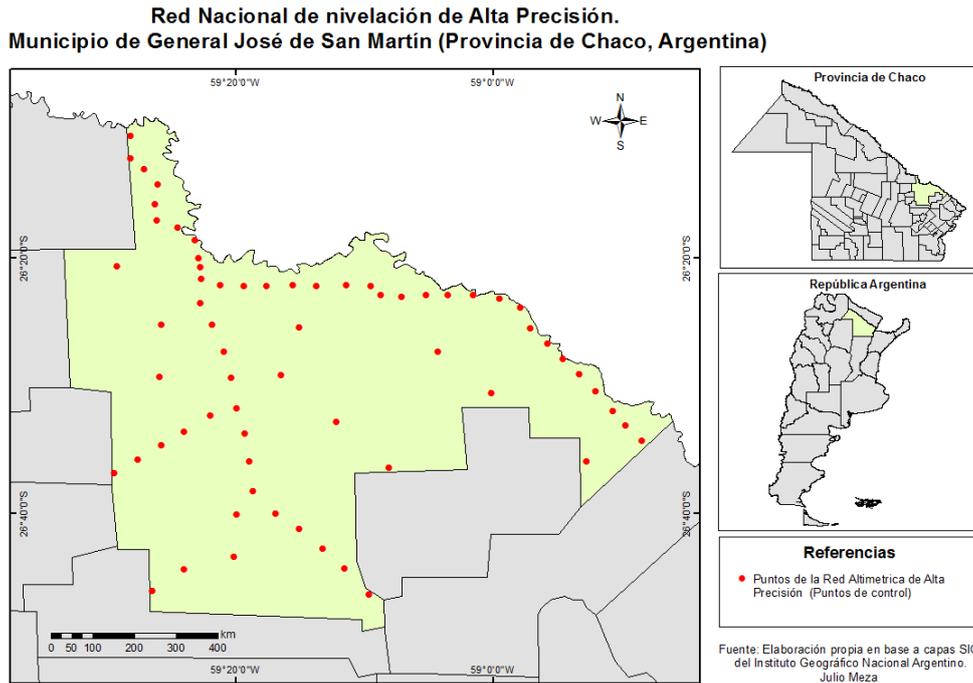
El MDE-Ar 2.0 es un proyecto del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN) puesto a disposición en el año 2019 y cubre el territorio nacional, este producto mejoró considerablemente la versión del MDE-Ar 1.0 publicado en el año 2016 ya que es resultado de mejorar la calidad del modelo de 30 metros de resolución generado por el proyecto 'ALOS Worlds 3D' de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) y vincularlo al Sistema de Referencia Vertical Nacional 2016 (IGN, 2020).

El modelo de origen de este producto, denominado AW3D30 (*3D Advanced Earth Observing Satellite World*) deriva fotogramétricamente de imágenes estéreo de banda visible de resolución de 2.5 metros adquiridas de la nave espacial ALOS (*Advanced Land Observation Satellite*) (Florinsky *et al.*, 2019) también conocido como DAICHI, su nombre japonés. Este satélite lleva a bordo tres sensores: el PRISM

para imágenes pancromáticas, el radar de apertura sintética PALSAR y el radiómetro AVNIR. El paquete de modelos digitales de elevación ALOS distribuidos por *Alaska Satellite Facility* incluye uno de 30 metros de resolución espacial y otro de 12,5 metros. Ambos MDE fueron corregidos radiométricamente a partir de otro MDE global (SRTM) e imágenes satelitales Landsat 8 con el objetivo de ofrecer productos de mejor calidad. El MDE de 30 m. es el modelo original de la misión ALOS mientras que el de 12,5 metros es producto de remuestrear el MDE SRTM de 30 m. (ASF, 2015), motivo por el cual no fue objeto de comparación en este trabajo ya que se trata de los mismos datos y no aporta mayores novedades que el cambio de tamaño del pixel.

Por otro lado se empleó la capa de la Red Altimétrica del IGN para extraer los 65 puntos de control para el municipio en estudio, considerados éstos como la variable independiente a partir de la cual se evaluaron los MDE (Figura 2).

Figura 2. Localización de los puntos de la red altimétrica del IGN utilizados para evaluar los MDE a escala municipal.



Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis a escala urbana la base de datos se complementó con las capas de cursos y cuerpos de aguas que fue digitalizada a partir de imágenes satelitales de Google Earth y, la capa del ejido urbano proporcionada por el Instituto Provincial de Desarrollo Urbano y Vivienda del Chaco (IPDUV).

5.2. Evaluación de los MDE

La comparación y evaluación de los MDE se realizó, en primer lugar, mediante el análisis visual de la distribución espacial de los valores altimétricos dentro de los límites del municipio. Luego se procedió a un análisis estadístico de los datos altimétricos teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos, promedio y desviación estándar. Además, se calculó el Error Medio Cuadrático (EMC).

$$EMC = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \vartheta_t^2}{n - 1}}$$

Ecuación 1. Cálculo del EMC.

Donde el camino a seguir es el siguiente (Garzón Barrero *et al.*, 2013):

- Se obtienen las diferencias altimétricas existentes entre los puntos de control y el MDE.
- Se elevan las diferencias al cuadrado para eliminar los signos.
- Se calcula el promedio de todas las diferencias.

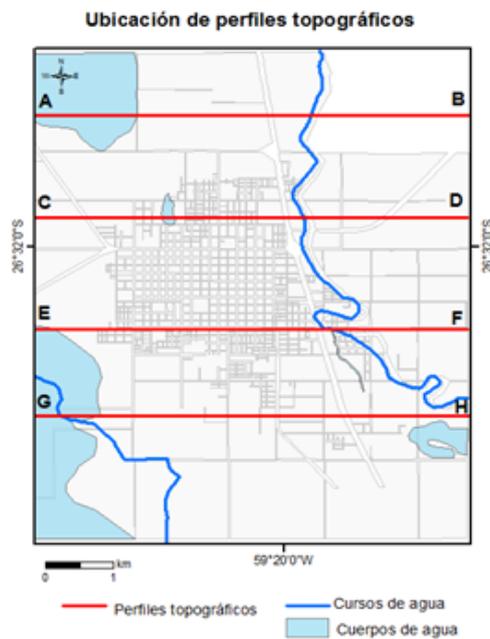
- Se halla la raíz cuadrada del promedio y se arriba al valor de EMC. Este dato indica que la superficie de error más bajo se acerca más a los datos válidos.

Para la obtención de los valores de EMC se construyó una base de datos alfanumérica donde los campos representados fueron: ID (registro del identificador), latitud, longitud, alturas de los puntos de control (IGN) (metros), alturas MDE-Ar 2.0 (metros), diferencias (metros), diferencia al cuadrado (metros), alturas MDE SRTM (metros), diferencias (metros) y diferencia al cuadrado (metros).

Una vez obtenidos los datos residuales (diferencias de alturas) se espacializaron y se analizaron en relación a valores de pendientes cuyo mapa fue elaborado con la herramienta *slope* de *Spatial Analyst Tool*.

Para analizar la configuración topográfica del área urbana y periurbana se realizó un recorte de los MDE a partir de un polígono de 5,7 km x 7,4 km (4.244 hectáreas) que cubre dichas áreas. Se trazaron cuatro perfiles topográficos de 5,7 km de largo en cuatro secciones en sentido este-oeste el área en estudio teniendo en cuenta diferentes elementos del paisaje como cursos y cuerpos que se encuentran dentro del ejido urbano y que naturalmente son inundables o anegadizos ([Figura 3](#)).

Figura 3. Escala de análisis urbano y ubicación de perfiles topográficos.



Fuente: Elaboración propia.

5.3. Delimitación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos

Se recortaron los dos modelos a partir del polígono del área urbana y periurbana y se reclasificaron de manera automática las elevaciones en tres intervalos de clases. Posteriormente se aplicó un filtro de media de paso bajo para corregir y generalizar los valores de cada categoría desechando píxeles con valores aislados y generar áreas más homogéneas, para esto se utilizó la herramienta *Mejority Filter* de *Spatial Analyst Tools*. Finalmente, se establecieron las potenciales áreas inundables o anegables mediante diferentes grados de peligrosidad (baja, media y alta) en función de la topografía local y de la distribución de cursos y cuerpos de agua.

6. Resultados y discusión

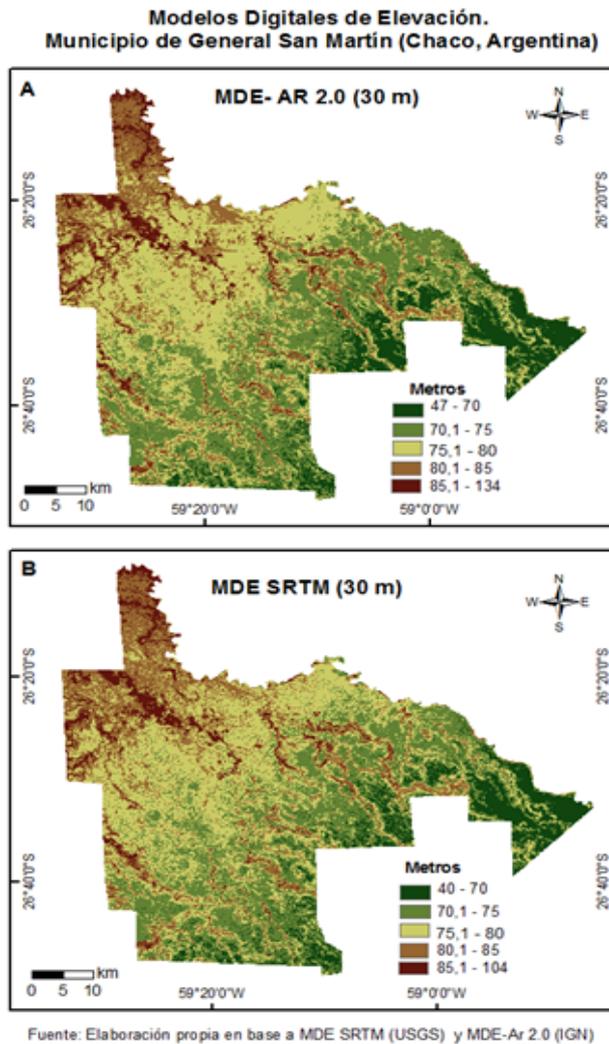
6.1. Comparación de los MDE

En la [Figura 4](#) se encuentran representados los modelos MDE-Ar 2.0 y MDE SRTM para el municipio de General San Martín. Visualmente, ambas representaciones son similares ya que se observan los rasgos generales de la topografía, las mayores altitudes se localizan en el área noroeste y disminuyen hacia el sureste donde se ubican los valores mínimos. A modo general, en los dos mapas coincide la localización de

los valores mínimos y máximos que están contenidos en el primer y el último intervalo de clase de cada representación.

Si bien la disminución de valores es gradual se destacan los terrenos más elevados con colores marrones que están vinculados a los paleoderrames que se disponen en brazos divergentes con derrames laterales hacia el sureste, son terrenos sobreelevados de la planicie, albergan a los cursos de agua autóctonos que retrabajaron ese material y sustentan formaciones boscosas. De esta manera dejaron encerradas áreas de menor altitud y escasa pendiente, que se caracterizan por albergar ambientes inundables (Alberto, 2017).

Figura 4. Modelos digitales de elevaciones para el Municipio de Gral. San Martín, Chaco.



Fuente: Elaboración propia.

Como se señaló antes, en la distribución espacial de los valores se observa una correspondencia en los dos modelos aunque, como se puede observar en la Tabla 1, los valores absolutos registrados, tanto mínimos como máximos, difieren; en general se trata de píxeles aislados con valores que repercuten en el rango de alturas. El MDE Ar 2.0 es el que tiene un rango de mayor diferencia de 73 metros, frente al MDE SRTM con 64 metros. En cuanto al valor promedio de las alturas ambos arrojan un valor muy semejante (76,9 m. para el primero y 77,2 m. el segundo) y la desviación estándar también presenta un valor similar (5,2 y 5,1).

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de los MDE.

	Altitud mínima	Altitud máxima	Altitud media	Desviación estándar	Resolución espacial
MDE-Ar 2.0	61 m.	134 m.	76,9 m.	5,2	30 m.
MDE SRTM	40 m.	104 m.	77,2 m.	5,1	30 m.

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Cuantificación y distribución de los errores altimétricos

A partir del cálculo del EMC ([Tabla 2](#)) los resultados indican que el MDE Ar 2.0 presenta un valor de 4,2 y se ubica por debajo del MDE SRTM que presenta un error de 4,4. Como se puede observar en la [Figura 5](#), donde están representados los errores verticales para cada punto de control, en general, existe un sesgo negativo en todos los puntos calculados para ambos modelos. Esto ya fue señalado por otros autores al referirse al sesgo negativo de los modelos globales ([Florinsky et al., 2018](#)).

El promedio del error (diferencias) para el MDE-Ar 2.0 es de -3,4 m. y para el MDE SRTM es de -3,6 m., esto significa que en promedio los valores altimétricos de ambos modelos están entre 3 y 4 metros por encima de las cotas de los puntos de control del IGN. Estos valores coinciden con los calculados por dicha institución para la región analizada ([IGN, 2020](#)).

El MDE-Ar 2.0 muestra una mayoría de datos en el rango de errores verticales entre -2,9 y -2 (35,3%) y entre -4,9 y -3 un 27,6 %. Además un 21,5% de las diferencias se ubica en el intervalo de -1,9 y 0, un 10,7% entre -10,9 y -5. En el MDE SRTM el 40% de los errores corresponde a valores entre -4,9 y -3 m. donde se ubica el promedio (-3,6), el 27% posee errores entre -2,9 y -2 m., un 18 % entre -1,9 y 0, en menor medida los puntos con valores con mayores diferencias entre -10,9 y -5 (9,2%), y entre -11 y -14 (4,6 %).

En síntesis, el MDE-Ar 2.0 presenta en general más de la mitad de los datos (56,8 %) con errores bajos (entre 0 y 3 metros), mientras que esa proporción en el MDE SRTM representa el 45,6%. Y en cuanto a los errores más acentuados (más de 5 metros) ambos modelos presentan una baja proporción, pero con una coincidencia de localización en 7 de los 9 puntos ([Figura 5](#)).

Si bien no existen diferencias marcadas entre los resultados mencionados hasta aquí, el MDE-Ar 2.0 se coloca en una mejor posición en términos de calidad ya que posee menor EMC y la media de diferencias de alturas resulta también menor que el SRTM. Esto también fue señalado por otros autores que han comparado al MDE ALOS (insumo básico del MDE-Ar 2.1) con otras superficies, determinando que éste posee mejor precisión altimétrica entre los modelos globales ([Li y Zhao, 2018](#); [Florinsky et al., 2019](#), [Kovalchuk et al., 2019](#); [Kilinç y Alazaiza, 2019](#)).

Tabla 2. Matriz de errores del MDE Ar 2.0 y el MDE SRTM

ID	Latitud	Longitud	Puntos de control IGN (m)	IGN MDE Ar 2.0 30m	Diferencias (m)	Diferencias al cuadrado	SRTM 30 m.	Diferencias (m)	Diferencias al cuadrado
0	-26° 23' 52.8"	-58° 57' 53.6"	68,9	72	-3,1	9,8	72	-3,1	9,8
1	-26° 17' 36.9"	-59° 24' 33.3"	80,1	83	-2,9	8,6	81	-0,9	0,9
2	-26° 12' 10.7"	-59° 28' 11.8"	83,1	85	-1,9	3,5	86	-2,9	8,2
3	-26° 22' 09.9"	-59° 17' 36.7"	77,9	80	-2,1	4,5	81	-3,1	9,7
4	-26° 10' 28.0"	-59° 28' 11.6"	82,6	86	-3,4	11,3	86	-3,4	11,3
5	-26° 18' 36.8"	-59° 23' 13.0"	80,5	83	-2,5	6,3	83	-2,5	6,3
6	-26° 14' 15.3"	-59° 26' 05.6"	81,1	85	-3,9	15,3	85	-3,9	15,3
7	-26° 23' 04.5"	-59° 07' 08.2"	73,2	76	-2,8	7,6	78	-4,8	22,6
8	-26° 33' 07.6"	-58° 49' 42.8"	64,2	67	-2,8	7,9	67	-2,8	7,9
9	-26° 19' 59.6"	-59° 22' 53.9"	78,5	82	-3,5	12,4	82	-3,5	12,4
10	-26° 22' 52.2"	-59° 01' 36.3"	71,4	76	-4,6	21,5	76	-4,6	21,5
11	-26° 23' 12.6"	-58° 59' 32.3"	70,7	73	-2,3	5,4	73	-2,3	5,4

12	-26° 17' 04.8"	-59° 26' 09.3"	82,4	86	-3,6	13,1	87	-4,6	21,3
13	-26° 22' 06.2"	-59° 21' 14.6"	79,5	84	-4,5	20,5	81	-1,5	2,3
14	-26° 22' 52.6"	-59° 05' 16.6"	74,4	76	-1,6	2,5	77	-2,6	6,6
15	-26° 26' 42.2"	-58° 55' 48.9"	68,0	70	-2,0	4,2	70	-2,0	4,2
16	-26° 34' 19.3"	-58° 48' 30.4"	64,4	70	-5,6	30,9	70	-5,6	30,9
17	-26° 21' 35.9"	-59° 22' 43.6"	78,3	80	-1,7	2,9	80	-1,7	2,9
18	-26° 22' 09.8"	-59° 19' 26.0"	77,3	80	-2,7	7,3	82	-4,7	22,2
19	-26° 25' 29.9"	-58° 57' 07.1"	68,6	70	-1,4	2,1	70	-1,4	2,1
20	-26° 31' 57.4"	-58° 50' 44.4"	65,7	67	-1,3	1,6	68	-2,3	5,1
21	-26° 22' 10.2"	-59° 13' 45.9"	75,9	78	-2,1	4,6	78	-2,1	4,6
22	-26° 13' 02.4"	-59° 27' 11.3"	83,7	89	-5,3	27,6	89	-5,3	27,6
23	-26° 22' 06.8"	-59° 15' 36.0"	78,0	80	-2,0	4,0	81	-3,0	9,0
24	-26° 22' 10.6"	-59° 09' 34.0"	75,0	80	-5,0	24,6	77	-2,0	3,8
25	-26° 30' 24.8"	-58° 52' 04.2"	65,0	68	-3,0	8,9	68	-3,0	8,9
26	-26° 27' 54.3"	-58° 54' 35.3"	67,5	73	-5,5	30,0	71	-3,5	12,1
27	-26° 22' 07.2"	-59° 11' 28.2"	75,4	77	-1,6	2,7	77	-1,6	2,7
28	-26° 22' 53.9"	-59° 08' 45.5"	74,2	76	-1,8	3,3	75	-0,8	0,6
29	-26° 29' 05.0"	-58° 53' 19.1"	66,5	70	-3,6	12,6	69	-2,6	6,5
30	-26° 15' 48.5"	-59° 26' 17.3"	80,6	83	-2,4	5,8	82	-1,4	2,0
31	-26° 22' 52.9"	-59° 03' 33.2"	71,9	78	-6,1	37,1	78	-6,1	37,1
32	-26° 40' 04.1"	-59° 19' 58.3"	71,8	83	-11,2	126,5	83	-11,2	126,5
33	-26° 44' 24.3"	-59° 24' 02.3"	72,2	79	-6,8	46,0	78	-5,8	33,4
34	-26° 27' 20.2"	-59° 04' 18.0"	70,7	84	-13,3	177,1	84	-13,3	177,1
35	-26° 43' 23.9"	-59° 20' 09.6"	69,6	78	-8,4	70,7	77	-7,4	54,9
36	-26° 25' 27.4"	-59° 15' 06.5"	73,7	77	-3,3	10,9	78	-4,3	18,6
37	-26° 30' 33.6"	-59° 00' 09.6"	68,2	70	-1,8	3,1	72	-3,8	14,2
38	-26° 29' 18.6"	-59° 25' 58.1"	74,3	77	-2,7	7,5	79	-4,7	22,4
39	-26° 20' 39.8"	-59° 29' 15.6"	79,8	82	-2,2	5,0	86	-6,2	39,0
40	-26° 35' 55.3"	-58° 52' 48.4"	65,7	68	-2,3	5,1	68	-2,3	5,1
41	-26° 32' 51.2"	-59° 12' 13.5"	71,5	75	-3,5	12,3	75	-3,5	12,3
42	-26° 36' 27.5"	-59° 08' 06.3"	67,8	70	-2,2	4,9	69	-1,2	1,5
43	-26° 29' 08.6"	-59° 16' 32.6"	74,2	77	-2,8	7,7	75	-0,8	0,6
44	-26° 25' 14.1"	-59° 25' 47.8"	76,8	78	-1,2	1,4	79	-2,2	4,8
45	-26° 46' 04.6"	-59° 26' 31.6"	72,0	85	-13,0	168,8	86	-14,0	195,7
46	-26° 20' 42.8"	-59° 22' 46.1"	78,6	80	-1,4	1,9	82	-3,4	11,5
47	-26° 38' 15.8"	-59° 18' 41.0"	72,1	74	-1,9	3,8	74	-1,9	3,8
48	-26° 29' 23.5"	-59° 20' 25.5"	77,9	81	-3,1	9,8	81	-3,1	9,8
49	-26° 34' 38.8"	-59° 25' 47.8"	74,3	77	-2,7	7,5	78	-3,7	14,0
50	-26° 32' 21.6"	-59° 21' 59.3"	72,9	76	-3,1	9,5	74	-1,1	1,2
51	-26° 33' 45.9"	-59° 19' 18.7"	75,1	78	-2,9	8,7	80	-4,9	24,4
52	-26° 33' 35.1"	-59° 24' 01.3"	72,8	75	-2,2	5,0	75	-2,2	5,0
53	-26° 46' 22.0"	-59° 09' 40.8"	66,6	69	-2,4	5,8	69	-2,4	5,8
54	-26° 44' 20.4"	-59° 11' 34.3"	67,6	71	-3,4	11,8	71	-3,4	11,8
55	-26° 25' 15.2"	-59° 21' 53.4"	78,0	81	-3,0	9,1	82	-4,0	16,1
56	-26° 23' 30.7"	-59° 22' 46.4"	78,1	80	-1,9	3,5	81	-2,9	8,3
57	-26° 31' 48.3"	-59° 19' 57.6"	74,1	76	-1,9	3,6	78	-3,9	15,1
58	-26° 36' 51.2"	-59° 29' 29.6"	74,4	76	-1,6	2,6	77	-2,6	6,8
59	-26° 41' 14.5"	-59° 15' 08.5"	70,3	73	-2,7	7,5	73	-2,7	7,5

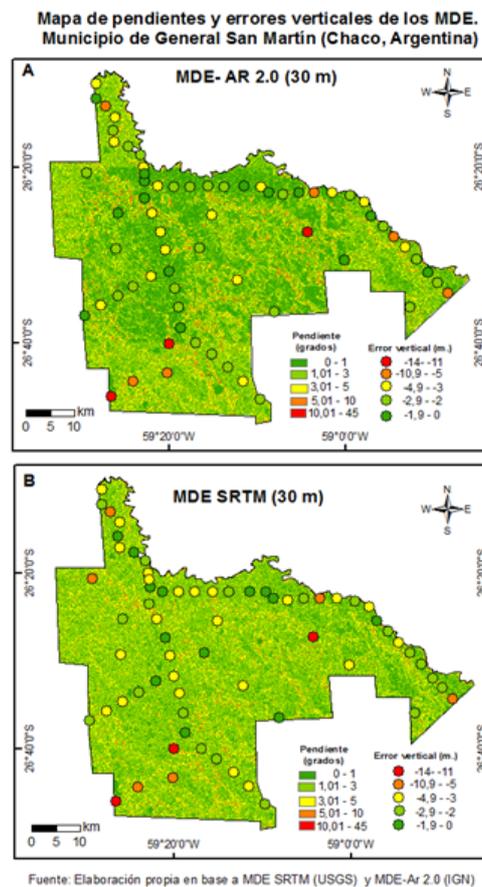
60	-26° 35' 55.3"	-59° 18' 57.2"	75,0	78	-3,0	8,9	78	-3,0	8,9
61	-26° 35' 45.6"	-59° 27' 39.5"	73,0	76	-3,0	9,2	76	-3,0	9,2
62	-26° 42' 45.6"	-59° 13' 17.2"	68,1	71	-2,9	8,5	72	-3,9	15,3
63	-26° 40' 00.7"	-59° 16' 55.7"	70,4	73	-2,6	6,5	73	-2,6	6,5
64	-26° 27' 22.2"	-59° 20' 58.6"	77,4	82	-4,6	21,3	78	-0,6	0,4
			Promedio de las diferencias			17,7			18,9
			Raíz Cuadrada del promedio = EMC			4,2			4,4

Fuente: Elaboración propia.

Además, en la [Figura 5](#) se visualiza la distribución de las pendientes, donde se aprecia que los mayores valores (entre 5 y más de 10 grados) se dan en aquellas vinculadas a los cursos de agua y geformas asociadas tales como cauces, lagunas meándricas y albardones. En contraposición las menores pendientes (menos de 5 grados) cubre casi la totalidad del área, este escaso grado de pendiente permite explicar las extensas áreas planas y anegadizas del Chaco Oriental.

En este sentido, la representación cartográfica permite advertir que los errores verticales de los modelos entre 5 y 14 metros (puntos rojos y naranjas) se ubican en sectores de mayores pendientes en cercanía a los elementos del paisaje antes mencionados. Por otro lado, las menores diferencias, es decir, entre 0 y 4,9 metros (puntos amarillos y verdes) se ubican en zonas de menores pendientes.

Figura 5. Mapa de pendientes y distribución de los errores verticales.



Fuente: Elaboración propia.

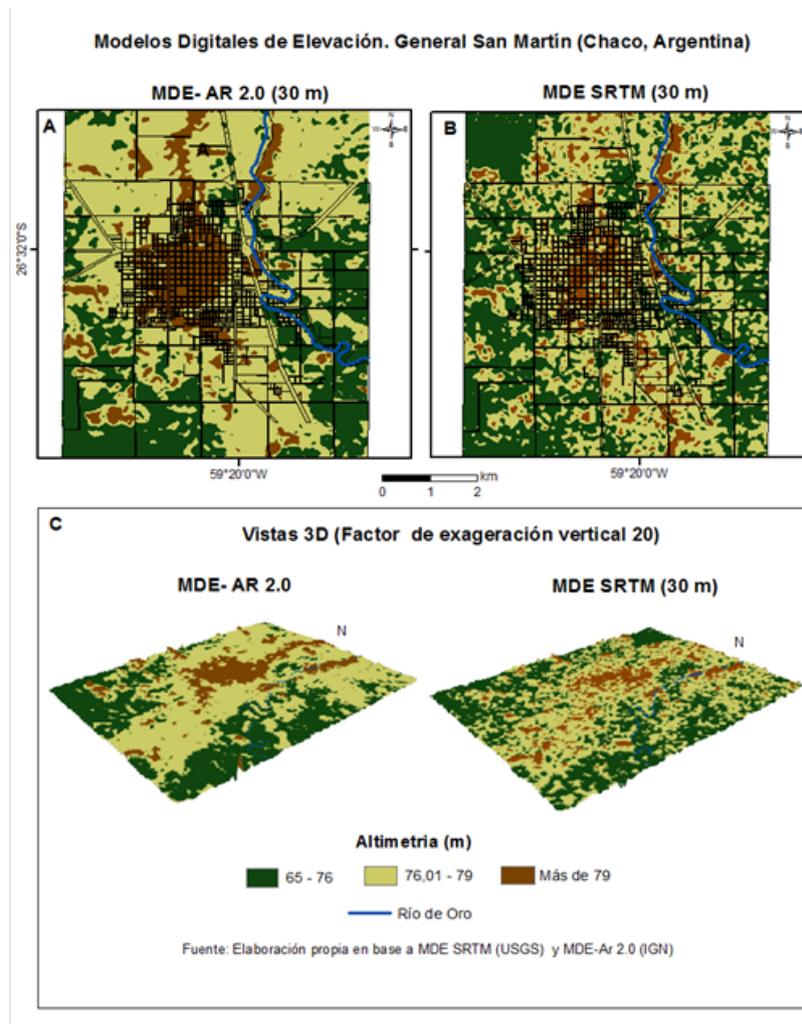
6.3. Análisis a escala urbana

En la [Figura 6](#), se encuentran representados ambos modelos en escala urbana. En los dos casos se visualizan los rasgos generales de la topografía, las mayores altitudes se ubican en el área central en sentido norte-sur y descienden hacia el este y oeste donde se localizan los menores valores, esto se vincula a la presencia de cuerpos y cursos de agua que rodean a la mancha urbana o incluso algunos se encuentran dentro de ésta o la atraviesan ([Meza et al., 2017](#)).

Teniendo en cuenta que se realizó una clasificación automática de valores de altura en tres intervalos de clases, se visualiza que en el MDE-Ar 2.0 (Figura 6.A), a través del procedimiento citado, se agrupan los píxeles de manera más homogénea en el espacio. En cuanto a las superficies de cada conglomerado, se observa que el grupo que mayor extensión alcanza es el de alturas comprendidas entre 76,01 y 79 metros que cubre un 56% de todo el polígono que representa el área de estudio, en segundo lugar las áreas con menos de 76 metros cubren un 30% de la superficie analizada, mientras que el grupo de valores por encima de 79 metros ocupan el 14 % del área.

Por el contrario, visualmente se detecta que la clasificación automática que se realiza en el MDE SRTM (Figura 6.B) no agrupa tan homogéneamente los píxeles, es decir, espacialmente se encuentran más dispersas celdas que corresponden a un mismo agrupamiento. Esto no significa que en términos de superficie ocupadas por cada conjunto presenta diferencias significativas con respecto a el MDE-Ar 2.0. El 46 % del área ocupada corresponde a los píxeles que se ubican entre 76,01 y 79 metros, un 42 % corresponde a los que se encuentran por debajo de 76 metros y 11% a la superficie con valores por encima de 79 metros.

Figura 6. MDE-Ar 2.0 y MDE SRTM a escala urbana.



Fuente: Elaboración propia.

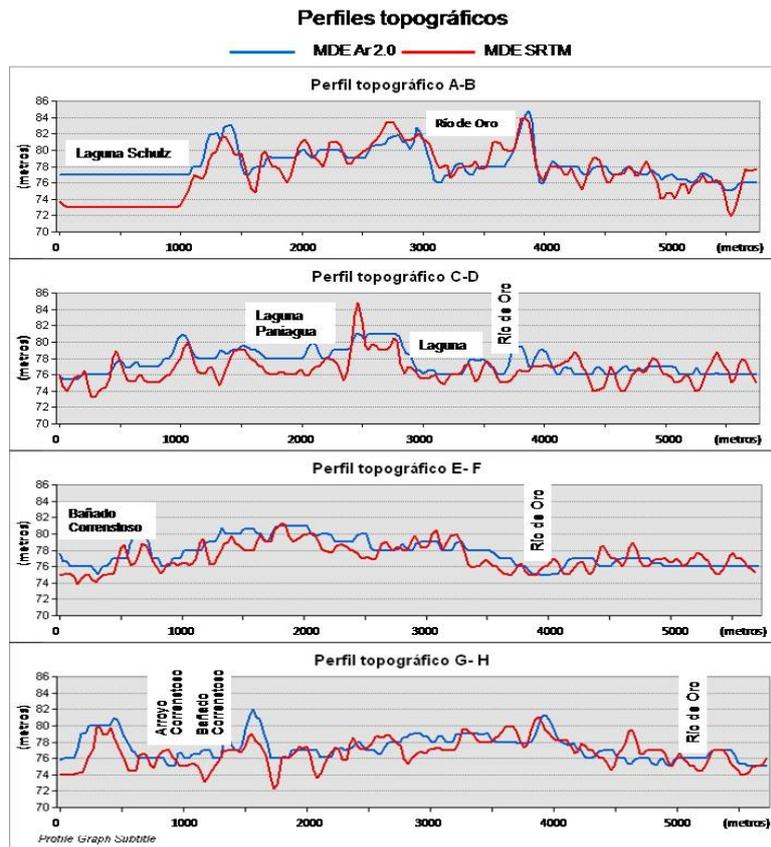
Mediante la construcción de perfiles topográficos a partir de los dos MDE (Figura 7), se puede ampliar el análisis de los rasgos representados por cada uno. A modo general, ambos modelos muestran la distribución de las altitudes en sentido oeste - este que, como se mencionó antes descienden desde el centro hacia estos dos puntos cardinales. Se puede advertir que en el MDE-Ar 2.0 ilustra formas más suavizadas y se mantiene de manera casi constante en cotas por encima de 76 metros y el MDE SRTM posee desniveles más pronunciados, tanto en las altitudes mayores como en las depresiones y en general el trazado se mantiene por debajo del MDE Ar 2.0, alcanzando muchas veces valores inferiores a 74 metros, es decir, se refleja de la misma manera que en la representaciones cartográficas, la mayor o menor homogeneidad en los conjuntos de píxeles.

En general, se observa que las depresiones en ambos modelos corresponden a los tipos de paisajes

que hay principalmente en el área periurbana y algunos dentro de la mancha urbana. En los cuatro perfiles se aprecia la presencia del río de Oro, en el segundo y tercer corte se visualiza que su recorrido atraviesa el sector oriental del área urbana. En la zona norte (Figura 7, perfiles A-B y C-D) se identifica la presencia de las lagunas Schulz y Paniagua, siendo la primera más extensa; en el perfil E-F se ubica en el sector oeste el bañado Correntoso y el perfil G-H ubicado en sur de la ciudad muestra en el oeste la localización de mismo bañado y el Arroyo Correntoso.

Estas particularidades observadas en los diferentes cortes sugieren que el este y oeste de la ciudad son áreas de paisajes anegables e inundables periódicamente (Meza et al., 2017).

Figura 7. Perfiles topográficos sobre los MDE SRTM y MDE-Ar 2.0.

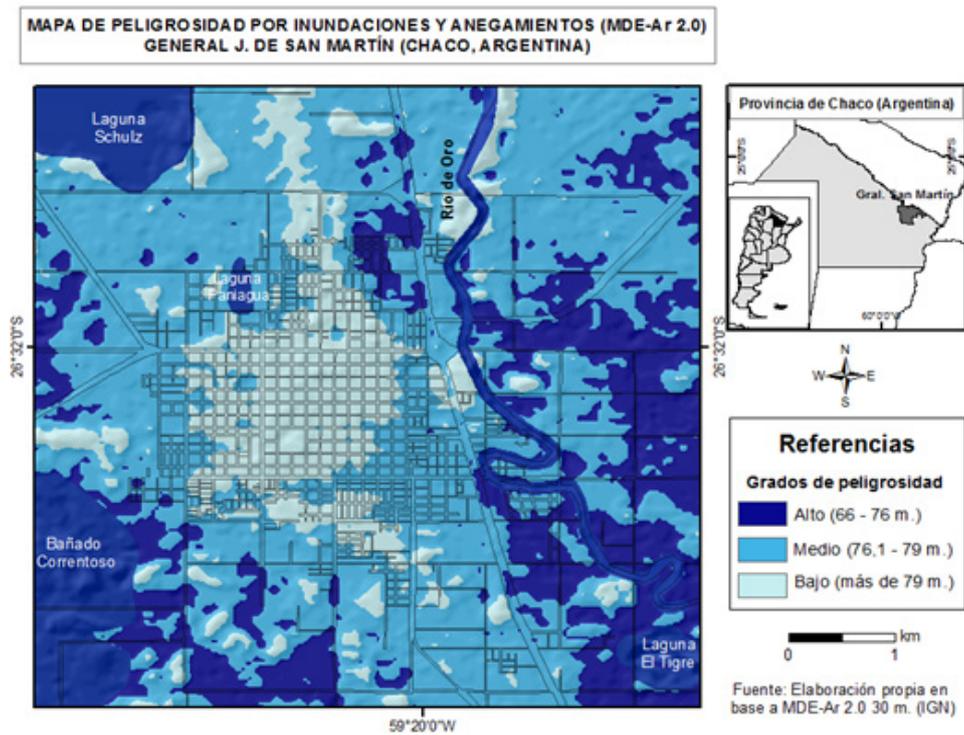


Fuente: Elaboración propia.

6.4. Delimitación de áreas de peligrosidad por inundación y anegamientos

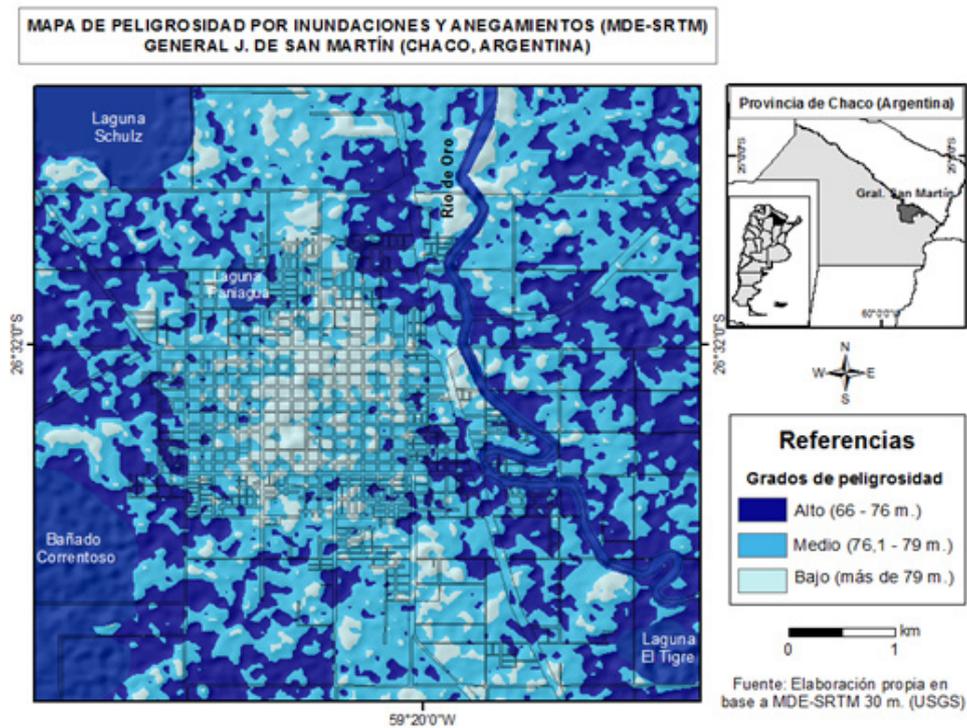
El proceso llevado a cabo y detallado precedentemente permitió identificar los principales rasgos topográficos del terreno. A partir de esta información y complementado con la distribución de cuerpos y cursos de agua, se identificaron áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos. En ambos modelos, se determinaron tres categorías de peligrosidad en función de dicha información (Figura 8 y Figura 9), se definió como áreas de 'peligrosidad alta' aquellos sectores que se encuentran por debajo de 76 metros y a los ambientes como las lagunas Schulz, Paniagua, bañado Correntoso, Arroyo Correntoso y río de Oro y sus márgenes; 'peligrosidad media' los sectores comprendido entre las cotas 76 y 79 metros y las áreas de 'peligrosidad baja' todas las que se encuentran por encima de 79 metros. Las zonas delimitadas coinciden parcialmente con las áreas de riesgo establecidas a partir de la versión 1.0 del MDE Ar (45 metros) (Meza et al., 2017), con lo cual son tres las superficies probadas (MDE-Ar 1.0, MDE-Ar 2.0 y MDE SRTM) que reconocen las mismas áreas como indicadores de peligro potencial ante eventos como inundaciones o anegamientos.

Figura 8. Mapa de peligrosidad con base en el MDE-Ar 2.0.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Mapa de peligrosidad con base en el MDE SRTM.



Fuente: elaboración propia.

7. Conclusiones

La disponibilidad, la actualización y la mejora en términos de calidad y precisión de nuevos datos geoespaciales como los modelos digitales de elevaciones significan un gran aporte a los estudios regionales

y locales.

En relación al interrogante inicial de este trabajo se puede decir que los modelos MDE-Ar 2.0 y SRTM (ambos de 30 m.) constituyen una alternativa útil al momento de utilizar datos altimétricos de la región estudiada. Estadísticamente no presentan diferencias significativas, el margen de error se encuentra entre 2 y 5 metros, y en cuanto a representación de los rasgos topográficos poseen importantes similitudes aunque análisis más robustos implicarían detectar mayores diferencias.

La utilización de estos productos implica conocer los errores que son inherentes según cual haya sido la fuente y el método de obtención, esto nos brinda un panorama de la calidad de los datos que se emplea para aportar al conocimiento de las áreas de estudio, en este caso un área urbana de la llanura Chaqueña.

La mejora en la resolución espacial y la reciente disponibilidad de ambos productos resultan aspectos que mejoran los análisis de la topografía a escala urbana, sin embargo, productos con mejores resoluciones obtenidos desde otras fuentes mejorarían los estudios y modelos derivados.

Los resultados alcanzados en este trabajo permiten seguir avanzando en una delimitación más precisa de áreas de riesgo hídrico, favorecidos por los insumos geotecnológicos disponibles y otras técnicas de análisis que se pueden aplicar.

8. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Crecimiento urbano y salud ambiental de en ciudades intermedias de la Provincia del Chaco (1990-2015)”. SGCyT – UNNE, PI: 16H005 (2017-2020), directora Dra. Liliana Ramírez. El autor agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por financiar este trabajo, a los evaluadores anónimos y a la Dra. Liliana Ramírez por sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo.

Referencias bibliográficas

Alaska Satellite Facility (ASF) (2015). ASF radiometrically terrain corrected ALOS PALSAR products, Product guide. Recuperado de https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf

Alberto, J. A. (2017). Uso del suelo con fines urbanos en las terrazas y áreas marginales de los ríos Paraguay – Paraná. Resúmenes de tesis. *Revista Geográfica Digital*. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 14. N° 27. Enero – Junio. ISSN 1668-5180 Resistencia, Chaco.

Burgos, V. (2012). Evaluación de ASTER GDEM y SRTM-C / X para modelación hidráulica de la rotura de presa El Carrizal, Mendoza. Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino. *1er Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos (IFRH 2012)*, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de https://www.ina.gob.ar/legacy/pdf/ifrrhh/03_003_Burgos.pdf

Barredo Cano, J., Bosque Sendra, J. (1996). Delimitación de unidades homogéneas del relieve a partir de un modelo digital de elevaciones. *Estudios Geográficos*, 57(225), 615-643.

Campo, A.; Gentili, J.; Silva, A. (2016). Comparación de DEM generados a partir de distintas fuentes de datos. Cuenca del arroyo Sauce Corto, Sistema de Ventania, Argentina. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*. Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG). Año 8, (8), 2016, Sección II: Metodología. 34-55. (ISSN 1852-8031) Luján.

Casado A., Gentili J., Campo A. M., Peir y Jean-Luc. (2010). Evaluación de la calidad de modelos digitales de elevación derivados de curvas de nivel para aplicaciones hidrológicas. En: *Tecnologías de la Información Geográfica del sur argentino*, Capítulo n° 10, 102-116, ISBN 978-987-1648-09-2

Díaz, G., Mohr-bell, D., Lencinas, J. (2010). Modelos digitales de alta resolución. Extracción con datos del Satélite ALOS. *Patagonia Forestal*, 5-8. Recuperado de <http://www.patagoniaforestal.org.ar/>

Dirección de Geodesia, Instituto Geográfico Nacional. (2019). Modelo Digital de elevaciones de la República Argentina versión 2.0. Recuperado de https://www.ign.gob.ar/archivos/Informe_MDE-Ar_v2.0_30m.pdf

EarthExplorer - USGS (2020). Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Federal Geographic Data Committee (FGDC). (1998), Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. FGCD-STD-007.3-1998. Recuperado de <https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy>

Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa. Oviedo.

Ferrando, A.; Francisco, J. (2006). Sobre Inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo*, (15), Departamento de Urbanismo, F.A.U. Universidad de Chile.

Florinsky, I., Skrypitsyna, T., Luschikova, O. (2018). Comparative accuracy of the AW3D30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: A case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia. *Remote Sensing Letters*, 9(7), 706-714.

Florinsky, I., Skrypitsyna, T., Trevisani S., Romaiquin S. (2019). Statistical and visual quality assessment of nearly global and continental digital elevation models of Trentino, Italy. *Remote Sensing Letters* 10:B. 726-735.

Galván, M., Bonzano, C., Mas, G. (s.f.). Comparación entre modelos digitales de elevación obtenidos a partir de imágenes de radar SRTM y cartas topográficas del IGN. Recuperado de http://www.isnsc.com.ar/assets/eje_09_05_galvan_bonzano_mas_comparacion_entre_modelos_digitales_de_elevacion_obtenidos_a_partir_de_imagenes_de_radar_stm.pdf

Garzón Barrero, J., Jiménez Cleves, G., Vila Ortega, J. (2013). Determinación de la desviación altimétrica de modelos digitales de elevación mediante métodos geoestadísticos fase 1. *Revista de Investigaciones - Universidad del Quindío (Col.)*, 24(2). Pág. 193-203.

González Uriarte, M., Navarro, E. (2004). Inundaciones y anegamientos. En: *Peligrosidad geológica en Argentina*. María Alejandra Gonzalez y Norberto Jorge Bejerman. (Editores) - 1a ed. - Buenos Aires: ASAGAI, 2004. CD-Rom. ISBN 987-21766-0-4.

Hu, Z. ; Peng, J. ; Hou, Y. ; Shan, J. (2017). Evaluation of Recently Released Open Global Digital Elevation Models of Hubei, China. *Remote Sensing*, 9(3), 262.

Instituto Geográfico Nacional. (2020). Recuperado de <https://www.ign.gob.ar/>

Kilinc, H., Alazaiza, M. (2019). Vertical Accuracy Assessment for Alos World 3D – 30m Digital Elevation Model: A Case Study of Gaziantep City, Turkey. *2nd Internacional Congress on Engineering and Architecture*, Turkey.

Kovalchuk, I., Lukianchuk, K., Bogdanets, V. (2019). Assessment of open source digital elevation models (SRTM-30, ASTER, ALOS) for erosion processes modeling. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(1), 95-105.

Lencinas, J. y Díaz, G. (2013). Corrección geométrica de datos satelitales QuickBird, incidencia de los modelos digitales de elevación SRTM-C/X y ASTER GDEM. *GeoFocus*, (11), 431-454. ISSN: 1578-5157.

Li, H, Zhao J. (2018). Evaluation of the Newly Released Worldwide AW3D30 DEM Over Typical Landforms of China Using Two Global DEMs and ICESat/GLAS Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 11(11).

López López, D. (2006). Desarrollo e implementación de un modelo para la clasificación automática de unidades de relieve a partir de Modelos Digitales de Elevación. Tesis de maestría, Centro de Investigación en Geografía y Geómatca “Ing. Jorge Tamayo”, México.

Meza, J., Ramírez, M., Contreras, F. (2017). Cartografía de áreas de riesgo a inundaciones y anegamientos a partir de modelos digitales de elevación de General José de San Martín (Chaco, República Argentina). *Contribuciones Científicas GAFA*. 29, 149-164.

Morello, J.; Adámoli, J. (1974). Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco Argentino. Segunda parte: Vegetación y Ambiente de la provincia del Chaco. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. *Serie Fitogeográfica* (13), 1-130.

Morello, J., S. Matteucci, A. Rodríguez, and M. Silva. (2012). Capítulo 5: Ecoregión Chaco Humedo. En: *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Ed: Orientación Gráfica Editora.

Muñoz, L. (2013). Cálculo del RMSE vertical del Modelo de Elevación de Superficie NEXTMap R World 30 DSM vs. la Red Geodésica de Primer Orden de Costa Rica. Recuperado de <https://www.geosoluciones.cl/documentos/nextmap/RSM NEXTMap DSM vs RED GEODESICA- 1ER- ORDEN DE COSTA RICA.pdf>

Natenzon, C; Ríos, Diego (2015). (eds.) Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades: aportes desde la

geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos. -- Buenos Aires: Imago Mundi, 2015. ISBN: 978-950-793-205-2.

Neiff, J. (2018). Anegamientos en la cuenca del Riachuelo, Corrientes. Informe de opinión. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35573.42728>

Pacheco, C.; Barrios, A. (2004). Evaluación de métodos de interpolación en la construcción de un modelo digital de elevación con fines hidrológicos: aplicación en una cuenca andina de montaña. *Revista Forestal venezolana*, 48(2), 118- 126.

Paredes Hernández, C.; Salinas Castillo, W.; Martínez Becerra, X.; Jiménez Hernández, S. (2013). Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (82), 118-130. UNAM, ISSN 0188-4611.

Pérez Vega, A., Mas, J. (2008). Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (69), 2009, 53-67. UNAM, ISSN 0188-4611.

Presutti M. (2009). Comparación de un DEM generado a partir de curvas de nivel con el DEM-SRTM para estimar la altura de plantaciones forestales. *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, INPE, p. 2943-2950.

Quiñonero Rubio, J.; Alonso Sarria, F. (2007). Creación de diferentes modelos digitales de elevaciones a partir de diferentes métodos de interpolación para determinación de redes de drenaje. I Jornada de SIG libre, Universidad de Girona. Recuperado de <http://www.sigte.udg.edu/jornadassiglibre2007/comun/2pdf/3.pdf>

Quintero, D., Montoya Velilla, D., Betancur Vargas, T. (2009). Aplicación metodológica para obtener modelos digitales de elevación –MDE- de escala local en zonas de humedales. *Revista Gestión y Ambiente*, 12(2), 87-100. Medellín.