

Comparación de Cálculos de Niveles de Inundación entre un Análisis Hidrológico e Hidráulico Existente y un Modelo de Elevación Digital del Terreno

*Ninouska Monge Rodríguez
Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil
Auristela Mueses, Ph.D.
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

Abstracto — *Actualmente se han producido impresionantes avances en el desarrollo de aplicación de sistemas de información geográfica (GIS), al desarrollo y gestión de los recursos hídricos. Recientemente los Modelos de Elevación Digital y el GIS juegan un papel importante en la hidrología, ya que la extracción automatizada de parámetros topográficos de estos modelos es una alternativa viable en este campo. En este análisis se presenta la comparación entre el cálculo de nivel de inundaciones con datos tomados en el campo y las elevaciones extraídas de un DEM 30 por 30 metros del USGS. La aplicación del DEM en los recursos hídricos se debe a su viabilidad de utilización en conjunto con otras capas de datos.*

Palabras Claves — *DEM, GIS, HEC-RAS, Modelación Hidráulica.*

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es el constituyente natural más importante para la raza humana. Este constantemente nos brinda importantes beneficios, aunque en diversos sitios y épocas del año se pueden generar impactos adversos a la humanidad como lo son las inundaciones, las cuales traen como consecuencias una serie de pérdidas tanto ambientales, económicas como sociales en los sectores ubicados cerca de ríos y/o quebradas.

Este estudio muestra el resultado de la fiabilidad de modelación del comportamiento de los perfiles hidráulicos existentes realizados por UNIPRO Architects, Engineers & Planners para la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico, en comparación la utilización de data superficial extraída del USGS utilizando un DEM. En esta investigación el modelo utilizado para el análisis del DEM fue realizado por: ArcGIS para la conversión del DEM y localización de secciones

transversales, el cual es una herramienta del Instituto de Investigación del Sistema Ambiental, Inc. (ESRI), para creación de las secciones transversales AutoCad Civil 3D 2012 de Autodesk y para la modelación de niveles de inundación HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

JUSTIFICACIÓN

Las fuentes de información hidrológica son de importancia y beneficio para los profesionales del campo de la ingeniería. Este análisis tiene como objetivo evaluar la factibilidad de la utilización de DEM 30 por 30 generado por el USGS, para la extracción de data de elevación para el cálculo de niveles de inundación de manera objetiva y certera e introducir en el campo de la ingeniería una práctica que pueda ser utilizada en el campo de los recursos de agua.

Este procedimiento podría sustituir la mensura tomada en el campo, en adición a obtener el margen de error fiable entre resultado obtenido de cálculo de niveles de inundación realizado en HEC-RAS, como resultado del Análisis Hidrológico e Hidráulico y el obtenido utilizando el DEM.

DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS

El análisis consiste en comparar el cálculo de niveles de inundación de un estudio hidrológico/hidráulico existente con las elevaciones obtenidas del Modelo de Elevación Digital (DEM). El análisis será realizado utilizando un cuadrángulo topográfico digital, un modelo DEM de 7.5 min (30 metros) tipo *Raster* en GIS creado a partir de mapa de curvas de nivel (escala 1:24,000) del USGS del municipio de Rincón y utilizando una Ortofoto digital extraída del USGS.

Para realizar el modelo se utilizaron una serie de programas, entre los mismos se encuentran: ArcGIS 10.1, AutoCad Civil 3D 2012 y para el análisis de modelación hidráulica de los perfiles de inundación el programa unidimensional HEC-RAS. Estos modelos son apropiados porque simulan la condición hidráulica en el área de estudio. Se utilizó un régimen de flujo continuo, en el cual se analizaron dos escenarios: la condición existente con los datos obtenidos de la agrimensura y el modelo obtenido del DEM los cuales fueron utilizados para realizar la comparación.

MARCO TEÓRICO

DEM

El modelo de elevación digital (DEM) es la representación simplificada de una variable que se mide en una superficie ondulada de tres dimensiones [1]. De esas dimensiones dos se refieren a los ejes ortogonales X, Y y la tercera mide la altura Z de la variable temática representada en cada uno de los espacios. Los datos de estos modelos están arreglados regularmente por los valores de elevaciones referenciados horizontalmente en proyecciones UTM (Universal Transverse Mercator) o en coordenada del sistema geográfico.

Estos modelos DEM son la base de los sistemas de información geográfica, en adicción a que son imprescindibles en estudios geomorfológicos, hidrológicos y geológicos entre otros.

Un Modelo de Elevación Digital representa la superficie terrestre y provee la base de extracción digital de parámetros topográficos. Estos son una importante fuente de datos para diferentes aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica (GIS) [2]. La mayoría de estos provienen del Servicio Geológico de los Estados Unidos por sus siglas en inglés (USGS). En donde la ruta del agua está condicionada por la forma de esa superficie [3]. Las características hidrológicas pueden ser extraídas de estos modelos.

El USGS utiliza cuatro métodos para la recopilación de datos DEM. De los cuales solo el método de interpolación de vectores y el gráfico de línea digital de datos hipsográficos e hidrográficos (DLG), son utilizados actualmente para los DEM de 7.5 minutos y otras series de DEM. Los siguientes tres métodos (han sido descontinuados o desactivados) fueron utilizados principalmente para la producción de estos DEM: el Gestalt Photo Mapper II, manual de perfiles estereoscópicos y fotogramétricos, e interpolación de elevaciones desde contornos estereoscópicos digitalizados.

- **Calidad de producción:** La calidad de un DEM varía en gran medida, esta depende de los datos de origen, la técnica de interpolación utilizada, y de la magnitud de los errores implicados. Un modelo de elevación digital es una simplificación de la realidad por lo cual contendrá errores, los cuales no son considerados equivocaciones y no pueden ser eliminados trabajando cuidadosamente; lo que puede esperarse es que estos errores sean razonablemente pequeños y tengan una estimación fiable de su magnitud [4].

La calidad de producción de un DEM varía de un país a otro y de su fuente, actualmente existen dos extensiones para calidad de datos de elevación: la resolución horizontal y la precisión horizontal. Estos enfrentan problemas de incertidumbres a causa de las propiedades fisiográficas derivadas de la cuenca en relación al modelo hidrológico. Los DEM son creados en cuadrículas regulares en diversas resoluciones y con varios niveles de precisión.

- **Resolución:** La resolución horizontal y vertical de un Modelo de Elevación Digital pueden tener una incidencia significativa en algunos parámetros de la superficie terrestre lo cual implican diferencias en las elevaciones. Las elevaciones del DEM generalmente son medidas en metros.

La capacidad de un DEM del USGS para proyectos de recursos hídricos depende grandemente de la técnica utilizada durante su producción. Los DEM de 7.5 min del USGS

producidos antes de 1988 se basaron principalmente en Perfilado Manual de fotogrametría estéreo-modelos [5]. En las áreas bajas, los DEM suelen mostrar patrones sistemáticos de trazado de Este a Oeste que pueden hacer que inadecuados para la parametrización de las características de drenaje [4].

Los datos para un DEM de 7.5 minutos de unidad corresponden a una serie de mapas de cuadrángulos topográficos para todos los Estados Unidos.

Los datos de un DEM de 2-arc- segundo (30 minutos) dan cobertura a áreas limítrofes de los Estados Unidos. Esta serie está distribuida en cuatro unidades de DEM de 15-minutos cubriendo completamente áreas 30 por 30 minutos áreas correspondientes al Este o Medio Oeste del cuadrángulo topográfico 30 por 60-minutos (1:100,000- escala) del USGS.

Los datos de un DEM de 15-minutos de unidad corresponden al cuadrángulo topográfico de USGS de Alaska. El tamaño en Alaska varía dependiendo la latitud.

La data de un DEM es producida por la *National Imagery and Mapping Agency* (por sus siglas en inglés NIMA) en 1 por 1 grados de unidad los cuales corresponden al Este o Medio oeste, el cuadrángulo topográfico 1 por 2 grados (escala 1:250,000) es para todos los Estados Unidos y sus territorios.

- **Los DEM producidos por el USGS están clasificados en tres niveles de creciente calidad:**

➤ Nivel 1:

Este está generalmente reservado para los datos derivados de la exploración de Programa Nacional de Alta Altitud Fotografía, Programa Nacional de Fotografía Aérea, o la fotografía equivalente.

➤ Nivel 2:

La clasificación es para los conjuntos de datos de elevación que se han procesado o suavizadas por la coherencia y editados para eliminar errores sistemáticos identificables,

Programa Nacional de Fotografía Aérea, o la fotografía equivalente.

➤ Nivel 3:

Los DEM de esta clasificación se derivan de datos de Digital Line Graph (DLG) mediante el uso de algunos elementos de las dos hipsografía (curvas de nivel, cotas) y la hidrografía (lagos, costas, drenaje). Si es necesario, líneas de cumbre y las principales características de transporte también se incluyen en la derivaciones para los conjuntos de datos de elevación que se han procesado o suavizadas por la coherencia y editados para eliminar errores sistemáticos.

- **Características de la data:** Las elevaciones verticales de los DEM son en decimales y números enteros con unidades de pies y metros con excepción del DEM 1-grado, el cual está distribuido en metros solamente. Los valores de las elevaciones para Estados Unidos y Alaska están referenciados por la National Geodetic Vertical Datum de 1929 (NGVD 29) con valores para las islas de Hawaii, Puerto Rico y Guam referenciados al medio del nivel del mar.

Los DEM de 7.5-minutos UTM hacen referencia al sistema de proyección al Datum de Norte América de 1927 (NAD 27) o (NAD 83). Estos datos son almacenados como perfiles con 10 o 30 metros de malla cuadrada espaciadas a lo largo y entre cada perfil.

- **Precisión del DEM:** La precisión del modelo generado se puede considerar dependiente de una serie de parámetros implicados en su generación, que van desde las características orográficas de la zona, los datos fuente hasta el método de elaboración [4], y su resolución.

Para evaluar la exactitud de un DEM se utiliza interpolación lineal la cual está basada en la diferencia entre la elevación de un DEM y la elevación de 28 puntos de control cuyas cotas son comparadas con las generadas por el modelo para la misma posición. De esto se calcula la diferencia en alturas, el error. Con estos se procede a calcular los

valores estadísticos como el RMSE (*Root Mean Squared Error*), el cual es utilizado para la evaluación de exactitud de los DEMs. El USGS describe la exactitud de 7.5 min del DEM como un valor RMSE para cada uno de los cuadrángulos.

La Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) fue un proyecto realizado en el 2000, por la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), la National Aeronautics and Spaces Administration (NASA) y las Agencias especiales de Alemania (DLR) e Italia (ASI), con el objetivo de generar datos digitales topográficos para el 80% de la superficie de la tierra (el área entre 60° Norte y 56° Sur).

En este proyecto se utilizó la técnica de interferometría radar, en la que dos imágenes de un mismo lugar son tomadas de diferentes posiciones. En efecto, en las zonas cubiertas con vegetación, las hojas y ramas actúan como dispersores. Y las longitudes de ondas cortas no pueden penetrar la vegetación, por lo que los modelos de elevación que son generados no muestran la altura del suelo desnudo, sino la altura de la superficie visible (edificios o vegetación). Por eso existen diferentes exactitudes del modelo para diferentes áreas.

El USGS (United States Geological Survey) a través del EROS Data Center es el encargado de distribuir y archivar la información recolectada en esta misión. Esta data del SRTM está disponible con 90m de resolución para casi todo el mundo y con 30m de resolución para algunos países incluido Puerto Rico.

Los datos distribuidos por la NASA/USGS tiene pixeles sin datos de lugares que en el momento de la misión había agua o grandes sombras las cuales impidieron la cuantificación de la elevación.

Todos los DEM de 7.5 minutos están realizados con líneas de contorno y son clasificados en dos grandes grupos de resolución en función de su exactitud: 30 metros y 10 metros de cuadrícula.

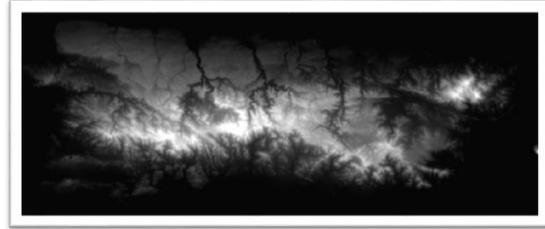


Figura 1
DEM Puerto Rico

Fuente: <http://eros.usgs.gov/>

Cuadrángulo de Ortofoto Digital

Un Cuadrángulo de Ortofoto Digital (DOQ) es una imagen digital, creada con una escala uniforme a partir de fotos aéreas. Este consiste en un mapa fotográfico en el cual se muestran las características del terreno en su posición. Este es la combinación de una imagen fotográfica con cualidades geométricas de un mapa, por lo que hace posible obtener mediciones directas de distancias, áreas, ángulos y posiciones de DOQ.



Figura 2

Ortofoto Digital Puerto Rico

Fuente: <http://datagateway.nrcs.usda.gov/>

Digital Graphic Raster

El (DGR) es una versión escaneada del mapa de 7.5 minutos topográfico del Servicio Geológico de los Estados Unidos mejor conocido por sus siglas en inglés USGS. Este ha producido para Puerto Rico una serie de mapas topográficos (cuadrángulos), los cuales cubren 7.5 minutos de longitud por 7.5 minutos de latitud a escala de 1:24,000. La isla de Puerto Rico está cubierta por 67 de estos.

El mapa topográfico es una representación de la superficie mediante curvas de nivel con el propósito de mostrar las elevaciones de la tierra, en adición muestra otras variables geográficas como la vegetación, suelos, red hidrográfica, y

localidades, todas estas identificadas con colores y símbolos.

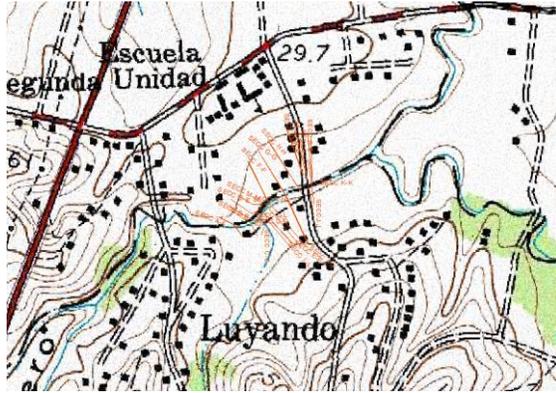


Figura 3

Cuadrángulo Topográfico Rincón

Fuente: <http://datagateway.nrcs.usda.gov/>

ArcGIS

El ArcMap (GIS) tiene la funcionalidad de servir como base de datos con información geográfica asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. Debido a la amplia disponibilidad de imágenes de satélite y aéreas, la digitalización por esta vía lo está convirtiendo en la principal fuente de extracción de datos geográficos.

Los datos de GIS representan objetos del mundo real como: carreteras, uso de suelos, altitudes. Existen dos formas de almacenar datos en un GIS: raster y vectorial. Los GIS raster son utilizados en estudios que requieren la generación de capas continuas. El GIS del proyecto incluye una serie de capas de datos que contienen los mapas digitales de alta calidad de la información geográfica. El GIS proporciona una forma de codificar y distribuir datos geospaciales.

Los principales elementos utilizados para el proyecto en GIS son un conjunto de datos estándar del USGS a escala 1:24,000 mostrados a continuación:

1. Digital Graphic Raster (DGR)- Una versión escaneada del 7.5 minutos mapa topográfico del USGS.
2. Modelo de Elevación Digital (DEM)- Cartográfica/ datos geográficos de las

elevaciones en coordenadas XYZ (vista de datos 3D).

3. Cuadrángulo de Ortofoto Digital- Una imagen digital creado a escala uniforme a partir de fotografías aéreas (mapa fotográfico).

METODOLOGÍA

El propósito de este análisis es comparar el cálculo de niveles de inundación realizado con la mensura tomada en el campo de un estudio hidrológico/hidráulico existente en comparación con la data de elevación extraída de un Modelo de Elevación Digital (DEM) y comparar las mismas con el fin de comprobar si esta práctica puede ser incorporada en el campo de la ingeniería hidráulica.

Para el análisis de las secciones hidráulicas se utilizaron datos como: Estudio Hidrológico/Hidráulico existente, Digital Graphic Raster o Cuadrángulo Topográfico Digital, Modelo de Elevación Digital (DEM) y Cuadrángulo de Ortofoto Digital, todos los mapas son del USGS.

Los programas utilizados para la realización del modelo son apropiados porque simulan la condición hidráulica en el área de estudio. En donde se utilizó un régimen de flujo continuo y se analizaron dos escenarios: la condición existente y el modelo obtenido del DEM.

Enfoque del Modelo

El presente modelo hidráulico fue realizado por el siguiente análisis:

Modelo Existente: Este modelo muestra dos secciones: el *Unnamed stream*, en unión con la Qbda. Gallinero aguas arriba y aguas abajo, la **Tabla 1**, muestra las secciones hidráulicas para ambas condiciones.

Modelo Propuesto: El modelo propuesto fue realizado con el propósito de verificar la precisión del análisis del cálculo de elevaciones extraídas de un DEM 30 por 30 del USGS con el fin de realizar el cálculo de nivel de inundación.

Tabla 1
Muestra las Secciones a lo Largo del Tramo

Tramo	Estación	Identificación de la sección
Aguas Arriba	312.4164	A
Aguas Arriba	282.243	B
Aguas Abajo	266.1044	L
Aguas Abajo	248.6652	E
Aguas Abajo	239.5819	M
Aguas Abajo	210.9601	F
Aguas Abajo	177.7909	G
Aguas Abajo	143.5584	H
Aguas Abajo	126.1896	Q
Aguas Abajo	121.427	R
Aguas Abajo	118.8954	I
Aguas Abajo	109.901	J
Aguas Abajo	106.9731	S
Aguas Abajo	100	K
Unnamed stream	31,3991	C
Unnamed stream	14.6277	D

Data Hidráulica

- Geometría:** La geometría utilizada en este análisis fue la existente para ambos modelos, la extraída del estudio hidrológico/hidráulico. En donde las secciones 312.4164 y 282.243 son aguas arriba del tramo y de la sección 266.1044 a la 100 son las estaciones aguas abajo de la Qbda. Gallinero. La Qbda. Gallinero tiene una unión con el Unnamed stream donde se encuentran las secciones 31.3991 y 14.6277.
- Coefficiente de rugosidad:** Los valores del coeficiente de rugosidad utilizados fueron determinados por una visita en el campo del agrimensor. Se utilizó un valor de 0.05 para el área de la planicie de inundación y 0.035 para representar el medio del canal. Para las secciones transversales del puente en coeficiente utilizado en el medio del canal fue 0.015.
- Puentes/alcantarillas:** Se mostró el puente de la condición existente.

Configuración del Modelo Propuesto

Para comenzar la simulación de las secciones hidráulicas se colocó en ArcGIS 10.1, el Digital Graphic Raster (DGR) es una versión escaneada del 7.5 minutos cuadrángulo topográfico del USGS, el Modelo de Elevación Digital (DEM) 30 por 30 de

USGS que es representación cartográfica de datos geográficos de las elevaciones en coordenadas XYZ (vista de datos 3D) y el Cuadrángulo de Ortofoto Digital que es una imagen digital creado a escala uniforme a partir de fotografías aéreas (mapa fotográfico), todas del municipio de Rincón, Puerto Rico.

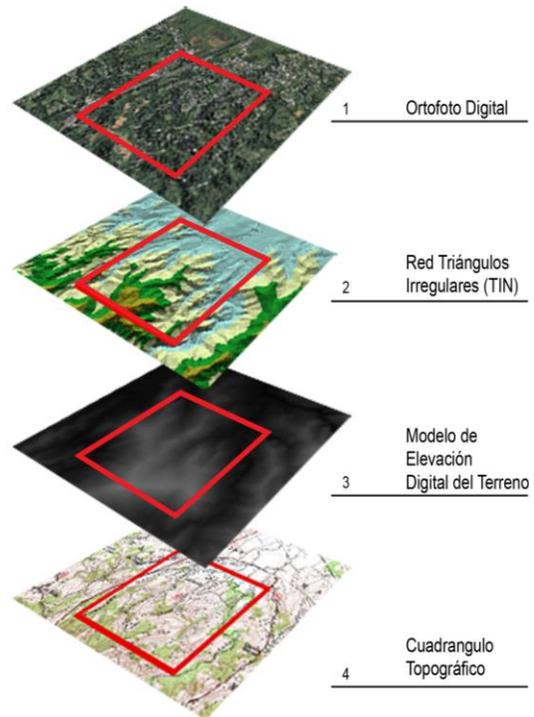


Figura 4

Capas Georreferenciadas por NAD 83 en ArcGIS 10.1

Luego de tener la serie de capas de datos georreferenciados con la North American Datum de 1983 (NAD 83) en ArcMap 10.1 como muestra la **Figura 4**, se localizó el lugar del proyecto en el cuadrángulo topográfico y se trazaron las secciones transversales existentes, obtenidas del estudio hidrológico/hidráulico. Se utilizó el cuadrángulo de ortofoto digital para corroborar que las secciones estuvieran en el lugar correcto.

El Modelo de Elevación Digital existente es uno tipo *Raster* el cual puede expresar diferentes estructuras de datos. Para la extracción de datos del DEM *Raster* del se generó un modelo tipo TIN (red irregular de triángulos) como muestra la **Figura 5**, para poder extraer los datos de elevaciones del mismo. En este método los triángulos se construyen ajustando un plano de tres puntos cercanos no

colineales, formando un mosaico que pueda adaptarse a la superficie del terreno en función a la complejidad del relieve. Luego se convirtió en uno formato ASCII para que fuera compatible con AutoCad Civil 3D y poder extraer la data de una manera más simple.

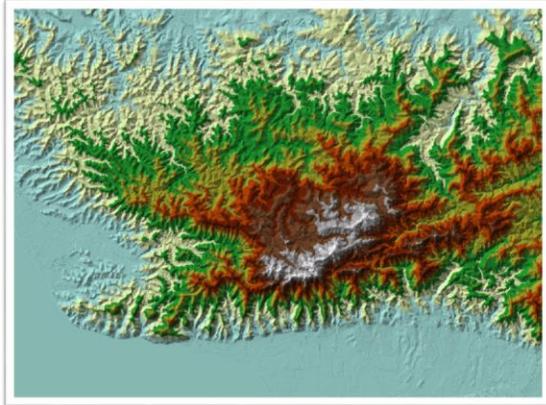


Figura 5
Modelo TIN Generado en ArcGIS

Luego de convertido el modelo a ASCII se colocaron las coordenadas X, Y y Z en AutoCad Civil 3D para que los mapas quedaran con las coordenadas adecuadas y los datos fueran más precisos.

Luego de extraída toda la data de elevaciones de las secciones hidráulicas se realizó el cálculo de porcentaje de error relativo entre las elevaciones de cada sección tomadas por el agrimensor y las generadas por el DEM. La **Ecuación 1**, fue utilizada para el cálculo de porcentaje de error relativo utilizada fue la siguiente:

$$\%error\ relativo = \frac{|Valor\ experimental - Valor\ teorico|}{|Valor\ teorico|} \times 100 \quad (1)$$

Modelación Hidráulica

Para la modelación hidráulica utilizando HEC-RAS hay varias cosas que deben tomarse en cuenta como: la geometría del puente y del canal, los mannings y la ubicación de los flujos.

En este análisis la Qbda. Gallinero, que es el canal principal la cual tiene catorce secciones y está conectado a otro río el Unnamed Stream el cual contiene dos; para un total de 16 secciones.

Durante la modelación en HEC-RAS se añadieron datos como los bancos de cada sección y se realizaron simulaciones de cada una de las secciones.

Para la modelación de las secciones hidráulicas en HEC-RAS se tomó el caudal de 57.11594 m³/s para la Quebrada Gallinero aguas arriba en la estación 312.4164 m, de 65.29809 m³/s para la Quebrada Gallinero aguas abajo en la estación 266.1044 m y de 27.34105 m³/s para el Unnamed stream en la estación 27.34105 m, de la condición existente y con la data extraída del DEM se crearon los perfiles de inundación en HEC-RAS y se recalculo en nivel de inundación para cada sección para un evento de lluvia con una recurrencia de 100 años-4 hrs.

DATOS Y RESULTADOS

El alto porcentaje de relativo en cada una de las estaciones puede ser a causa de la resolución del DEM, una muestra de esto se ve en la **Tabla 2** y en la **Figura 6**, la cual muestra los datos de la sección A (312.41).

Tabla 2
Muestra las Secciones a lo Largo del Tramo

Elevación Existente	Estación	Elevación DEM	% de Error
19.9714	16.0523	63.534	19.62356169
19.3959	16.998	73.534	12.36292206
18.6763	16.998	83.534	8.986255308
18.4422	16.998	93.534	7.830952923
17.682	16.486	113.534	6.763940731
18.1623	16.1376	116.287	11.14781718
17.92	15.715	119.287	12.3046875
17.71	15.25303	122.287	13.87334839
16.889	14.998	125.287	11.19663686
16.6629	15.1888	128.287	8.846599331
18.7369	15.378	131.287	17.92665809
18.7918	15.568	134.287	17.155355
18.715	17.171	146.542	8.250066791

El USGS de los Estados Unidos para un DEM de 30 metros de resolución utiliza un tipo cuadrícula debido a su simplicidad, facilidad de procesamiento y la eficiencia a la hora de procesar datos, pero estos tienen la desventaja en el

momento de ajustar el tamaño de la cuadrícula con las dimensiones de la superficie terrestre. Lo cual puede ser el factor causante de que el modelo tenga desplazamientos verticales como muestra la **Figura 7 y Tabla 3**. La precisión de la data extraída del DEM está en función tanto de la calidad como la resolución del mismo. Lo cual trae como consecuencia la ineficiencia de este método para la extracción de data de elevaciones para modelos de simulación hidráulica. Aunque generalmente estos sean efectivos para la definir canales, cuencas, obtener propiedades del suelo entre otras, la resolución de este tipo de DEM no es suficiente para extraer data de elevaciones de buena calidad.

La calidad y la resolución son dos aspectos muy importantes los cuales pueden afectar la calidad de los resultados como se ve en este caso.

La calidad del DEM se refiere a la exactitud de los datos de elevación y la resolución a la precisión de los mismos, específicamente a la separación de la rejilla horizontal y el incremento en la elevación vertical. En este caso la resolución de un DEM 30 por 30 metros del USGS no tiene la precisión adecuada para procesar datos de elevaciones. En adición a la comparación de los perfiles transversales, se hizo una comparación de perfiles longitudinales de ambos modelos.

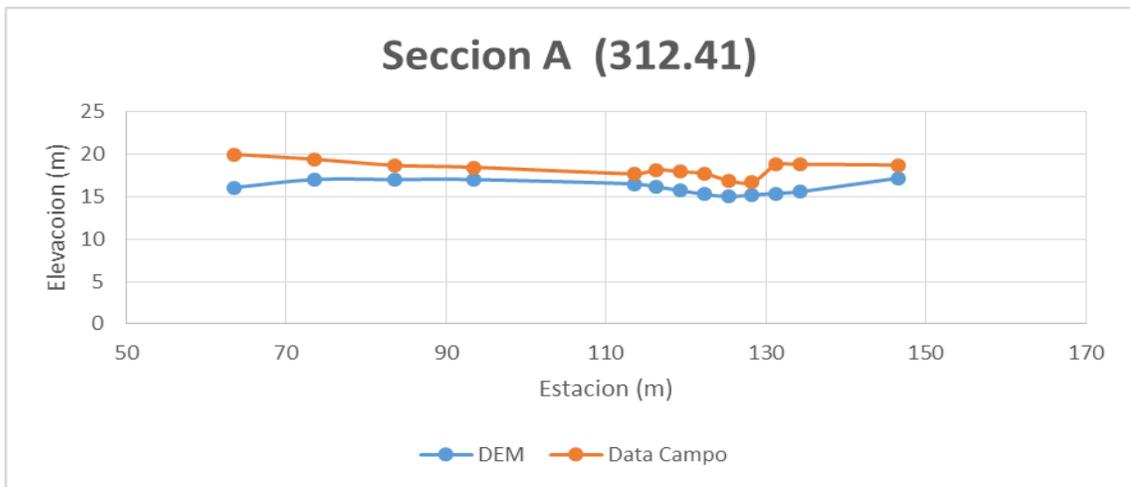


Figura 6
Muestra las Elevaciones de la Sección A tomadas en el Campo y las Extraídas del DEM

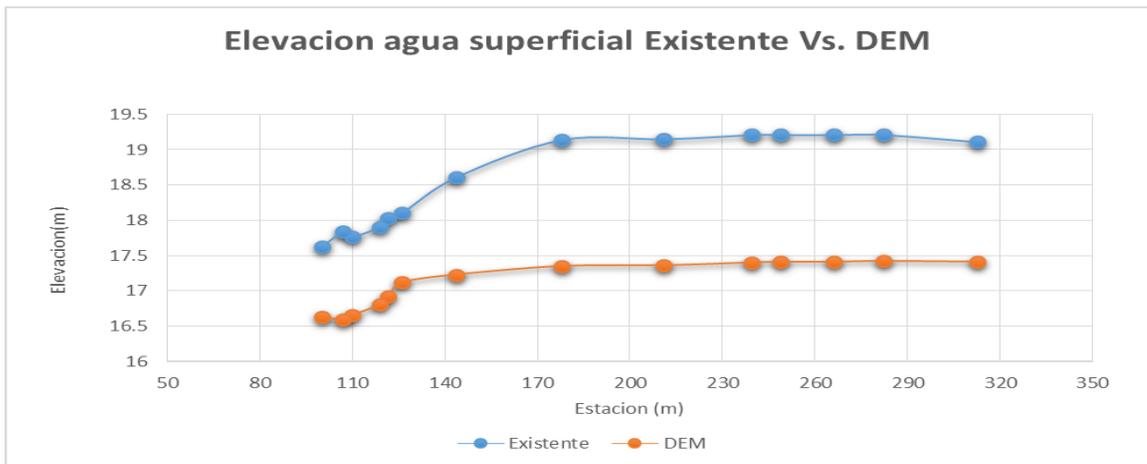


Figura 7
Perfiles Longitudinales para Ambas Condiciones

Los perfiles longitudinales están entre un margen de 5-10 por ciento de error. En donde se ve que el modelo se desplazó verticalmente aproximadamente 2 metros, a causa de los problemas de resolución del DEM.

Tabla 3
Niveles de Inundación de Ambas Condiciones Extraídas de HEC-RAS

Estación (m)	WSE Existente (m)	WSE DEM (m)	Diferencia	% de Error
312.4164	19.11	17.41	1.700	9.76
282.243	19.21	17.42	1.790	10.7
266.1044	19.21	17.41	1.800	10.3
248.6652	19.21	17.41	1.800	10.3
239.5819	19.21	17.4	1.810	10.4
210.9601	19.15	17.36	1.790	10.3
177.7909	19.14	17.35	1.790	10.1
143.5584	18.61	17.23	1.380	8.00
126.1896	18.11	17.12	0.990	5.78
121.427	18.03	16.92	1.110	6.56
118.8954	17.91	16.81	1.100	6.54
109.901	17.77	16.66	1.110	6.66
106.9731	17.84	16.6	1.240	7.46
100	17.63	16.63	1.000	6.01

La relación de resolución horizontal y vertical de los DEM de 30 metros tiene una gran incidencia las cuales implican diferencia en los cálculos elevación. Estos problemas de resolución generalmente son causados en las áreas planas y en los pozos y son derivados de los errores de interpolación durante la generación del mismo. Por lo que en consecuencia estos DEM 30 por 30 metros de resolución son insuficientes para proporcionar valores de elevaciones precisos para este tipo de análisis hidráulico.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La extracción de un Modelo de Elevación Digital del Terreno de buena calidad depende grandemente de su precisión o resolución, siendo notable que la calidad de este depende de la ubicación del mismo. En el análisis realizado quedo demostrado que la resolución de un DEM es de suma importancia a la hora de extraer datos precisos ya que la posible causa de que no se

obtuvieran los resultados esperados fue la forma de generación del mismo en conjunto con la poca resolución de este.

En datos anteriormente mostrados se presenta como resultado que un DEM 30 por 30 metros de resolución no cuenta con la suficiente capacidad para la extracción de datos de elevaciones fiables ya que se comprobó que el perfil longitudinal modelado en HEC-RAS estaba desplazado aproximadamente 2 metros verticalmente lo que es causado por problemas con la resolución y que las estaciones tuvieron un margen aproximados entre 10-15 por ciento de error relativo por la gran diferencia entre las elevaciones tomadas en el campo y las obtenidas del DEM.

HEC-RAS es una herramienta muy útil y fiable en procesos hidráulicos, ya que este tiene la capacidad de calcular los perfiles hidráulicos de un río o canal. En donde se mostró el nivel de inundación para cada condición de manera precisa. Basado en los resultados, se puede suponer que un DEM con mejor resolución y mayor tamaño de rejilla hubiera dado mejores resultados.

En la actualidad los DEM más utilizados son los de tipo cuadrícula por el fácil acceso y manera de extraer data de los mismos pero estos traen consigo algunos errores desde el momento de su generación. En adicción a esto cómo recomendación, el USGS debe crear distintos tipos de DEM con diferentes resoluciones para poder corroborar la fiabilidad de cada uno de los mismos en diferentes análisis de carácter hidrológico. En futuras investigaciones se deberían tomar en cuenta cómo afecta el método de obtención del DEM la calidad y resolución del mismo para poder ampliar las posibles aplicaciones que puedan tener los modelos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bosque, J. (1997). *Sistemas de información Geográfica*, Madrid, Rialp.
- [2] Presutti, M. E. (2002). *Evaluación de errores en modelos digitales de elevación (DEM) generados mediante diferentes técnicas de interpolación*. X Simposio

- Latinoamericano de Percepción Remota, SELPER, Cochabamba, Bolivia.
- [3] Wood, J. (1996). *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*. Ph.D. Dissertation, Department of Geography, University of Leicester, Leicester. UK.
- [4] ESRI. www.esri.com. *Digital elevation model issues in water resources modeling*. Recuperado el 26 de diciembre de 2013, proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm.
- [5] USGS. (Abril de 2000). *U.S. GeoData Digital Elevation Models*. USGS Fact Sheet 040-00.
- [6] Jie Yan, Townsend, Ronald D. and Daneshfar (2006). *Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation*. Canada Journal of Civil Engineering Vol. 33. Published on NRC.
- [7] US Army Corps of Engineers. (January 2010). *HEC-RAS River Analysis System*. User Manual. Version 4.1.
- [8] US Army Corps of Engineers. (January 2010). *HEC-RAS River Analysis System*. Computer Program. Version 4.1.
- [9] Forte, F.; Strobl, R.O.; Pennetta, L. (2006). *A methodology using GIS, aerial photos and remote sensing for loss estimation and flood vulnerability analysis in the supersano-ruffano-nociglia graben, southern Italy*. Publication from Environ Geol.
- [10] Wu, S.; Li, J. and Huang, G. H. (2008). *Characterization and Evaluation of Elevation Data Uncertainty in Water Resources Modeling with GIS*. Water Resource Manage. Paper 972.
- [12] Presutti, M. E. (25 al 30 abril 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 Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p. 2943-2950.
- [13] Isioye, A. O.; and Jobin, P. (March 2012). *An Assessment of Digital Elevation Models (DEMs) From Different Spatial Data Sources*. Asian Journal of Engineering, Sciences & Technology, Vol. 2, Issue 1.
- [14] Onate-Valdovieso, Fernando, Bosque Sendra, Joaquin. (2007). *Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfológicas de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, pp457-462.