



DOI:10.24850/j-tyca-2018-06-07

Artículo

Evaluación del Modelo de Elevación Digital oficial mexicano (Continuo De Elevación Mexicano, CEM 3.0) de INEGI

Evaluation of the official Mexican Digital Elevation Model (Mexican Elevation Continuum, CEM 3.0) from INEGI

Edgar Misael Uribe-Alcantara¹José Cruz Escamilla-Casas²Enrique Cruz-Chavez³

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, edgar_uribe8920@uaeh.edu.mx

²Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto, Hidalgo, México, jocesca@uaeh.edu.mx

³Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto, Hidalgo, México, ecruz@uaeh.edu.mx

Autor para correspondencia: Edgar Misael Uribe-Alcantara, edgar_uribe8920@uaeh.edu.mx

Resumen

Se realizó una evaluación del modelo de elevación digital (MED) oficial mexicano, también conocido como Continuo de Elevación Mexicano (CEM 3.0), del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI); a partir de datos de elevación LiDAR en tres zonas representativas de altitudes en México: 1) una zona agreste con pendientes pronunciadas y elevaciones altas; 2) una planicie costera con pendientes suaves y elevaciones muy bajas; y 3) una zona de transición con características intermedias. Para la zona agreste y de transición, los datos de ambos MED muestran una fuerte similitud. Sin embargo, en la planicie los errores son muy altos (decenas de veces el valor de la

elevación), y no guardan una regresión lineal. Aparentemente, estos errores se deben a un procedimiento no documentado aplicado por el INEGI para el tratamiento de cuerpos de agua menores. Alrededor de estos cuerpos se han creado murallas de cientos de metros, quizás para forzar que la red de drenaje se dirija a cuerpos de agua mayores (a pesar que la práctica recomendada consta en que la red de drenaje cruce los cuerpos de agua). Por otra parte, debido a que el INEGI trunca decimales en el CEM 3.0, se crean extensas terrazas ficticias con la misma elevación, cuando en realidad, debería existir un suave declive. Por lo cual, la verdadera resolución del CEM 3.0 es mucho menor, a lo sugerido por INEGI (longitud de pixel = 15m). Desafortunadamente, los problemas descritos sugieren que el uso del CEM 3.0 no es recomendable, en especial con aplicaciones hidrológicas e hidráulicas.

Palabras clave: CEM, continuo de elevación mexicano, modelo elevación Digital, LiDAR, MED, cuenca del Papaloapan, Hidrología México, evaluación de productos de INEGI

Abstract

The official Mexican Digital Elevation (MED), known as the Mexican Elevation Continuum (CEM 3.0), of the National Institute of Statistics, Geography and Informatics (INEGI) is evaluated by comparison with LiDAR elevation data in three representative areas of elevations in Mexico: 1) a hilly region with steep slopes and high elevations, 2) a coastal plain with gentle slopes and very low elevations, and 3) a transition zone with intermediate features. For the hilly and transition zone, both datasets show a strong similarity. However, in the plain the errors are very high (tens of times the value of the elevation), and the datasets do not show a linear regression. Apparently, these errors are due to an undocumented procedure applied by INEGI for the treatment of minor water bodies. Around these bodies, walls of hundreds of meters have been created, probably to force the drainage network to be directed to larger water bodies (instead, the recommended practice is for the drainage network to cross the water bodies). On the other hand, because INEGI truncates decimals in the CEM 3.0, large fictitious terraces with the same elevation are created, when in reality, there should be a smooth slope. Therefore, the true resolution of the CEM 3.0 is much lower than suggested by INEGI (pixel length = 15 m). Unfortunately, the described problems suggest that the use of CEM 3.0

is not recommended, especially in hydrological and hydraulic applications.

Keywords: CEM, Mexican Continuum Elevation Model, Mexican Digital Elevation Model, LiDAR, Papaloapan Basin, Hydrology and hydraulics, Evaluation of INEGI products

Recibido: 05/12/2017

Aceptado: 24/04/2018

Introducción

El modelo de elevación digital (MED) se han convertido en un insumo cada vez más importante, en lo que respecta a los análisis hidrológicos e hidráulicos. Gracias a los MED es posible estimar rasgos hidrológicos como dirección de flujo, área contribuyente, red hidrológica y otros rasgos geomorfológicos relacionados, como pendiente y aspecto, entre otros. Los MED, en combinación con los sistemas de información geográfica, también constituyen un insumo importante para la elaboración de mapas de peligro por riesgos hidrometeorológicos (Boudaghpour, Bagheri, & Bagheri, 2014; Elkhachy, 2015; Kourgialas & Karatzas, 2011; Manfreda, Leo, & Sole, 2011) y geológicos (Calligaris, Poretti, Tariq, & Melis, 2013; Del Ventisette, Righini, Moretti, & Casagli, 2014; Dou, Tien-Bui, Yunus, Jia, Song, Revhaug, Xia & Zhu, 2015; Guzzetti, Mondini, Cardinali, Fiorucci, Santangelo & Chang 2012; Lucieer, Jong, & Turner, 2014; Raman & Punia, 2012; Shahabi & Hashim, 2015), en diversos países y a diversas escalas espaciales. En México, por ejemplo, el primer mapa nacional de susceptibilidad a inundación fue elaborado a partir de un MED (Uribe Alcántara, Montes-León, & García-Celis, 2010). Este mapa fue declarado posteriormente, como el oficial de inundación mexicano, por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (comunicación personal, Salas Salinas, Marzo de 2011 ESTA REFERENCIA NO ESTÁ CITADA POR COMPLETO EN LAS REFERENCIAS FINALES). Dicho mapa fue creado a partir del MED

obtenido satelitalmente mediante la Misión Topográfica de Radar sobre Transbordador (SRTM, por sus siglas en inglés). Aunque en ese entonces, existía un MED publicado por el Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI) de mayor resolución (longitud de pixel de 30 m, contra 90 m del SRTM), conocido como CEM 1.0 (Continuo de Elevación Mexicano, Versión 1), se identificaron en él varias discontinuidades, que impedían su aplicación para el correcto establecimiento de la dirección de flujo, que a su vez es indispensable para calcular la acumulación de escurrimiento. Desafortunadamente, estas discontinuidades no han sido documentadas en la literatura, pero la comunidad de usuarios tiene conocimiento de ellas y se deben a que el CEM fue creado mediante la unión de las cartas topográficas. Las discontinuidades se presentaban en los límites entre cartas, es decir, que el proceso de unión de cartas no había resultado en curvas de nivel continuas. Por lo cual, el MED se consideró inadecuado para un análisis hidrológico, y se prefirió usar el MED del SRTM, a pesar de contar con menor resolución. Por lo anterior destaca la necesidad crítica de evaluar, regular y formalmente los MED publicados por INEGI.

Recientemente, el INEGI publicó la versión 3 del CEM que es la más exacta y avanzada posible publicada hasta ahora (INEGI, 2017a), y con una mayor resolución (longitud de pixel de 15 m). Cabe mencionar que la documentación del CEM 3.0 es muy superficial, y no abunda en detalles técnicos, pero el INEGI lista las siguientes ventajas:

- Se utilizaron diversos tipos de información fuente para generar el CEM.
- La información fuente se estructuró en continuos.
- Los continuos permitieron una disponibilidad total e inmediata de la información fuente con cobertura del territorio continental mexicano.
- Cuenta con una resolución de 15 metros que permite la realización de diversos análisis.
- Se utilizó un modelo de interpolación robusto reconocido a nivel internacional denominado ANUDEM
- Se encuentra disponible en el portal del INEGI.

Además, INEGI indica que el error cuadrático medio general en el CEM 3.0 es de solo 4.8m, pero que los errores como función de la pendiente se comportan según la siguiente tabla (Tabla 1):

Tabla 1. Errores cuadráticos medios en el CEM 3.0 como función de la pendiente.

Rango de	Error cuadrático
----------	------------------

pendiente (%)	medio (m)
0 a 14	4.5
15 a 36	6.0
Mayor que 36	7.2

Dadas todas las virtudes del CEM 3.0 indicadas por INEGI, revisar productos que fueron realizados con los MED de menor resolución, como el Mapa Nacional de Índice de Inundación (realizado a partir del SRTM), parece de gran interés, pues en teoría debería resultar en productos de mayor exactitud y precisión. Sin embargo, debido a que el primer MED de INEGI presentaba problemas de calidad se considera apropiado realizar una evaluación del CEM 3.0, antes de generar nuevos productos a partir de él.

Además del CEM 3.0, el INEGI ha publicado MED basados en tecnología LiDAR (INEGI, 2017b). Se espera que la tecnología LiDAR ofrezca mayor resolución y exactitud que los datos del CEM 3.0. Los datos LiDAR de INEGI son publicados en azulejos. De manera que cada división de un subcuadrante básico (p. ej., E14D19), está cubierto por 24 azulejos (6 columnas x 4 líneas). Cada azulejo tiene aproximadamente 1 265 columnas y 1 468 líneas (~ 1.9 M de píxeles), con una longitud de pixel de 5 m. Por lo cual, cada azulejo cubre un área aproximada de 46 km². En total, el cuadrante cuenta entonces con ~ 45 M de píxeles. De esta manera, por ejemplo, cubrir una cuenca de 50 000km², resultaría en un mosaico compuesto por miles de azulejos LiDAR, y billones de píxeles. Por lo cual, crear productos de macro escala con esta resolución tan alta resultaría en un reto enorme en términos de recursos computacionales. Sin embargo, se considera que LiDAR podría servir como punto de referencia para una evaluación del CEM 3.0, que es un MED más apropiado para productos de meso y macroescala. Una ventaja adicional de CEM 3.0 sobre LiDAR, como ya se mencionó, es que se encuentra disponible en todo el país, mientras que LiDAR no. Por lo tanto, este artículo tiene como objetivo evaluar el CEM 3.0, empleando LiDAR como punto de referencia.

Materiales y métodos

El CEM 3.0 nacional distribuido por INEGI para todo el país ocupa aproximadamente 53 Gb en disco duro. Entonces, se esperaría que LiDAR tuviera aproximadamente nueve veces ese tamaño, debido a que la longitud de pixel del CEM 3.0, es 3 veces mayor; por ejemplo, en un pixel del CEM 3.0 alcanzan nueve pixeles de LiDAR. Por lo cual, llevar a cabo una evaluación de todo el CEM 3.0 a nivel nacional resultaría en una cantidad extraordinaria de recursos de cómputo. Y los tiempos de procesamiento resultarían imprácticos. Se propone entonces, evaluar el CEM 3.0 en una cuenca representativa de los rangos de elevación y pendiente observados en todo el país. Se decide seleccionar la cuenca del Papaloapan, que cuenta con tres zonas representativas de la variabilidad de altitud observada en el país:

1. Zona agreste: altitudes mayores a 3 000 m, pendientes pronunciadas y fuerte variabilidad espacial.
2. Zona de Transición: altitudes alrededor de 1 000 m, pendientes intermedias, y variabilidad espacial intermedia.
3. Planicie: altitudes por debajo de los 100 m, con pendientes y variabilidad espacial sumamente suaves.

Se considera que estas zonas son representativas de lo que se observa en general en el país, pues son observables en varias de sus regiones hidrológicas, sobre todo en zonas propensas a inundación por desbordamiento de ríos, como en Tabasco, donde las cuencas son sumamente grandes, pero comienzan en la sierra con topografía muy accidentada y terminan en planicies de inundación extensas con numerosos cuerpos de agua.

Los datos, tanto del CEM 3.0, como de LiDAR fueron descargados del sitio de internet del INEGI. En términos de preprocesamiento, los datos de CEM 3.0 son distribuidos en formato de azulejos rectangulares y también en azulejos estatales. Se descargaron los azulejos estatales y se realizó un mosaico con todos los estados que intersectan la cuenca. La Figura 1 muestra el área contribuyente relacionada con la desembocadura indicada en el mapa, que está asociada a la Región hidrológica del Papaloapan. Además, también se muestra cada una de las zonas indicadas con anterioridad (agreste, transición y planicie).

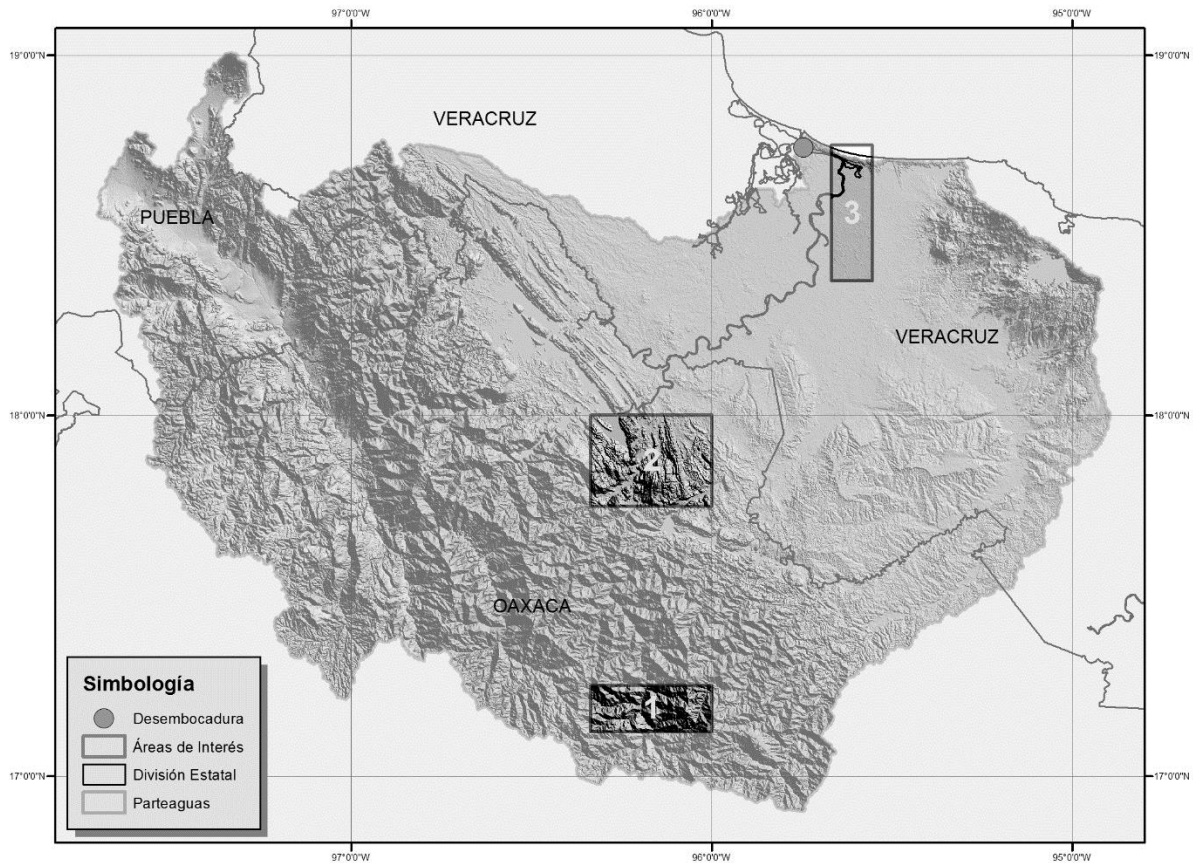


Figura 1. Cuenca del río Papaloapan asociada a la desembocadura mostrada en el mapa con un círculo. Además, se muestra cada una de las zonas del presente estudio dentro de un recuadro con un número que corresponde a: 1) zona agreste; 2) zona de transición; y 3) Planicie.

En cuanto a LiDAR se descargaron 12, 24 y 16 azulejos, para la zona agreste, la de transición y la planicie, respectivamente. Estos azulejos fueron unidos en un mosaico para cada zona. Como ya se mencionó, LiDAR no cubre todo el país, así que se identificaron zonas que estuvieran cubiertas por LiDAR. El número de mosaicos difiere en función de su disponibilidad, que es mucho menor en la zona agreste. La **Figura 2, Figura 3 y Figura 4** muestran los mosaicos individuales resultantes para cada una de las tres zonas representativas mencionadas anteriormente.

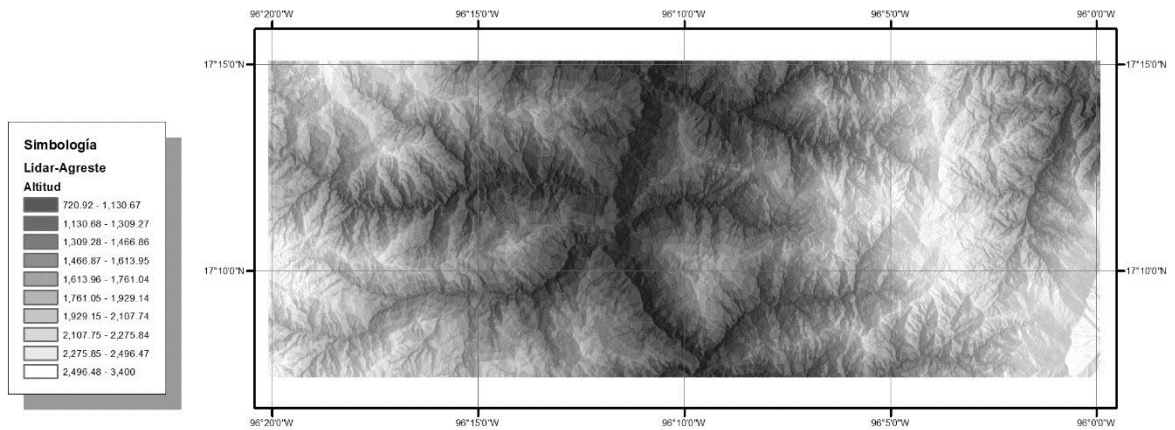


Figura 2. Modelo de Elevación Digital Lidar para la zona agreste. La altitud se encuentra en metros.

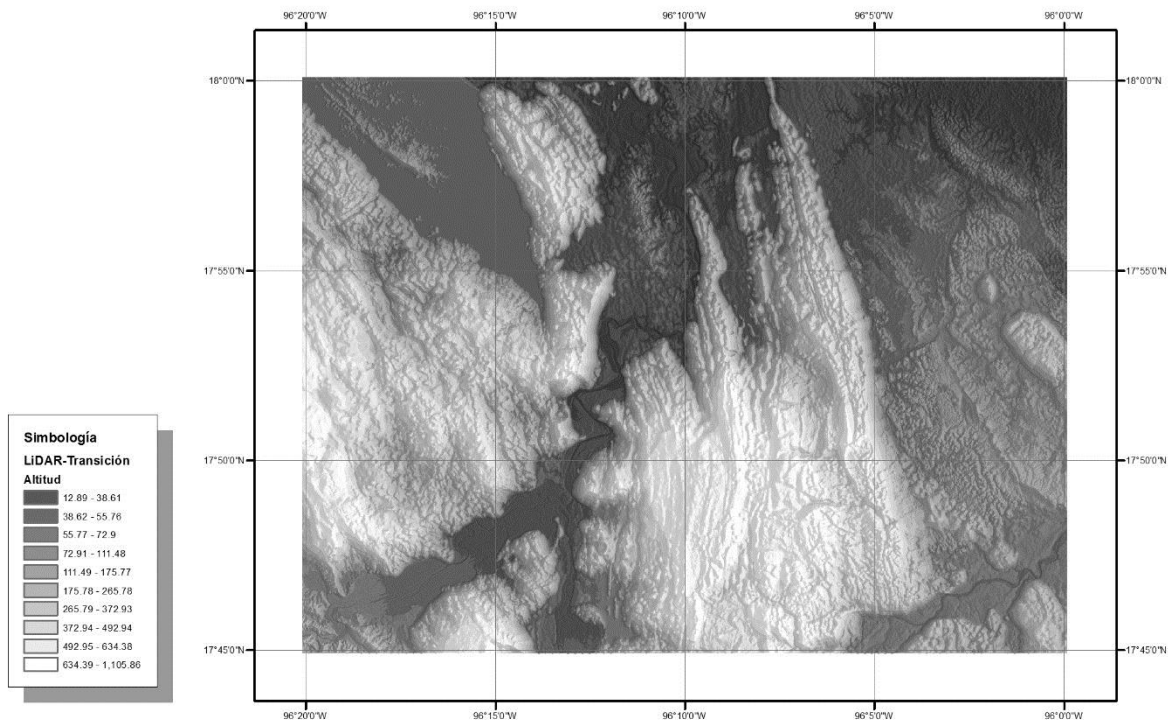


Figura 3. Modelo de Elevación Digital Lidar para la zona de transición. La altitud se encuentra en metros.

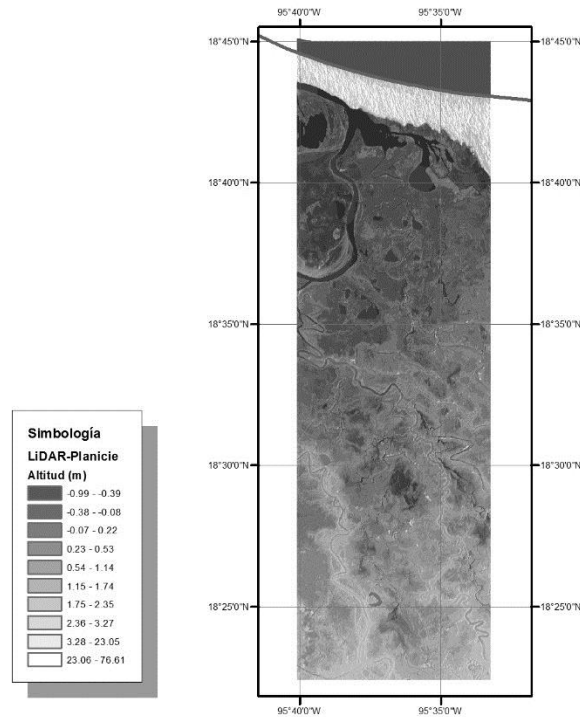


Figura 4. Modelo de Elevación Digital Lidar para la planicie. La altitud se encuentra en metros.

La metodología aplicada para la evaluación consistió básicamente en la comparación del CEM 3.0 contra LiDAR (p. ej., cálculo de errores). Los errores fueron calculados tomando LiDAR como punto de referencia, como indica la ecuación (1):

$$Error = Z_{CEM} - Z_{LiDAR} \quad (1)$$

donde Z_{CEM} representa la elevación del CEM 3.0, y Z_{LiDAR} simboliza la elevación de LiDAR. De manera que, si los errores son positivos, el CEM 3.0 está sobreestimando la elevación; y si los errores son negativos, el CEM 3.0 está subestimando la elevación. En términos de preprocesamiento, los dos MED tienen diferentes resoluciones y se encuentran en diferentes proyecciones. Por lo cual, antes de compararlos, fue indispensable proyectarlos a coordenadas geográficas con *datum* WGS84. Y, en cuanto a la diferencia en resoluciones, en todo raster se supone que el valor contenido por un pixel corresponde al

valor promedio del área cubierta. Así que, los datos de LiDAR fueron agregados a la resolución del CEM 3.0 (p. ej., se promediaron todos los píxeles contenidos de LiDAR en un píxel del CEM 3.0), antes de su comparación. Durante la aplicación de esta metodología se empleó el raster del CEM 3.0 como plantilla, así que el raster resultante del procesamiento de LiDAR es idéntico en estructura al CEM 3.0, es decir, los píxeles de ambos rasters corresponden exactamente en el espacio. De esta manera, su comparación directa es factible.

Por otra parte, se ha documentado que los errores en la tecnología LiDAR podrían estar asociados al aspecto y a la pendiente del terreno (Bater & Coops, 2009; Goulden, Hopkinson, Jamieson, & Sterling, 2016). Por lo cual, también se calcularon aspecto y pendiente a partir del DEM del LiDAR agregado, ya que éste se considera el punto de referencia, y se exploró la relación de estos rasgos con los errores, mediante histogramas tridimensionales.

Resultados

Una vez que los MED tuvieron la misma resolución y proyección, se procedió a realizar una comparación entre ellos mediante los diagramas de dispersión mostrados en la Figura 5. Es posible apreciar que, para las zonas agrestes y de transición, las altitudes de ambos MED tengan una correspondencia muy cercana a la relación identidad ($CEM = LiDAR$). Quizás la diferencia más notable, entre estas dos zonas, sólo sea que en la zona de transición, el rango de error para para altitudes bajas es mayor, mientras que para altitudes mayores, el rango en los errores se vuelve menor. Desafortunadamente, en el caso de la planicie, la relación está lejos de ser lineal. Una buena porción de las muestras, sobre todo para los valores de altitud baja en LiDAR, muestra valores muy distintos. Mientras que las altitudes LiDAR se encuentran entre - 1 m y 8 m, aproximadamente. Los datos de CEM 3.0 se encuentran entre - 10 y 150 m. Esta variación es más evidente para altitudes entre 0 y 2 m en lidar. Por lo cual, CEM 3.0 está incrementando hasta 70 veces los datos de elevación, un error sumamente desproporcionado.

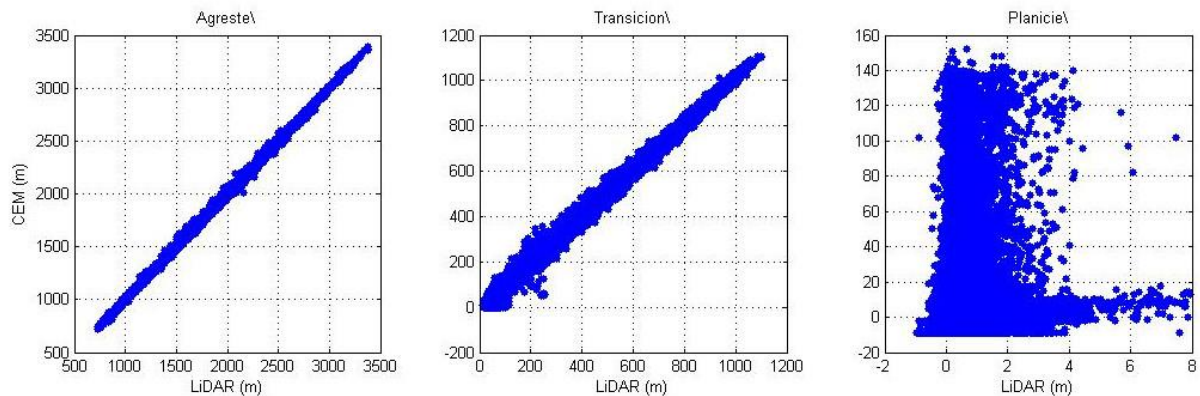


Figura 5. Diagramas de dispersión entre el MED de LiDAR y el CEM 3.0 para cada una de las zonas de interés: agreste, transición y planicie, de izquierda a derecha, correspondientemente.4

Posteriormente, se intentó identificar a qué se debían los errores tan altos en la planicie, para lo cual se realizaron mapas de errores. La **Figura 6**, **Figura 7**, **Figura 8**, muestran los mapas de errores para cada zona. La zona agreste no muestra un patrón espacial definido. Sin embargo, la zona de transición, muestra subestimación en cuerpos de agua mayores, como la Presa Miguel de la Madrid (o Cerro de Oro), ubicada al noroeste del dominio mostrado, y algunas afluentes del río Papaloapan.

Por último, la **Figura 8** muestra en el lado izquierdo los errores de la planicie, y en su lado derecho, los cuerpos de agua según INEGI (escala 1:50 000). En estos mapas es posible observar que los errores revelan una distribución fuertemente asociada con los cuerpos de agua; sin embargo, en algunos de éstos, la altitud está siendo subestimada, mientras que, en otros cuerpos de agua, la altitud está siendo severamente sobrestimada. Resulta lamentable que hoy en día no existe documentación del tratamiento de cuerpos de agua en el CEM 3.0 por parte del INEGI. Tratando de elaborar una explicación, es posible notar que los cuerpos de agua mayores como la afluente principal del río Papaloapan muestra una subestimación (este fenómeno también se observa en la zona de transición, en la presa Miguel de la Madrid). Mientras que, por otra parte, los cuerpos de agua menores tienen sobreestimaciones extremas a su alrededor. Aparentemente, el INEGI creó barreras artificiales de más de 100 m de altura alrededor de cuerpos de agua menores. Esto pudo ser realizado para forzar que la red

de drenaje se dirigiera a los cauces principales, y no a los cuerpos de agua menores; ésta no es la práctica recomendada.

La práctica que se sugiere consta en que, la red de drenaje cruce los cuerpos de agua, no que los rodee. Por otra parte, al aumentar de manera artificial la altitud alrededor de cuerpos de agua; el INEGI impide la identificación de cuerpos de agua menores y sus planicies de inundación asociadas. La identificación de estos rasgos es de suma importancia para el estudio de procesos de inundación. Por último, tener dos tratamientos inconsistentes de cuerpos de agua vuelve más difícil la comprensión y tratamiento de los errores a los potenciales usuarios, pues el tratamiento no es sistemático.

La **Figura 8** también muestra dos secciones transversales, una orientada de noroeste-suroeste que cruza por regiones donde los errores son muy altos y existen cuerpos de agua. Esta sección confirma que los errores oscilan entre 2 y más de 120 m en distancias muy cortas. Por otra parte, se observa una sección transversal norte-sur, esta vez de altitudes para una zona donde los errores son muy bajos. En esta sección es interesante observar que los datos de altitud del CEM 3.0 están escalonados, es decir, que la altitud se mantiene constante por cientos de metros, y después decrece como escalón. Lo anterior sugiere la existencia de terrazas, pero eso es falso, este fenómeno se debe al hecho de que el CEM 3.0 es publicado por el INEGI en archivos de datos enteros ("Integer"), y no reales ("Float"), es decir, los decimales son truncados. Incluso los datos de SRTM, que tienen una menor resolución (90 m), se publican con valores reales. Truncar los decimales en el CEM 3.0, impide ver la variación gradual entre cada valor entero. Esto también tiene severas consecuencias en cualquier producto hidrológico derivado del CEM 3.0, porque implican extensas planicies con pendiente igual a cero, lo cual puede resultar en redes de flujo muy distintas a la realidad. Aún peor, el tamaño de pixel en un MED debe ser escogido en función de la verdadera resolución de la información que es posible proporcionar. En este caso, aunque el tamaño de pixel sea de 15 m, los valores de la altitud permanecen constantes por cientos de metros, a pesar de que esto no ocurre en la realidad. Por lo cual, la verdadera resolución del CEM 3.0 en planicies es mucho menor de lo indicado, y el tamaño de pixel debería ser de cientos de metros, no de 15 m. Otra solución, evidentemente, sería que INEGI proporcione un CEM 3.0, en el que no se trunquen los decimales.

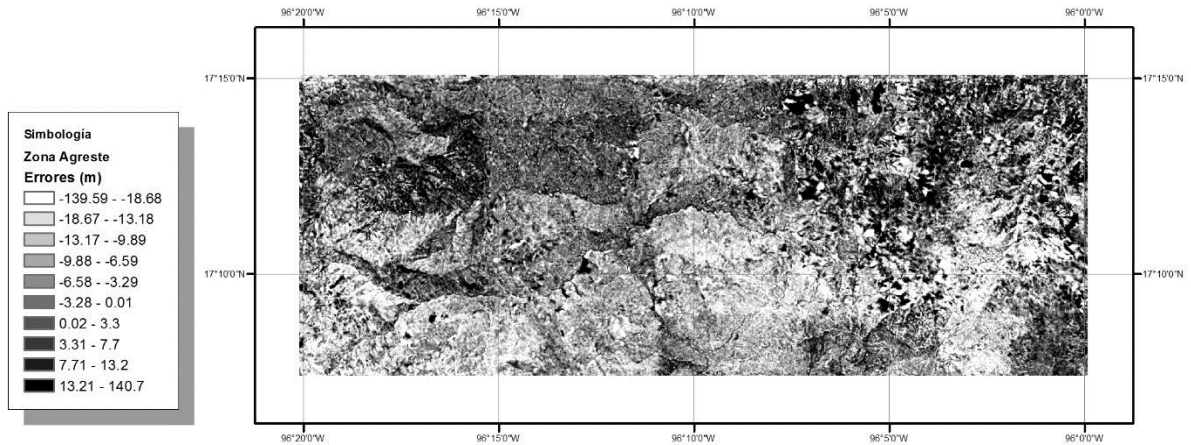


Figura 6. Mapa de errores para la zona agreste.

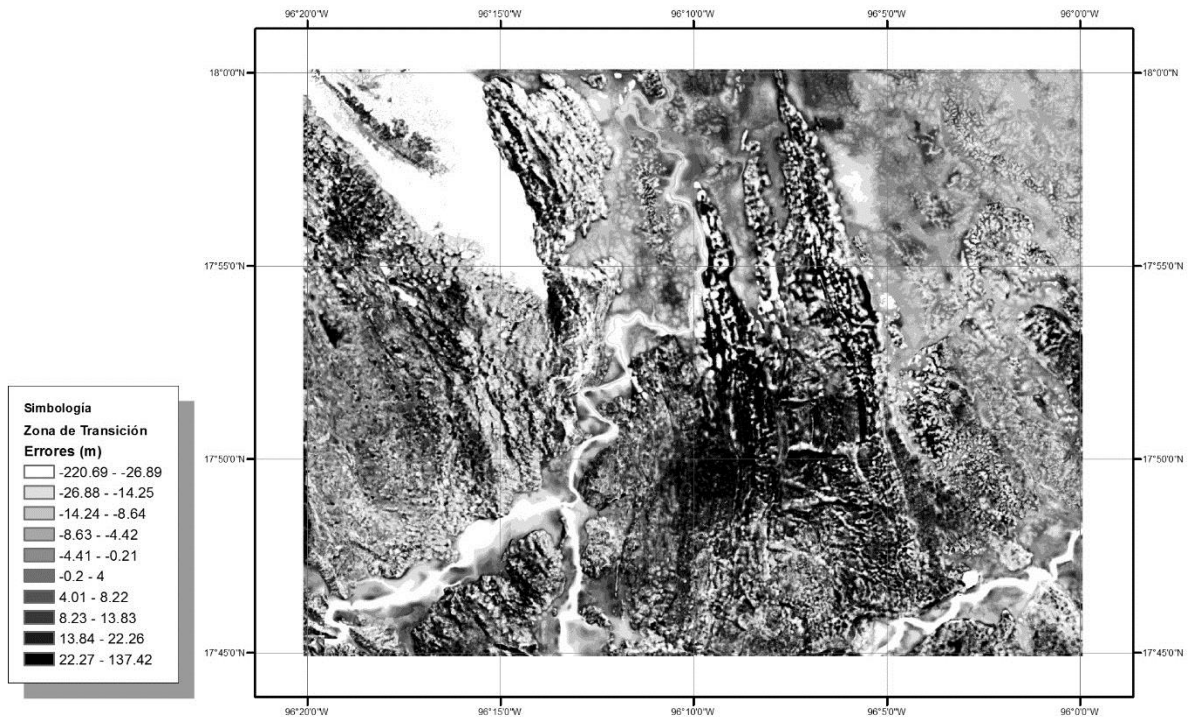


Figura 7. Mapa de errores para la zona de transición.

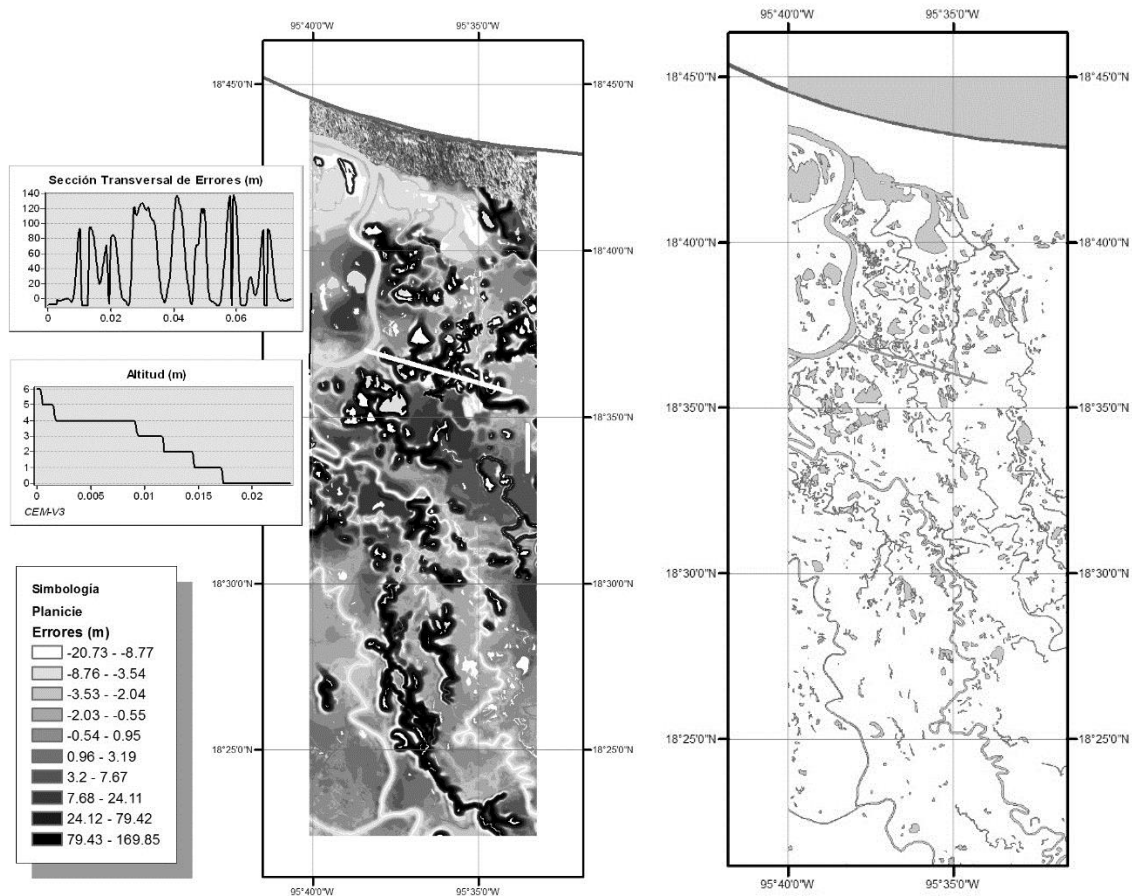


Figura 8. Mapa de errores para la planicie (lado izquierdo), cuerpos de agua (lado derecho), y secciones transversales de errores y altitud para una zona con errores altos y errores bajos, correspondientemente.

La Tabla 2 expone el error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés), la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), y el coeficiente de correlación de Pearson (PCC, por sus siglas en inglés), para cada una de las tres zonas. Como es de esperarse, son menores para la zona agreste y la de transición, pero mayores para la planicie. El INEGI reporta que el RMSE para el CEM 3.0 es función de la pendiente, y es de: 4.5 m para pendientes de 0 a 14%, de 6 m para pendientes entre 15 y 36%, y para pendientes mayores es de 7.2 m. Según esta información, se debería esperar que el error disminuyera con la pendiente, pero los cálculos aquí mostrados indicaron lo opuesto: el error aumenta con el inverso de la pendiente. En el caso de la planicie, de hecho, los errores calculados son hasta ocho veces más grandes que los reportados por el INEGI. Es claro que estos errores se

deben a la metodología empleada para tratar cuerpos de agua, pero incluso, en el caso de la zona agreste, donde el error reportado debería estar cercano a 7.2 m, el valor calculado es de aproximadamente el doble.

Tabla 2. Tabla de errores absolutos medios (MAE), raíz de errores cuadráticas medios (RMSE), y Coeficiente de Correlación de Pearson (PCC), para cada una de las zonas de interés.

Zona	MAE (m)	RMSE (m)	PCC
Agreste	9.97	13.33	0.9997
Transición	14.32	20.52	0.9997
Plana	15.99	34.55	-0.0558

Por último, la **Figura 9** muestra el histograma tridimensional de los errores como función de la elevación, el aspecto y la pendiente para la zona agreste, de transición y planicie (de la línea superior a la inferior, correspondientemente). Para la zona agreste, los errores no muestran una clara dependencia de la elevación o la pendiente. Sin embargo, sí muestran una dependencia clara del aspecto. En cuyo caso, el histograma tiene la forma de una parábola orientada hacia abajo, con su vértice, correspondiente a los errores más altos (cerca de + 10 m), ubicado alrededor de 180°. Por otra parte, ambos brazos de la parábola alcanzan la subestimación más alta (error aproximado de - 20 m), en los aspectos de 0° y 360°. Esto parece ser un indicio del efecto que tiene el aspecto en el error de los sistemas LiDAR, que es un fenómeno ya documentado en la literatura (Bater & Coops 2009; Goulden *et al.*, 2016) , y está asociado, en última instancia, a la magnitud del ángulo de incidencia del láser sobre la superficie terrestre. Por otra parte, para la zona de transición, se observa una subestimación muy alta para elevaciones bajas, y zonas planas (relacionada con cuerpos de agua mayores). Y una distribución bimodal de los errores como función del aspecto, con los máximos rangos observándose alrededor de aspectos de 80° y 260°. Por último, para la planicie, los errores más altos se observan en elevaciones menores a los 2 m, y con pendientes muy cercanas a cero. Mientras que el aspecto no parece guardar ninguna relación con los errores. Quizás, las conclusiones más notables de este

análisis sean que: 1) Los errores son muy altos para elevaciones bajas y pendientes bajas, muy probablemente debido a la metodología empleada por el INEGI para relleno de datos de elevación en zonas ocupadas por cuerpos de agua menores; y 2) en la zona agreste, los errores muestran una clara relación con el aspecto que es consistente con lo esperado en sistemas LiDAR.

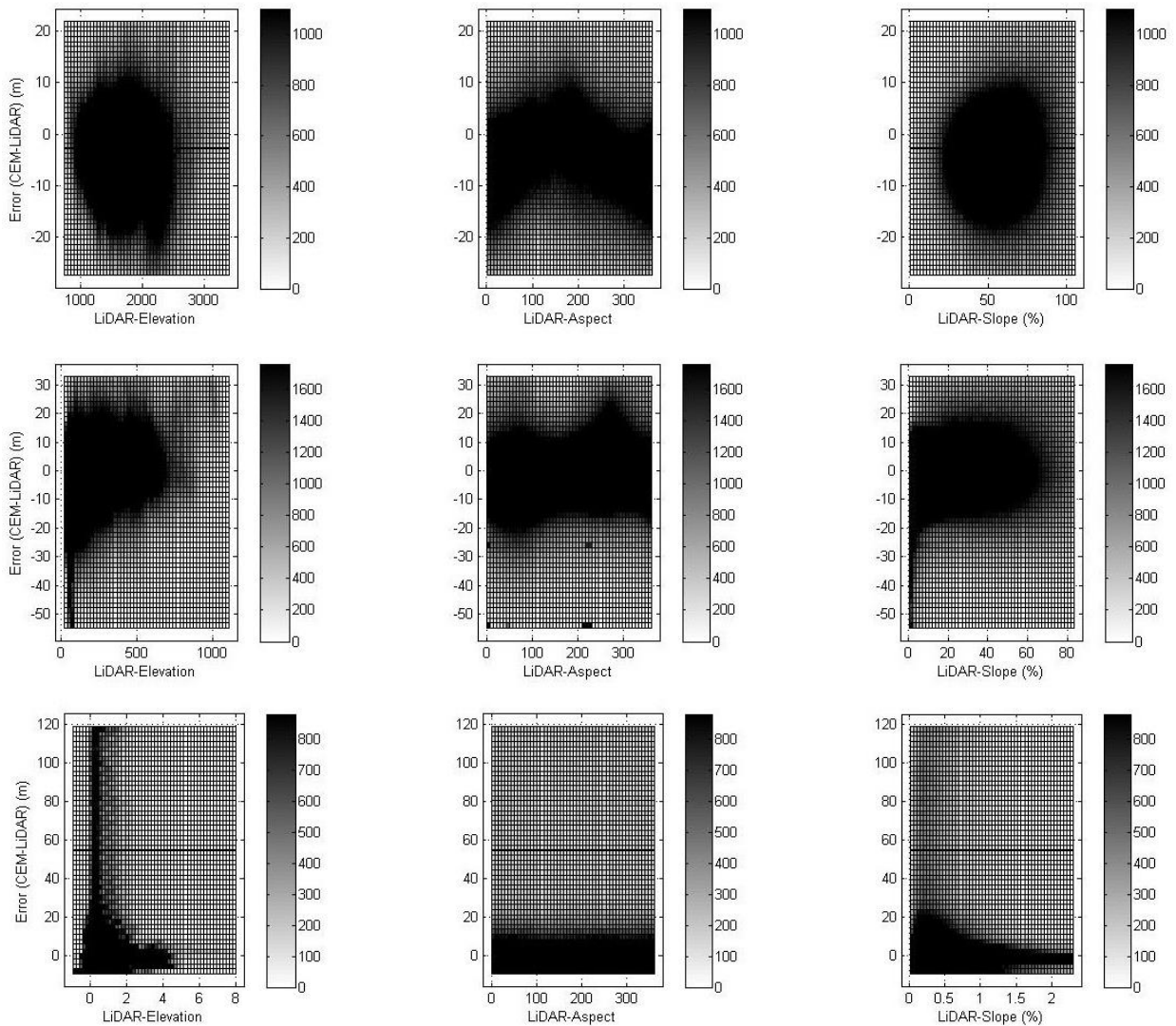


Figura 9. Histogramas tridimensionales de los errores en relación con la elevación, aspecto y pendiente, de izquierda a derecha, correspondientemente, y para cada una de las zonas de interés. La primera línea de figuras corresponde a la zona agreste; la segunda, a la zona de transición; y la tercera, a la planicie. La escala de grises muestra la frecuencia de cada categoría.

Conclusiones

El presente artículo realizó una evaluación del CEM 3.0 del INEGI, empleando LiDAR como punto de referencia en tres zonas con diferentes rangos de altitud y pendiente (una zona agreste, una de transición y una planicie). Esta evaluación se considera importante por la gran cantidad de productos que pueden ser derivados de un MED, y porque el CEM 3.0 es el MED oficial mexicano. Desafortunadamente, el CEM 3.0 presenta errores fuertes, de hasta 140 m, en lugares donde la altitud es de 2 m, es decir, se trata de errores de hasta 70 veces el valor observado. éstos parecen estar asociados a un método de relleno de datos en cuerpos de agua, que no es descrito por el INEGI en la documentación del CEM 3.0. En cuerpos de agua mayores, parece haber una subestimación, mientras que, en cuerpos de agua menores, existe una severa sobre estimación. Los análisis sugieren que el INEGI creó murallas de más de 100 metros, alrededor de cuerpos de agua menores. Es posible que INEGI haya creado estas murallas para forzar que la dirección de flujo se dirigiera sólo a ríos principales. Desafortunadamente, la documentación disponible sobre el CEM 3.0 no contiene información sobre esta decisión. De cualquier forma, la decisión anterior resultaría en una red de dirección de flujo muy diferente a la real y a la práctica recomendada, que consiste en que la red de flujo, cruce los cuerpos de agua, es decir, que los cuerpos de agua sirvan como vasos comunicantes. Sin embargo, con su actual configuración, el CEM 3.0 obliga a que el flujo rodee los cuerpos de agua. Por otra parte, al alterar la red de drenaje, el CEM 3.0 previene la identificación de cuerpos de agua menores y sus planicies de inundación asociadas, así como altera de forma desproporcionada (hasta setenta veces), las altitudes alrededor de cuerpos de agua.

En resumen, la raíz de los errores cuadráticos medios encontrados en el presente estudio son de 13.33 m en la zona agreste, que contiene los errores más bajos; y de 34.55 m en la planicie, que tiene los errores más altos. Como punto de referencia, INEGI reporta errores de 7.2 y 4.5 (ver Tabla 1), para la zona agreste y la plana, respectivamente. No sólo las magnitudes de los errores difieren de modo sustancial, sino que la aseveración de que los errores más altos se presentan en las zonas

agrestes, pues el presente estudio ha mostrado lo opuesto. Sin embargo, cabe señalar que la documentación del INEGI no indica cómo fueron calculados los errores, así que no se sabe si una comparación directa de los valores de ambos estudios es válida. Por lo cual, los errores del INEGI sólo deben ser considerados como un punto de referencia.

Por último, el análisis también sugiere que el tamaño de pixel de 15 m, no corresponde con la verdadera resolución del CEM 3.0. INEGI ha truncado los decimales en los valores de altitud. De esta manera, se crean terrazas artificiales con diferencias de altitud de un metro que, son bastante extensas, de hasta cientos de metros. Estas terrazas tienen una pendiente de cero, lo cual puede resultar sumamente confuso para los análisis hidrológicos que dependen de la pendiente, como la dirección de flujo, por ejemplo. Lo anterior debido a que el tamaño del pixel correspondiente a la resolución mostrada es de cientos de metros, no de 15 m, es decir, la resolución real del CEM 3.0 es mucho menor de lo que indica INEGI. Una opción para evitar este problema sería que el INEGI publicara los datos del CEM 3.0 con decimales. Incluso, el SRTM, que tiene un tamaño de pixel de 90 m, publica datos con decimales.

Evidentemente, todo lo anterior implica una seria limitación para el uso y aplicación del CEM 3.0, en particular, para aplicaciones hidrológicas y en planicies, como las aquellas que se encuentran a lo largo de todas las costas del país. El CEM 3.0, aunque indicado por el INEGI como un producto de la mejor calidad posible, muestra fuertes deficiencias. Es importante realizar evaluaciones continuas de todos los productos del INEGI, no sólo del CEM 3.0. Del mismo modo, es necesario considerar que debería existir un mayor espacio en la literatura científica mexicana para ello.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado durante el desarrollo del proyecto de investigación: "Desarrollo de una metodología para la creación de mapas de riesgo estatales por procesos de Remoción de Masa con base en Sistemas de Información Geográfica", y del proyecto de

investigación: "Caracterización en un Espacio Bidimensional de Fallas y Fracturas en la Sierra de Pachuca".

Referencias

- Bater, C. W., & Coops, N. C. (2009). Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation. *Computers & Geosciences*, 35(2), 289-300. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.001>.
- Boudaghpour, S., Bagheri, M., & Bagheri, Z. (2014). Estimation of flood environmental effects using flood zone mapping techniques in Halilrood Kerman, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 153. DOI: 10.1186/s40201-014-0153-z.
- Calligaris, C., Poretti, G., Tariq, S., & Melis, M. T. (2013). First steps towards a landslide inventory map of the Central Karakoram National Park. *European Journal of Remote Sensing*, 46(1), 272-287. DOI: 10.5721/EuJRS20134615.
- Del Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S., & Casagli, N. (2014). Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238-246. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.02.008>.
- Dou, J., Tien-Bui, D., Yunus P. A., Jia, K., Song, X., Revhaug, I., Xia, H., Zhu, Z. (2015). Optimization of Causative Factors for Landslide Susceptibility Evaluation Using Remote Sensing and GIS Data in Parts of Niigata, Japan. *PLOS ONE*, 10(7), e0133262. DOI: 10.1371/journal.pone.0133262.
- Elkhrachy, I. (2015). Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 261-278. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.06.007>.
- Goulden, T., Hopkinson, C., Jamieson, R., & Sterling, S. (2016). Sensitivity of DEM, slope, aspect and watershed attributes to LiDAR measurement uncertainty. *Remote Sensing of Environment*, 179, 23-35. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.005>.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017a). *Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0)*. México: Instituto Nacional de

Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuo/elevaciones.aspx>.

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017b). *Modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR, Tipo terreno con resolución de 5m*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuo/presentacion.aspx>
- Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 212-225. DOI: 10.1080/02626667.2011.555836.
- Lucieer, A., Jong, S. J., & Turner, D. (2014). Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in Physical Geography*, 38(1), 97-116. DOI: 10.1177/0309133313515293.
- Manfreda, S., Leo, M. D., & Sole, A. (2011). Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(10), 781-790. DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000367.
- Raman, R., & Punia, M. (2012). The application of GIS-based bivariate statistical methods for landslide hazards assessment in the upper Tons river valley, Western Himalaya, India. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 6(3), 145-161. DOI: 10.1080/17499518.2011.637504.
- Shahabi, H., & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific Reports*, 5, 9899. DOI: 10.1038/srep09899.
- Uribe-Alcántara, E. M., Montes-León, M. A. L., & García-Celis, E. (2010). Mapa Nacional de Índice de Inundación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(2), 73-85.