

## Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>

# Experiment, evaluate methods of interpolation of terrain surface for different types of terrain



Yen Quoc Phan\*, Nga Thu Thi Nguyen

*Institute Technical Special Engineer, Military Technical Academy, Vietnam*

### ARTICLE INFO

*Article history:*  
Received 15<sup>th</sup> Feb. 2020  
Revised 16<sup>rd</sup> Mar. 2020  
Accepted 29<sup>th</sup> Apr. 2020

#### *Keywords:*

Accuracy,  
Digital elevation model,  
Geographic information  
system,  
Spatial interpolation,  
Topography.

### ABSTRACT

*Surface modeling is done by many classic and modern algorithms such as Polynomial Interpolation, Delaunay Triangulation, Nearest Neighbor, Natural Neighbor, Kriging, Inverse Distance Weighting (IDW), Spline Functions,... The important issue is to experiment, evaluate, and select algorithms suitable to the reality of the data and the study area. The paper used three algorithms IDW, Kriging, and Natural Neighbor to model the terrain on two map sheets representing different types of terrain. From there, compare the results and evaluate the accuracy of the methods based on random test data from the data set, which is extracted from the original map. Besides, checking the contour determined from the algorithm compared to the original contour was also carried out on the entire map sheet. Results show that: Natural Neighbor algorithm gives better results on both experimental areas, then IDW and Kriging algorithms, the root mean Square Error of 15.2922, 16.4754, and 17.9949m respectively for terrains have average high and 13.9728, 15.2466, 15.7613 meters with high mountainous terrain.*

Copyright © 2020 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

\*Corresponding author

E - mail: [yenphanquochv@gmail.com](mailto:yenphanquochv@gmail.com)

DOI: 10.46326/JMES.2020.61(2).13



**Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất**

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



# Thực nghiệm, đánh giá các phương pháp nội suy bề mặt địa hình cho các dạng địa hình khác nhau

Phan Quốc Yên \*, Nguyễn Thị Thu Nga

Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Việt Nam

**THÔNG TIN BÀI BÁO**

**TÓM TẮT**

*Quá trình:*

Nhận bài 15/02/2020

Sửa xong 16/03/2020

Chấp nhận đăng 29/4/2020

*Từ khóa:*

Địa hình,

Độ chính xác,

GIS,

Mô hình số độ cao,

Nội suy không gian.

Mô hình hóa bề mặt được thực hiện bằng nhiều thuật toán cổ điển và hiện đại như: *Polynomial Interpolation, Delaunay Triangulation, Nearest Neighbor, Natural Neighbor, Kriging, Inverse Distance Weighting (IDW), Spline Functions,...* Vấn đề quan trọng là kiểm nghiệm, đánh giá và lựa chọn thuật toán phù hợp với thực tế của dữ liệu và khu vực nghiên cứu. Bài báo sử dụng ba thuật toán IDW, Kriging và Natural Neighbor để mô hình hóa địa hình trên hai mảnh bản đồ đại diện cho các dạng địa hình khác nhau. Từ đó, so sánh kết quả và đánh giá về độ chính xác của các phương pháp dựa trên số liệu kiểm tra ngẫu nhiên từ tập dữ liệu bản đồ gốc được trích xuất. Ngoài ra, kiểm tra đường bình độ xác định được từ các thuật toán so với đường bình độ gốc cũng được thực hiện trên toàn bộ mảnh bản đồ. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng: thuật toán Natural Neighbor cho kết quả tốt hơn trên cả hai khu vực thử nghiệm, sau đó là thuật toán IDW và Kriging, với sai số trung phương lần lượt là 15,2922 m, 16,4754 m và 17,9949 m cho địa hình có độ cao trung bình và 13,9728 m, 15,2466 m và 15,7613 m với địa hình đồi núi cao.

© 2020 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

**1. Mở đầu**

Nội suy bề mặt địa hình là ước tính giá trị độ cao của các điểm chưa biết trên bề mặt địa hình từ các điểm trong tập dữ liệu mẫu đã biết (các điểm đã biết được khảo sát từ thực địa hoặc trích xuất từ bản đồ gốc) (Aguilar và nnk., 2005; Longley và nnk., 2010; Weng, 2006). Nội suy bề mặt địa hình là công cụ chủ yếu để tính toán dữ liệu bề mặt liên tục, các phương pháp nội suy đã được áp dụng các quy tắc khác nhau liên quan đến bề mặt trái đất.

Một trong những ứng dụng phổ biến của kỹ thuật nội suy là xây dựng mô hình số độ cao (DEM), mô hình số bề mặt (DSM) hoặc mô hình số địa hình (DTM), sử dụng từ các ứng dụng khoa học, thương mại, công nghiệp đến quân sự... (Weng, 2006). Trong một số công việc cần độ chính xác cao như trong công nghiệp khai thác khoáng sản tại Việt Nam, hiện đang sử dụng một số công nghệ như UAV (Dieu Tien Bui và nnk., 2018; Nguyen Quoc Long và nnk., 2019; NV Nghia, 2020), quét Laser mặt đất (Nguyen Viet Nghia và nnk., 2019).

Tuy nhiên, trên phạm vi rộng lớn hơn, các phương pháp nội suy không gian đã có sự phát triển nhanh chóng với sự tăng dần số lượng phương pháp, có hơn 10 thuật toán nội suy đã

\*Tác giả liên hệ

E - mail: [yenphanquochv@gmail.com](mailto:yenphanquochv@gmail.com)

DOI: 10.46326/JMES.2020.61(2).13

được phát triển khác nhau. Trong đó, mối quan tâm chung hàng đầu là độ chính xác của chúng và đã có nhiều nghiên cứu đã công bố về so sánh hiệu suất của các phương pháp nội suy sử dụng một dữ liệu nhất định (Aguilar và nnk., 2005; Carrara và nnk., 1997; Guarneri và nnk., 2012; Heritage và Milan, 2009; Longley và nnk., 2010; Weber và Englund, 1994; Winsemius và nnk., 2019). Một số nghiên cứu chỉ ra rằng, trong số nhiều kỹ thuật nội suy hiện có, kỹ thuật nội suy liên quan đến trọng số địa lý cho kết quả tốt hơn các kỹ thuật khác (Guarneri và nnk., 2012). Đặc biệt, Zimmerman và cộng sự cho thấy thuật toán Kriging mang lại ước tính độ cao tốt hơn so với nghịch đảo trọng số khoảng cách (IDW), không phân biệt loại địa hình và lấy mẫu (Zimmerman và nnk., 1999). Tuy nhiên, trong các nghiên cứu khác về tiếp cận láng giềng như IDW hoặc các hàm bán kính cơ sở là chính xác hơn Kriging, thậm chí tốt hơn (Guarneri và nnk., 2012). Nghiên cứu của Phan Quốc Yên và cộng sự đã thử nghiệm 04 thuật toán nội suy (Spline, IDW, Kriging, Natural Neighbor) để mô hình hóa địa hình trên hai mảnh bản đồ đại diện cho các dạng địa hình khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng: sự thích ứng từng thuật toán phụ thuộc nhiều vào dạng địa hình từng khu vực nội suy khác nhau (Phan Quốc Yên và cộng sự, 2019). Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về tính chính xác của các kỹ thuật nội suy cho việc tạo ra các mô hình số độ cao (DEM), nhưng vẫn không có kết quả nhất quán về hiệu suất của các bộ nội suy không gian. Do đó, rất khó để chọn một phương pháp nội suy thích hợp cho một tập dữ liệu đầu vào nhất định.

Trong số các nghiên cứu khác nhau về so sánh các kỹ thuật nội suy để tạo mô hình số địa hình, có một số nghiên cứu về độ chính xác của các kỹ thuật nội suy liên quan đến kích thước mẫu dữ liệu, khoảng cách mẫu và loại địa hình (Aguilar và nnk., 2005; Carrara và nnk., 1997; Chaplot và nnk., 2006; Guarneri và nnk., 2012; Heritage và Milan, 2009; Longley và nnk., 2010; Weber và Englund, 1994; Zimmerman và nnk., 1999; Besim Ajvazi và Kornél Czimber, 2019). Đặc biệt ảnh hưởng của hình thái địa hình tồn tại trong cảnh quan tự nhiên và trên một phạm vi rộng lớn, hiếm khi được nghiên cứu (Zimmerman và nnk., 1999). Vì vậy, vẫn cần phải đánh giá hiệu suất của các kỹ thuật này liên quan đến các loại địa hình khác nhau. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là đánh giá ảnh

hưởng của các kỹ thuật nội suy khác nhau đến độ chính xác của việc tạo DEM liên quan đến các loại địa hình.

Về mặt toán học, các phương pháp mô hình hóa và biểu diễn mô hình DEM, DTM, DSM là giống nhau. Vì vậy, trong bài báo này, sử dụng dữ liệu bản đồ địa hình của các dạng địa hình đồi núi cao, đồi núi thấp và trung bình để thực nghiệm, đánh giá ba thuật toán Natural Neighbor, IDW và Kriging trong nội suy DEM. các đỉnh đồi, núi, khu vực chuyển tiếp, khu vực đồi thấp và thoải, khu vực sườn núi, thung lũng được chọn để kiểm tra sự sai khác và khả năng thích ứng của đường bình đồ nội suy được so sánh với với đường bình đồ gốc ban đầu của các mảnh bản đồ.

## 2. Các phương pháp nội suy bề mặt địa hình

### 2.1. Thuật toán IDW (Inverse Distance Weighting)

Phương pháp IDW xác định giá trị của các điểm chưa biết bằng cách tính trung bình trọng số khoảng cách các giá trị của các điểm đã biết trong vùng lân cận của mỗi pixel (Watson, 1985). Những điểm càng cách xa điểm cần tính, càng ít ảnh hưởng đến giá trị tính toán, dẫn tới trọng số sẽ giảm. Công thức tính nội suy giá trị tại điểm chưa biết trên cơ sở các giá trị đã biết xung quanh nó như sau:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \times \frac{1}{d^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d^k}} \quad (1)$$

Trong đó:  $i$  - Các điểm dữ liệu đã biết giá trị,  $n$  - Số điểm đã biết,  $Z_i$  - Giá trị điểm thứ  $i$ ,  $d$  - Khoảng cách đến điểm  $i$ ,  $k$  - Hằng số IDW.

Một số ưu điểm của IDW: (1) IDW được đề xuất nên sử dụng khi có một tập hợp các điểm dày đặc, phân bố rộng khắp trên bề mặt tính toán; (2) Phương pháp này nhanh chóng, dễ thực hiện.

Đầu ra phương pháp trọng số nghịch đảo khoảng cách bị giới hạn phạm vi giá trị sử dụng nội suy. Vì đây là phương pháp trọng số khoảng cách trung bình, nó không thể lớn hơn đầu vào cao nhất và nhỏ hơn đầu vào thấp nhất, vì thế nó không thể tạo ra các rặng và thung lũng nếu những điểm cực này không có trong tập mẫu (Watson, 1985). Kết quả tốt nhất của phương pháp đạt được khi tập mẫu liên quan đến các điểm đặc trưng địa hình có

mật độ đủ dày. Nếu tập mẫu của điểm đầu vào là thưa thớt, không đều, kết quả có thể không đủ miêu tả bề mặt yêu cầu (Watson, 1985). Ngoài ra, phương pháp này không cung cấp các kết quả đánh giá về chất lượng của điểm nội suy (Qulin Tan và Xiao Xu, 2014).

## 2.2. Thuật toán Kriging

Kriging là một nhóm các kỹ thuật sử dụng trong địa thống kê, để nội suy một giá trị của trường ngẫu nhiên (như độ cao  $Z$  của địa hình) cho điểm không được đo thực tế từ những điểm được đo đạc gần đó (tương tự như IDW) (Margaret và Richard, 1990). Kriging giả định rằng, khoảng cách hoặc hướng giữa các điểm mẫu phản ánh mối tương quan không gian có thể được sử dụng để giải thích sự thay đổi trên bề mặt (Longley và nnk., 2010) theo công thức sau:

$$T^* - \mu = \sum_n^1 W_i (g_i - \mu_i) \quad (2)$$

Trong đó:  $T^*$  - giá trị cần ước lượng tại một tọa độ trong không gian,  $\mu$  là giá trị trung bình,  $W$  - trọng số phụ thuộc vào vị trí của dữ liệu,  $g_i$  - giá trị những điểm khác,  $n$  - số dữ liệu xung quanh dùng để ước lượng giá trị  $T$ .

Kriging nội suy giá trị cho các điểm xung quanh một điểm giá trị. Những điểm gần điểm gốc sẽ ảnh hưởng nhiều hơn những điểm ở xa. Kriging khớp một hàm toán học với một số điểm được chỉ định hoặc tất cả các điểm trong bán kính chỉ định, để xác định giá trị đầu ra cho từng vị trí. Đó là một quá trình gồm nhiều bước bao gồm: Phân tích thống kê khám phá dữ liệu, mô hình hóa variogram, tạo bề mặt và (tùy chọn) khám phá bề mặt phương sai (Qulin Tan và Xiao Xu, 2014).

Ưu điểm của phương pháp Kriging là giá trị của các điểm được gán không chỉ phụ thuộc vào khoảng cách mà còn phụ thuộc vào sự phân bố không gian các điểm. Điều này làm cho các giá trị nội suy mang tính tương quan không gian nhiều hơn. Tuy nhiên, thuật toán thực hiện phức tạp, đòi hỏi nhiều thời gian tính toán, mô hình hóa và đòi hỏi nhiều dữ liệu đầu vào.

## 2.3. Thuật toán Natural Neighbor

Nội suy Natural Neighbor là một phương pháp nội suy không gian phát triển bởi Robin Sibson (1981). Phương pháp dựa trên lưới

Voronoi của một tập các điểm không gian rời rạc. Tìm tập con gần nhất của mẫu đầu vào một điểm truy vấn và áp dụng các trọng số cho chúng dựa trên các khu vực tương ứng để nội suy một giá trị.

$$G(x) = \sum_{i=1}^n W_i(x) f(x_i) \quad (3)$$

Với  $G(x)$  là ước tính tại  $x$ ,  $w_i$  là các trọng số và  $f(x_i)$  là dữ liệu đã biết tại  $x_i$ . Nó còn được gọi là nội suy Sibson. Các thuộc tính cơ bản là cục bộ, chỉ sử dụng một tập hợp các mẫu con bao quanh điểm truy vấn và độ cao nội suy được đảm bảo nằm trong phạm vi của các mẫu được sử dụng (lưới Voronoi). Thuật toán không tính được xu hướng và sẽ không tạo ra các đỉnh, hố, đường gờ hoặc thung lũng mà chưa có mẫu đại diện đầu vào. Bề mặt đi qua các mẫu đầu vào là mượt hơn ở mọi nơi trừ các vị trí của mẫu đầu vào (Qulin Tan và Xiao Xu, 2014), các trọng số  $w_i$  được tính như sau:

$$w_i(x) = \frac{A(x_i)}{A(x)} \quad (4)$$

Trong đó:  $A(x)$  - diện tích của Pixel mới ở giữa theo  $x$  và  $A(x_i)$  là diện tích của giao điểm giữa ô mới có tâm ở  $x$  và ô cũ có tâm ở  $x_i$  (Sibson, 1981).

## 3. Đánh giá độ chính xác của các phương pháp nội suy địa hình

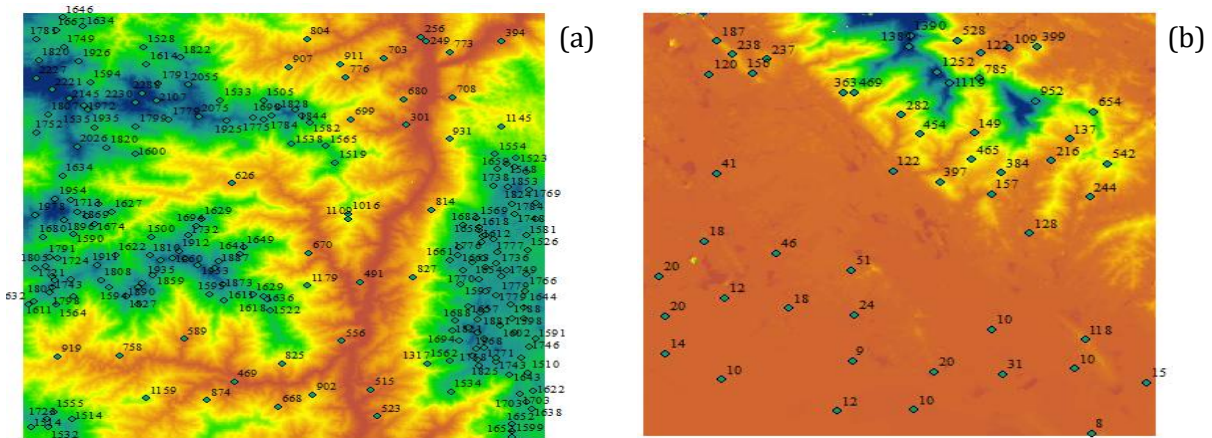
Các phương pháp đánh giá độ chính xác thực nghiệm nội suy độ cao gồm phương pháp trích điểm tùy ý, phương pháp mặt cắt đường bình độ và phân tích trực quan thuộc tính địa hình.

### 3.1. Phương pháp trích điểm ngẫu nhiên

Theo phương pháp này, độ cao ước tính ( $Z$ ) từ mô hình nội suy được so sánh tại mỗi điểm kiểm tra ngẫu nhiên từ tập điểm kiểm tra được đo đạc ngoài thực địa. Các tham số đánh giá cơ bản như: sai số tuyệt đối trung bình (MAE), sai số trung phương (RMSE) và hệ số tương quan giữa hai tập dữ liệu ( $R$ ) (Qulin Tan và Xiao Xu, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (5)$$

Trong đó:  $X_{obs}$  - tập các giá trị độ cao gốc ngẫu nhiên,  $X_{model}$  - giá trị nội suy vị trí thứ  $i$  bằng các phương pháp nội suy,  $\bar{X}$  - giá trị độ cao trung bình của tập dữ liệu độ cao kiểm tra.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu và các điểm kiểm tra ngẫu nhiên. (a) Khu vực địa hình đồi núi cao (F4839A), (b) núi trung bình và thấp (F4867A).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|X_{obs,i} - X_{model,i}|) \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{model,i} - X_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{model,i} - \bar{X})^2} \quad (7)$$

### 3.2. Phương pháp kiểm tra khớp đường đồng mức

Để đánh giá độ chính xác của DEM nội suy, ngoài sử dụng các điểm kiểm tra rời rạc và phân bố ngẫu nhiên như trên, nghiên cứu sử dụng phương pháp kiểm tra khả năng khớp đường bình độ của DEM nội suy được với dữ liệu đường bình độ gốc ban đầu, nhằm kiểm tra lỗi về đường bình độ và độ cao toàn vùng. Phương pháp này bao gồm trích xuất lại đường bình độ gốc (nếu lấy điểm độ cao đường bình độ làm điểm tham chiếu) và trích xuất các đường đồng mức từ các DEM tính được bằng các thuật toán nội suy. Kiểm tra thủ công hoặc tự động, thống kê các lỗi không khớp về đường bình độ, đặc biệt các khu vực chuyển tiếp, đặc trưng địa hình như: đỉnh núi, thung lũng, rặng núi, khe suối,...

## 4. Thực nghiệm và kết quả

### 4.1. Dữ liệu và khu vực thực nghiệm

Khu vực nghiên cứu gồm 2 mảnh bản đồ tỷ lệ 1:50.000 đại diện cho toàn bộ các dạng địa hình khác nhau, khoảng cao đều giữa các đường bình độ khu vực đồng bằng 10 m, khu vực đồi núi là 20 m. Đại diện dạng địa hình núi cao là khu vực các huyện Mường Tè, Sìn Hồ, Mường Lay, tỉnh Lai

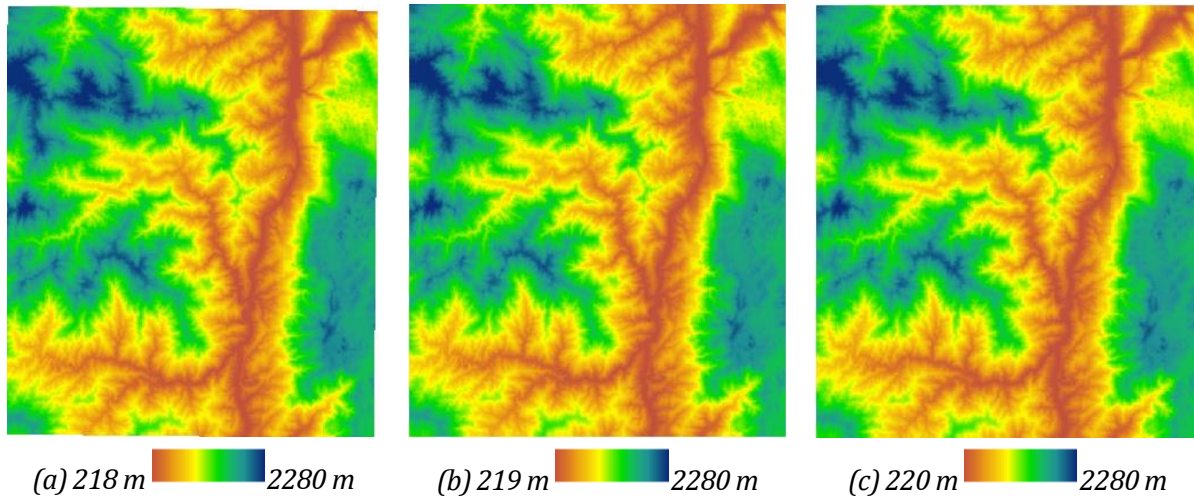
Châu (F4839A), với độ cao cao nhất 2.280 m, thấp nhất 218 m và trung bình 1.087 m, chênh cao trung bình từ 200÷400 m (Hình 1a). Đại diện dạng địa hình núi trung bình và đồi thấp là các huyện Yên Lập, Sông Thao, Thanh Ba, Thị xã Phú Thọ, tỉnh Phú Thọ (F4867A), với độ cao lớn nhất 1.420 m, thấp nhất là 5 m và trung bình 114 m, diện tích có một ít đồi núi ở mức độ cao trung bình, còn cơ bản là đồi thấp và đồng bằng. Hai mảnh bản đồ này thể hiện được đầy đủ sự phân bố đồng đều và đầy đủ dạng địa hình.

Do các DEM nội suy được tạo từ các bản đồ địa hình, độ chính xác của các DEM sẽ không cao hơn các bản đồ địa hình ban đầu. Bài báo sử dụng phần mềm ArcGIS để thực nghiệm, đầu tiên phân rã tập dữ liệu đường bình độ của hai mảnh bản đồ, lựa chọn ngẫu nhiên các điểm kiểm tra độ cao trong phân rã này để làm bộ dữ liệu kiểm tra, được phân bố đồng đều trong khu vực nghiên cứu và tập dữ liệu này không tham gia vào nội suy mô hình. Số lượng các điểm kiểm tra: Khu vực núi cao 219 điểm, khu vực núi trung bình và thấp 52 điểm với độ chính xác của bản đồ 1:50.000 (Hình 1).

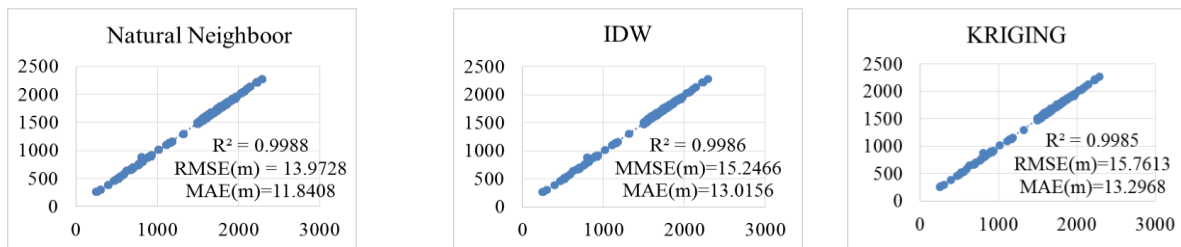
## 4.2. Kết quả thực nghiệm

### 4.2.1. Thực nghiệm nội suy địa hình đồi núi cao

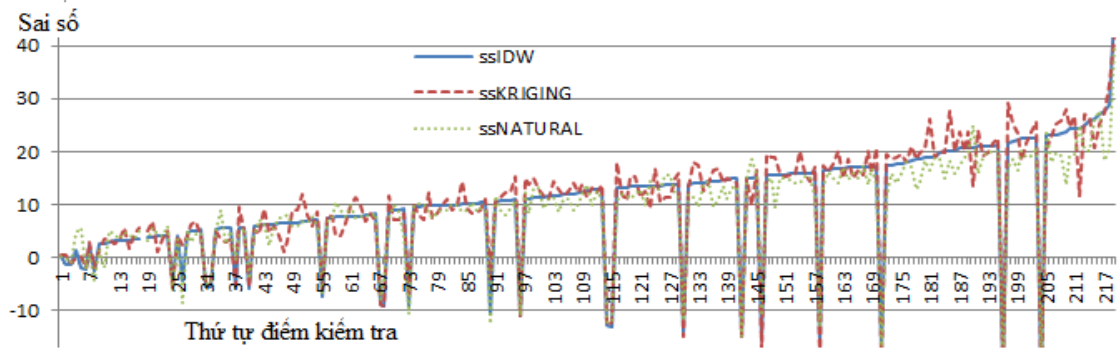
Với đầu vào là đường bình độ của bản đồ địa hình tỷ lệ 1:50.000, thực hiện các bước phân rã đường bình độ, tạo tập điểm làm đầu vào cho các thuật toán nội suy. Nội suy DEM Grid với độ phân giải 50 m từ tập điểm phân rã đó, trích xuất tập điểm kiểm tra lỗi ngẫu nhiên và thực hiện phân tích lỗi của DEM tính được. DEM địa hình theo ba phương pháp nội suy được thể hiện như Hình 2,



Hình 2. DEM nội suy theo các thuật toán (a) Natural Neighbor, (b) IDW, (c) Kriging.



Hình 3. Biểu đồ phân tán dữ liệu và các tham số đánh giá sai số.



Hình 4. Đường cong sai số của ba phương pháp nội suy địa hình đồi núi cao.

kết quả cho thấy rằng, phương pháp Natural Neighbor cho kết quả tính toán với phạm vi lớn hơn các phương pháp khác (218÷2.280 m). Quan sát bằng mắt thường rất khó phát hiện sự khác nhau giữa các kết quả tính toán

Để kiểm tra lỗi của các mô hình, trích xuất giá trị độ cao của các DEM tính được từ ba phương pháp tại các vị trí điểm kiểm tra, thực hiện tính toán theo công thức (5), (6) và (7), đồng thời tập hợp các điểm này được biểu diễn trên biểu đồ

phân tán dữ liệu, các kết quả được thể hiện như Hình 3.

Tuy nhiên, kiểm tra các điểm đặc trưng như đỉnh núi, thung lũng thì kết quả cho thấy thuật toán Natural Neighbor có độ chính xác tốt hơn hai phương pháp còn lại. Nhìn chung, kiểm tra 3 tham số RMSE, MAE và  $R^2$  thì thuật toán Natural Neighbor có độ chính xác tốt nhất trong 3 phương pháp đối với dạng địa hình đồi núi cao, tiếp theo là phương pháp IDW và cuối cùng là Kriging.

Biểu đồ thể hiện sai số của 219 điểm được trích xuất từ các DEM nội suy và tập điểm kiểm tra ngẫu nhiên được thể hiện như Hình 4. Có thể thấy rằng, giá trị sai số của thuật toán Natural Neighbor là nhỏ nhất so với các phương pháp nội suy khác.

Sử dụng phương pháp chạy lại đường bình độ từ DEM tính toán được chồng các lớp đường bình độ này lên lớp đường bình độ gốc (màu đỏ, Hình 5). Thực hiện kiểm tra toàn bộ khu vực với đồi núi cao ta thấy rằng:

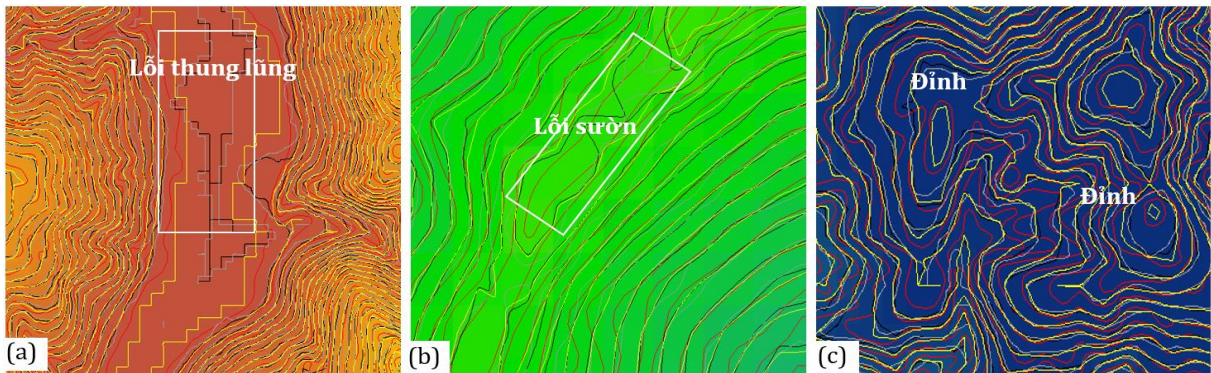
- Tổng thể toàn bộ mảnh bản đồ, đường đồng mức từ thuật toán Natural Neighbor (màu vàng) khớp nhất với đường đồng mức gốc, hai lớp đường

đồng mức (màu đen và màu xám) cho kết quả tương tự nhau và độ khớp so với bình độ gốc kém hơn. Hình 5 là một ví dụ điển hình về so sánh đại diện cho 3 khu vực độ cao khác nhau (240÷650 m, 1.000÷1.260 m, 1.700÷2.200 m) được trích xuất mẫu trên toàn bộ khu vực mảnh bản đồ thử nghiệm.

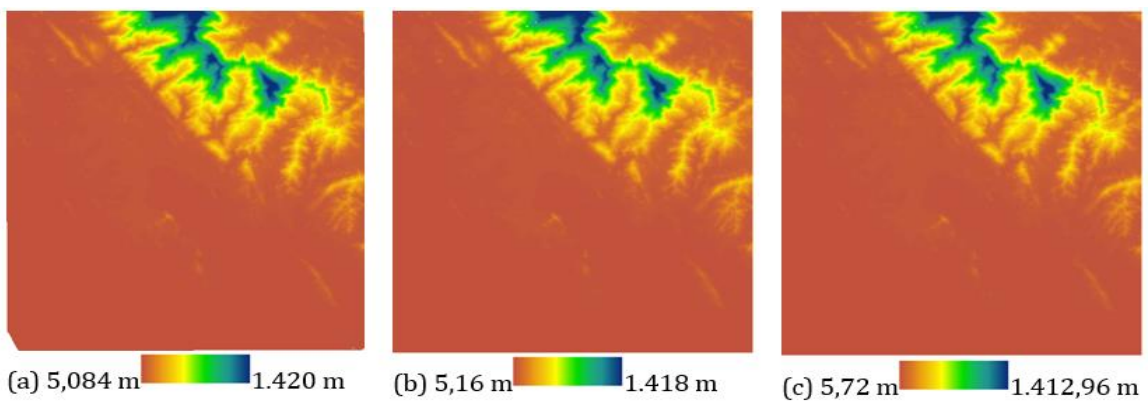
- Cả 3 thuật toán đều cho kết quả với sai số rất lớn tại các vị trí đỉnh núi, sườn núi, khe suối và thung lũng. Qua kiểm tra toàn bộ mảnh bản đồ, thuật toán Natural Neighbor có 8 đỉnh và sườn bị lỗi, không chạy đủ đường bình độ cuối của đỉnh núi, do thuật toán cho kết quả nội suy thấp hơn giá

Bảng 1. Thống kê lỗi khớp đường đồng mức mô hình so với đường đồng mức gốc.

Vị trí	NN	IDW	Kriging	Mô tả lỗi
Đỉnh núi	9	29	32	Không nội suy đến đỉnh núi, đường bình độ gần đỉnh núi thể hiện thiếu.
Sườn núi	6	15	19	Thể hiện dạng sườn núi không đúng, độ cao sườn thấp hơn bình đồ gốc.
Thung lũng, khe núi	0	9	12	Nội suy khu vực thung lũng thấp hơn bình đồ gốc, do đó phát sinh lỗi địa hình giả.



Hình 5. Chồng lớp các đường bình độ trích xuất từ các thuật toán. Màu đỏ: đường bình độ gốc; màu vàng: thuật toán Natural; màu đen: IDW và màu xám: Thuật toán Kriging (a) 240÷650 m; (b) 1.000÷1.260 m; (c) 1.000÷1.260 m.



Hình 6. DEM nội suy theo các thuật toán (a) Natural Neighbor, (b) IDW, (c) Kriging.

trị gốc. Nguyên nhân gây ra các lỗi này tại các vị trí đỉnh núi, sống núi, thung lũng và khe suối là do dữ liệu đầu vào của thực nghiệm được phân rã từ lớp đường bình độ của bản đồ địa hình, các điểm đặc trưng địa hình ở các vị trí nói trên thường không có. Vì vậy, cần phải bổ sung các điểm dữ liệu này vào tập dữ liệu gốc ban đầu, hoặc sử dụng một lớp chắn (Barrier) để giới hạn tập dữ liệu nội suy.

Từ Hình 5a thấy rằng, đường màu vàng luôn bám sát đường màu đỏ (bình độ gốc), đường màu xám và màu đen ở khu vực thung lũng được sinh ra không phù hợp với đường bình độ gốc. Tương tự, trên Hình 5b, khu vực sống núi, đường màu đen thể hiện dáng địa hình không đúng với bình độ gốc ban đầu. Đặc biệt, các khu vực đỉnh núi cao, sườn núi, thuật toán Kriging và IDW thường không tính đến độ cao của đỉnh núi, độ cao đỉnh núi thường bị hạ thấp hơn so với bình độ gốc (Hình 5c), thể hiện đường bình độ của đỉnh núi thường bị thiếu. Ngược lại, thuật toán Natural Neighbor vẫn cho kết quả tốt đối với các đỉnh núi (đường màu vàng Hình 5c, mẫu độ cao từ 1.700 m trở lên).

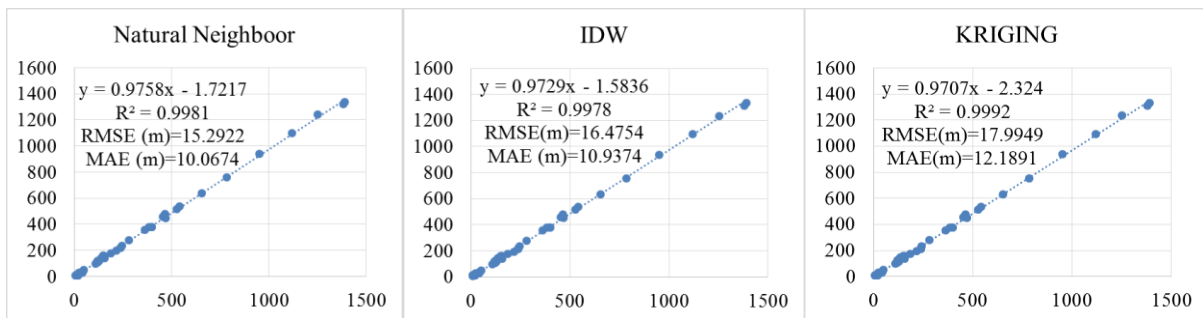
4.2.2. Thực nghiệm nội suy địa hình đồi núi thấp

Thực hiện tính toán tương tự như các bước đã thực hiện với địa hình núi cao, địa hình núi thấp

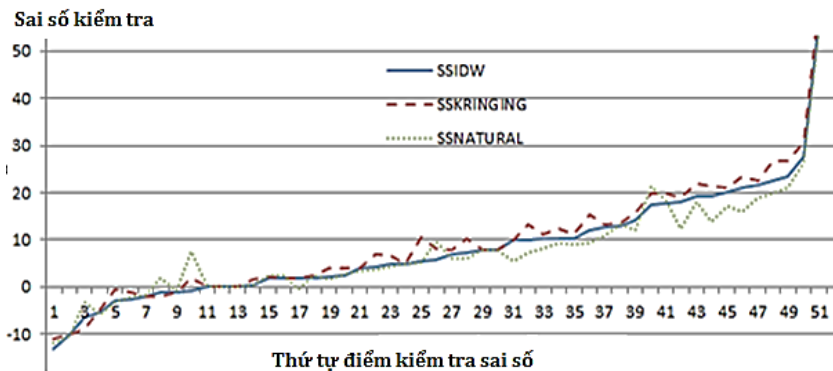
được thực hiện ở khu vực mảnh bản đồ F4867A, và kết quả DEM tính được như Hình 6. DEM tính được cũng cho thấy, phương pháp Natural Neighbor cho một kết quả mạnh mẽ hơn về phạm vi độ cao nội suy được. Kiểm tra tương tự như các bước đã thực hiện với địa hình núi cao, địa hình núi thấp được đánh giá dựa vào 52 điểm kiểm tra ngẫu nhiên, được thể hiện qua bảng sai số và đường cong sai số (Hình 7).

Kết quả các phương pháp đạt được tương tự như ở khu vực địa hình núi cao. Tuy nhiên, độ chính xác thấp hơn so với khu vực núi cao, RMSE giảm trung bình 1 m so với khu vực núi cao ở tất cả các thuật toán. Kết quả cũng chỉ ra rằng, giữa số liệu ước tính được và số liệu kiểm tra có mối quan hệ tuyến tính cao với  $R^2 \approx 1$ . Đường cong sai số cũng thể hiện phương pháp Natural Neighbor cho kết quả trung bình sai số thấp nhất so với các phương pháp khác.

Phân ngưỡng sai số trung phương cho từng phạm vi độ cao đối với phương pháp thấy rằng Natural Neighbor cũng cho kết quả tương tự như đối với địa hình đồi núi cao. 19 điểm với độ cao từ 231 m đến 1.390 m cho sai số lớn nhất với RMSE = 22,613 m, 14 điểm độ cao trong phạm vi từ 109 m đến 238 m với sai số RMSE = 11,634 m và các điểm còn lại trong tập 52 điểm với độ cao thấp từ

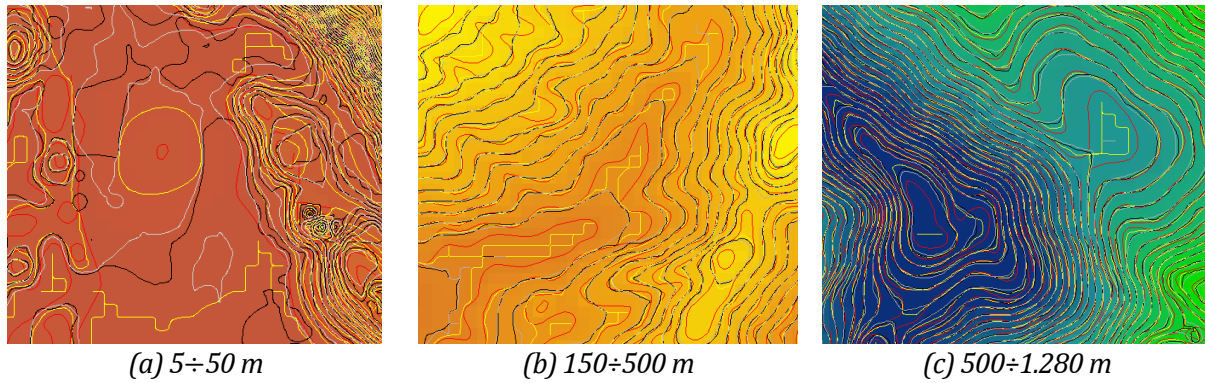


Hình 7. Biểu đồ phân tán dữ liệu và các tham số đánh giá sai số.



Hình 8. Đường cong lỗi của ba phương pháp nội suy địa hình đồi núi thấp.





Hình 9. Chồng lớp các đường bình độ trích xuất từ các thuật toán. Màu đỏ: đường bình độ gốc; màu vàng: thuật toán Natural; màu đen: IDW và màu xám: thuật toán Kriging.

8÷51 m đạt độ chính xác tương đối cao với RMSE = 5,318 m. Thực hiện tính toán 42 trong 52 điểm có địa hình thấp và trung bình thì RMSE = 8,75 m. Nguyên nhân gây ra các sai số cũng tương tự như trên, các vị trí sai số lớn đều thuộc các đỉnh núi, sườn núi và thung lũng (Hình 8).

Kết hợp với các điểm kiểm tra rời rạc, thực hiện kiểm tra đường bình độ của các thuật toán so với đường bình độ gốc trên toàn bộ mảnh bản đồ ta thấy rằng: Các khu vực trũng, thuật toán Natural Neighbor cũng xác định được một số khu vực. Ngược lại, hai thuật toán còn lại thường không tính được (Hình 9a,b). Các khu vực đỉnh, chỏm cũng tương tự như khu vực núi cao (Hình 9c). Ngoài ra, thuật toán Natural Neighbor cũng cho kết quả đường bình độ (màu vàng) khớp nhất với đường độ gốc (màu đỏ) cho tất cả các khu vực cao độ. Thực hiện kiểm tra, thống kê tương tự như ở địa hình đồi núi cao cũng cho thấy rằng: Sai số nội suy ở các đỉnh núi, sườn núi, thung lũng và khe núi của phương pháp Natural Neighbor (tổng 13 lỗi) cũng thấp hơn so với hai phương pháp còn lại (Kriging 42 lỗi và IDW 44 lỗi).

## 5. Kết luận

Kỹ thuật nội suy đóng một vai trò quan trọng trong việc đạt được độ chính xác cao của DEM. Ảnh hưởng của kỹ thuật nội suy đến độ chính xác của DEM phụ thuộc vào các loại địa hình bên cạnh việc phân phối các điểm mẫu và các yếu tố khác. Nghiên cứu này đã kiểm tra ba kỹ thuật nội suy (Natural Neighbor, IDW, và Kriging) ở hai mảnh bản đồ, đảm bảo đầy đủ các khu vực địa hình khác nhau như đồi núi cao, đồi núi thấp và trung bình và đồng bằng. Khả năng thích ứng của ba thuật toán nội suy không gian thường được sử dụng để

nội suy địa hình được kiểm tra và thảo luận trong các loại địa hình khác nhau. So sánh và định lượng sự khác nhau của các phương pháp được thực hiện dựa trên tập điểm kiểm tra ngẫu nhiên và phương pháp kiểm tra khớp đường đồng mức. Kết quả cho thấy, thuật toán Natural Neighbor vượt trội so với các kỹ thuật khác, sai số trung phương RMSE nhỏ nhất và lỗi địa hình giả nội suy ít nhất. Thuật toán IDW là phương pháp ưu việt thứ hai, phương pháp Kriging có độ chính xác thấp nhất. Đối với cả ba phương pháp nội suy, địa hình biến đổi càng lớn, độ chính xác của DEM được tạo ra càng thấp. Đặc biệt các khu vực sườn núi, đỉnh núi và ao hồ, thung lũng. Cần bổ sung các điểm độ cao ở các khu vực này hoặc một lớp rào chắn (Barrier) trong quá trình nội suy là cần thiết để tạo được DEM có độ chính xác tốt hơn.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy rằng, đầu vào dữ liệu là yếu tố rất quan trọng trong nội suy DEM. Nếu đầu vào thiếu các số liệu về điểm đặc trưng địa hình như độ cao đỉnh núi, rặng núi hoặc thung lũng và khe rãnh,... sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác của DEM rất nhiều. Có thể cần một mặt nạ hoặc một lớp rào chắn (Barrier) để lọc các khu vực này khỏi thuật toán, hoặc cần một thuật toán tốt hơn trong ba thuật toán trên để nội suy được các điểm đó cho độ chính xác tốt hơn. Nghiên cứu này có thể cung cấp một tài liệu tham khảo có giá trị cho việc tạo DEM nội suy không gian trong các khu vực có địa hình khác nhau.

## Lời cảm ơn

Để hoàn thành nghiên cứu này nhóm tác giả xin gửi lời cảm ơn tới Bộ môn Trắc địa Bản đồ, Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai đã giúp đỡ, hỗ trợ trong quá trình nghiên cứu.

**Tài liệu tham khảo**

- Aguilar, F. J. và nnk., (2005). Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on grid DEM Accuracy. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 71. 805 - 816.
- Besim Ajvazi and Kornél Czimber, (2019). A comparative analysis of different DEM interpolation methods in GIS: case study of Rahovec, Kosovo. *Geodesy and Cartography* 45(1). 43 - 48.
- Carrara, A., Bitelli, G. and Carla, R., (1997). Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science* 11. 451 - 473.
- Chaplot V., Frederic D. and Bourennane, H., (2006). Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology* 77. 126 - 141.
- David F Watson, (1985). A refinement of inverse distance weighted interpolation. *Geoprocessing* 2. 315 - 327.
- Dieu Tien Bui, Nguyen Quoc Long, Xuan-Nam Bui, Viet-Nghia Nguyen, Chung Van Pham, Canh Van Le, Phuong-Thao Thi Ngo, Dung Tien Bui, Bjørn Kristoffersen, (2018). Lightweight unmanned aerial vehicle and structure-from-motion photogrammetry for generating digital surface model for open-pit coal mine area and its accuracy assessment, *Springer: Advances and Applications in Geospatial Technology and Earth Resources*, 17 - 33.
- Guarneri, J. C., Weih, R. C., and Jr., (2012). Comparing Methods for Interpolation to Improve Raster Digital Elevation Models. *Journal of the Arkansas Academy of Science* 66. 77 - 81.
- Heritage, G. L. and Milan, D. J., (2009). Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality. *Geomorphology* 112(3). 334 - 344.
- Longley, P. A., và nnk., (2010). Geographic Information Systems and Science. *John Wiley & Sons. 3rd Edition*.
- Margaret A Oliver and Richard Webster, (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System* 4(3). 313 - 332.
- Nguyen Quoc Long, Xuan-Nam Bui, Cao Xuan Cuong, Le Van Canh, (2019). An approach of mapping quarries in Vietnam using low-cost Unmanned Aerial Vehicles, *Inzynieria Mineralna* 44(2). 248 - 262.
- Nguyen Viet Nghia, Nguyen Quoc Long, Nguyen Thi Cuc, Xuan-Nam Bui, (2019). Applied Terrestrial Laser Scanning for coal mine High Definition mapping, *World of Mining - Surface and Underground*, 71, 4, 237 - 242.
- Nguyen Viet Nghia, (2020). Building DEM for deep open-pit coal mines using DJI Inspire 2 (Vietnamese). *Journal of Mining and Earth Sciences* 61 (1), 1 - 10.
- Phan Quoc Yen, Nguyen Thi Thu Nga, Tong Thi Hanh (2019). Research and Experimental Comparison of Topographic Modeling Methods. *Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội* 35. 68 - 79.
- Qulin Tan và Xiao Xu, (2014). Comparative analysis of spatial interpolation methods: an experimental study. *Sensors & Transducers* 165(2). 155.
- Sibson, R., (1981). A Brief Description of Nearest Neighbor Interpolation. *Interpolating Multivariate Data. John Wiley & Sons. New York, Chapter 2. 21 - 36*.
- Weber, D. and Englund, E., (1994). Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Mathematical Geology* 26. 589 - 603.
- Weng, Q., (2006). An evaluation of spatial interpolation accuracy of elevation data. in *Progress in Spatial Data Handling*, (A. Riedl, W. Kainz, G. A. Elmes, editors). *Springer - Verlag. Berlin*. 805 - 824.
- Winsemius, Hessel Constantijn, và nnk., (2019). Commentary: The Need for a High - Accuracy. Open - Access Global DEM. *Frontiers in Earth Science* 7 (33).
- Zimmerman, D., và nnk., (1999). An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. *Mathematical Geology* 31. 375 - 390.