

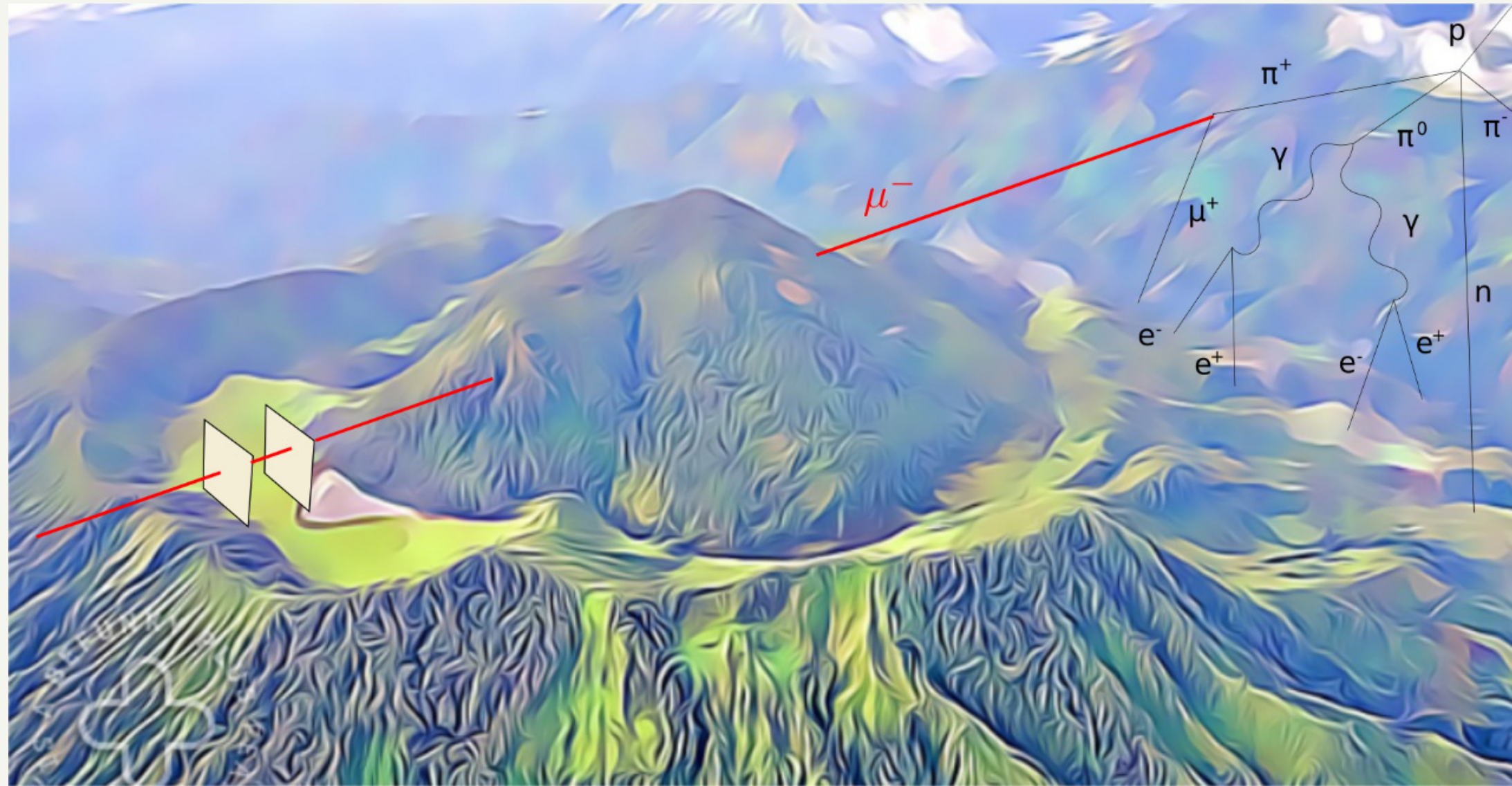
Estimación de la distribución de densidad interna de estructuras geológicas mediante tomografía de muones

K. Dlaikan-Castillo* , L.A Núñez-Martínez , J. Peña-Rodríguez , F. Martínez-Carrillo

[*kevin.dlaikan@correo.uis.edu.co](mailto:kevin.dlaikan@correo.uis.edu.co)



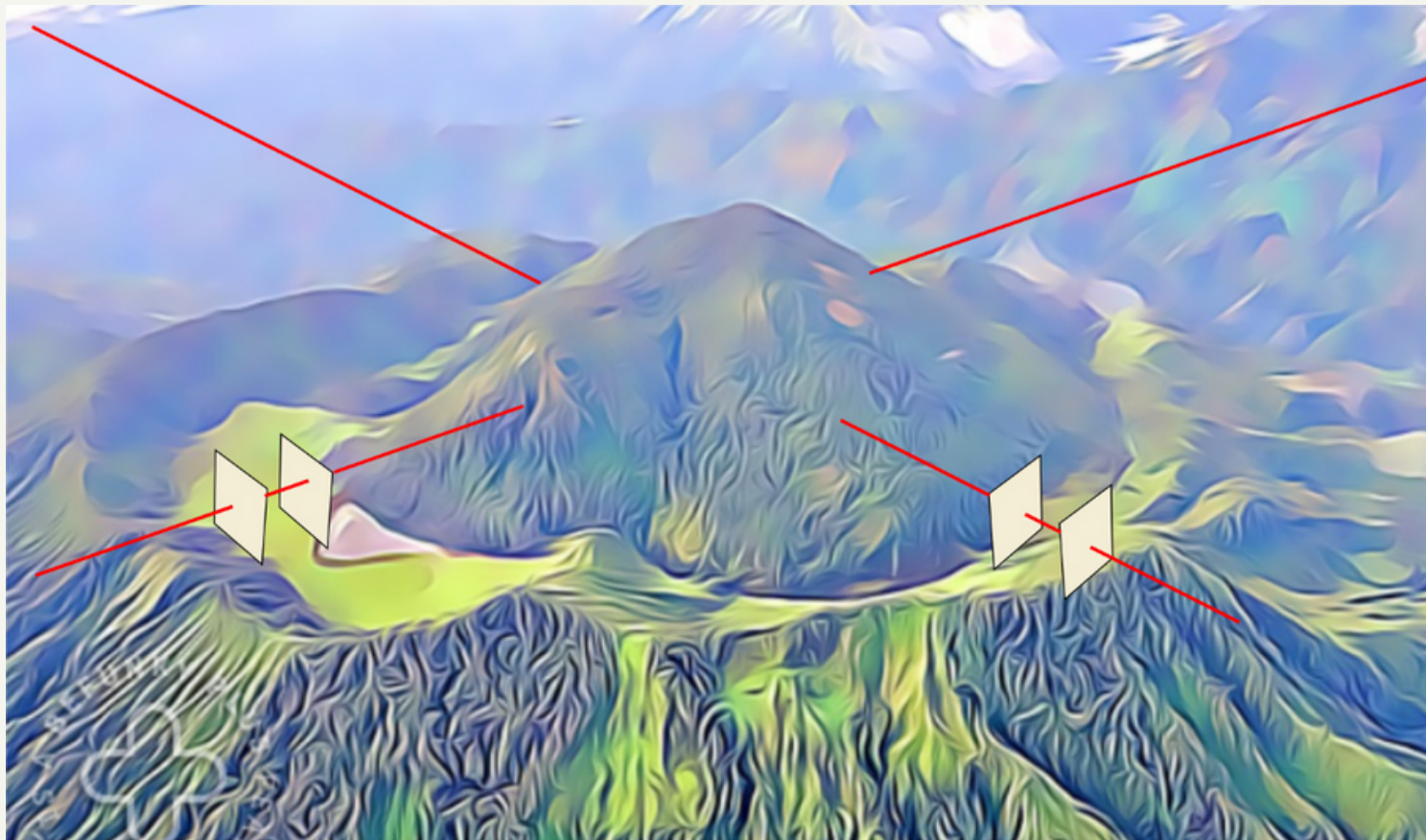
Radiografía de muones



- Los muones son partículas elementales producidos por la interacción entre radiación cósmica y la atmósfera de la Tierra.
- Pueden atravesar cientos de metros de roca.
- Se obtiene una imagen 2D (muograma) del interior de estructuras geológicas y civiles.

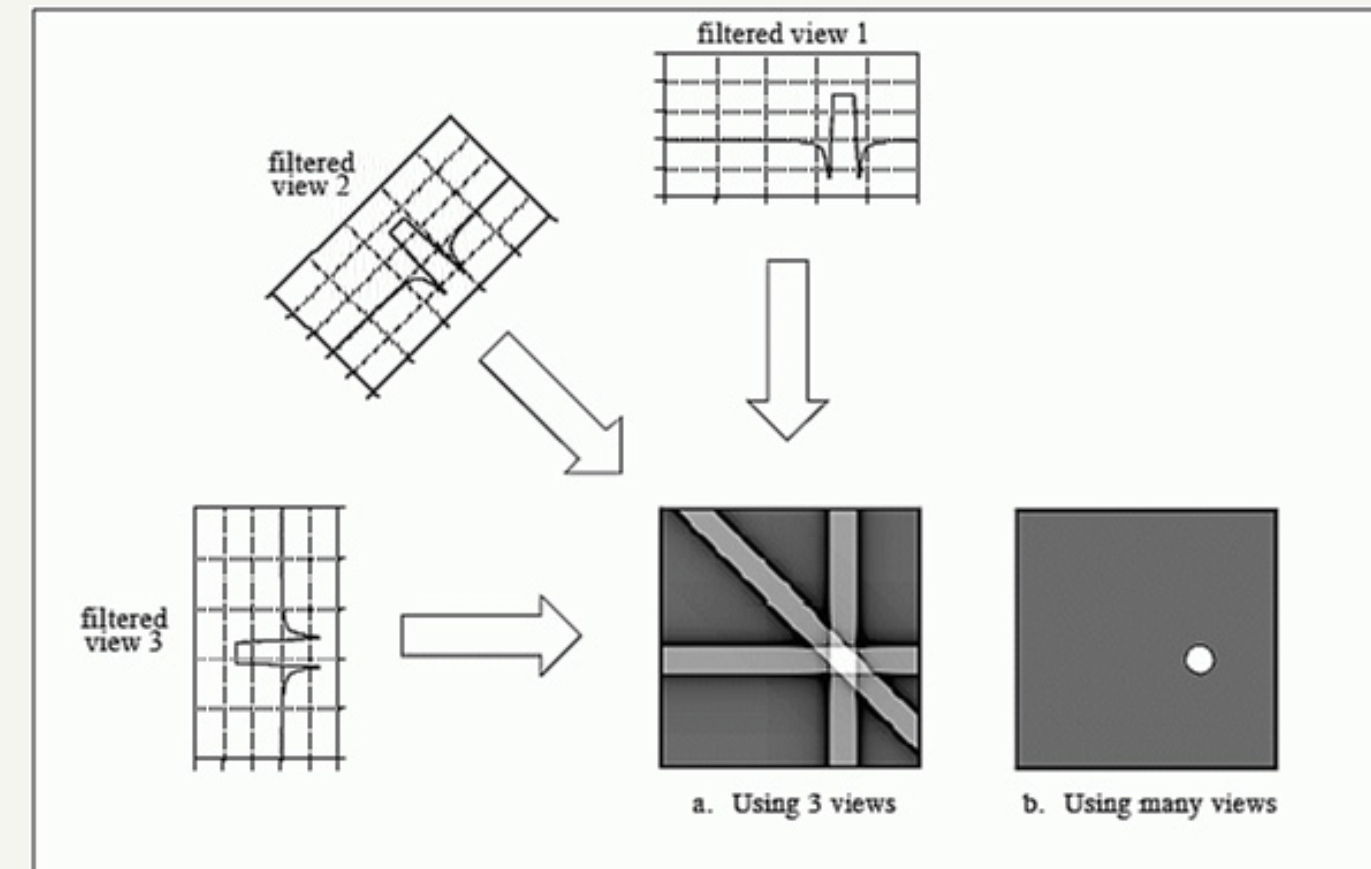
Detección de muones producidos por rayos cósmicos.

Tomografía de muones



Detección de muones en diferentes puntos de observación.

- Se utilizan los muogramas obtenidos en diferentes puntos de observación para reconstruir un volumen (3D) de la estructura.
- El volcán Cerro Machín en Colombia cuenta con solo 4 puntos de observación favorables para hacer muografía



Proceso de reconstrucción por filtered back projection. Qiu D, Seeram E. (2016).

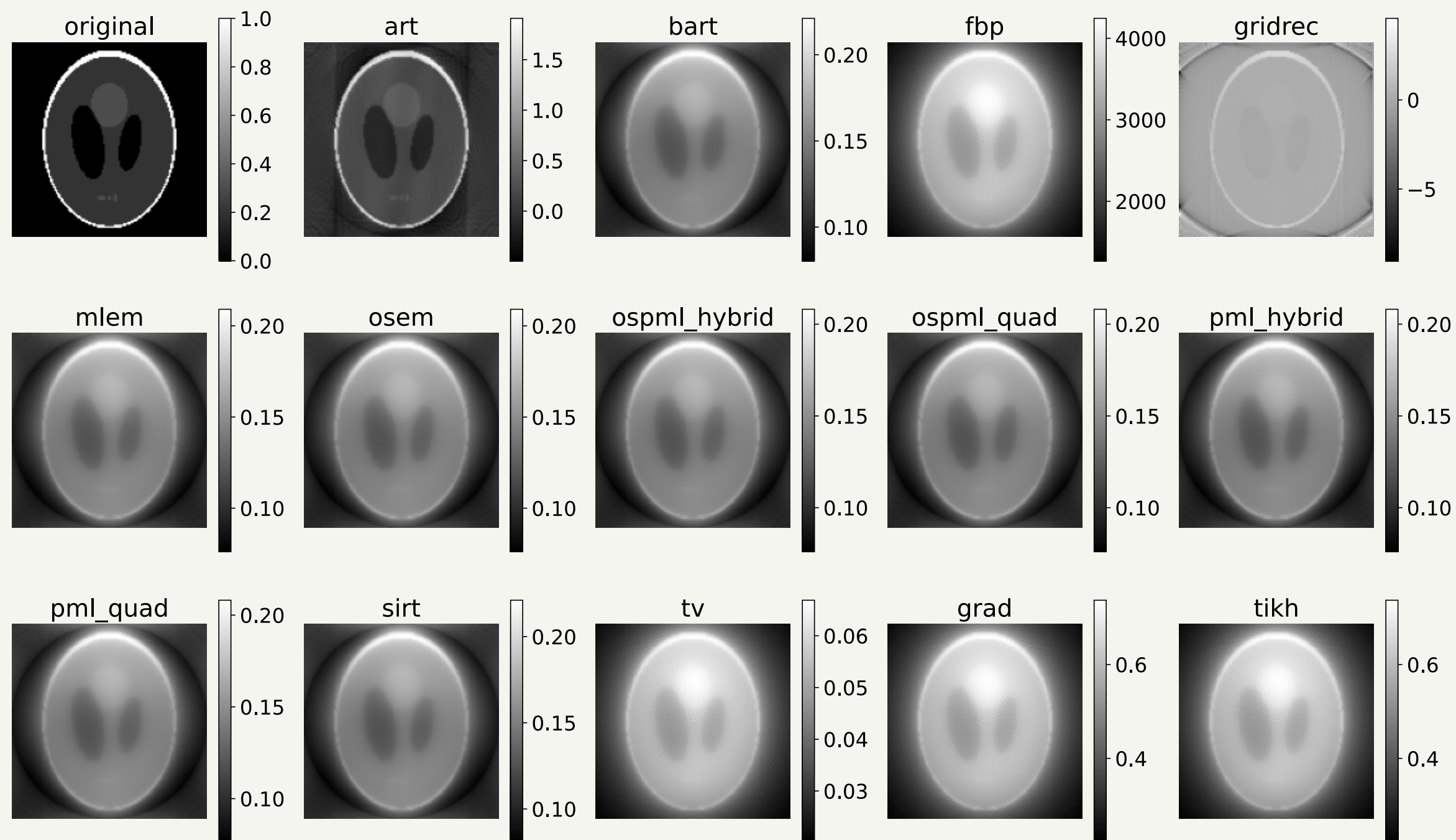
- A mayor cantidad de puntos de observación, más precisa es la reconstrucción por tomografía respecto al objeto original.

¿Cuál es el mínimo número de puntos de observación para obtener una buena reconstrucción tomográfica del volcán Cerro Machín?

Algoritmos de reconstrucción tomográfica

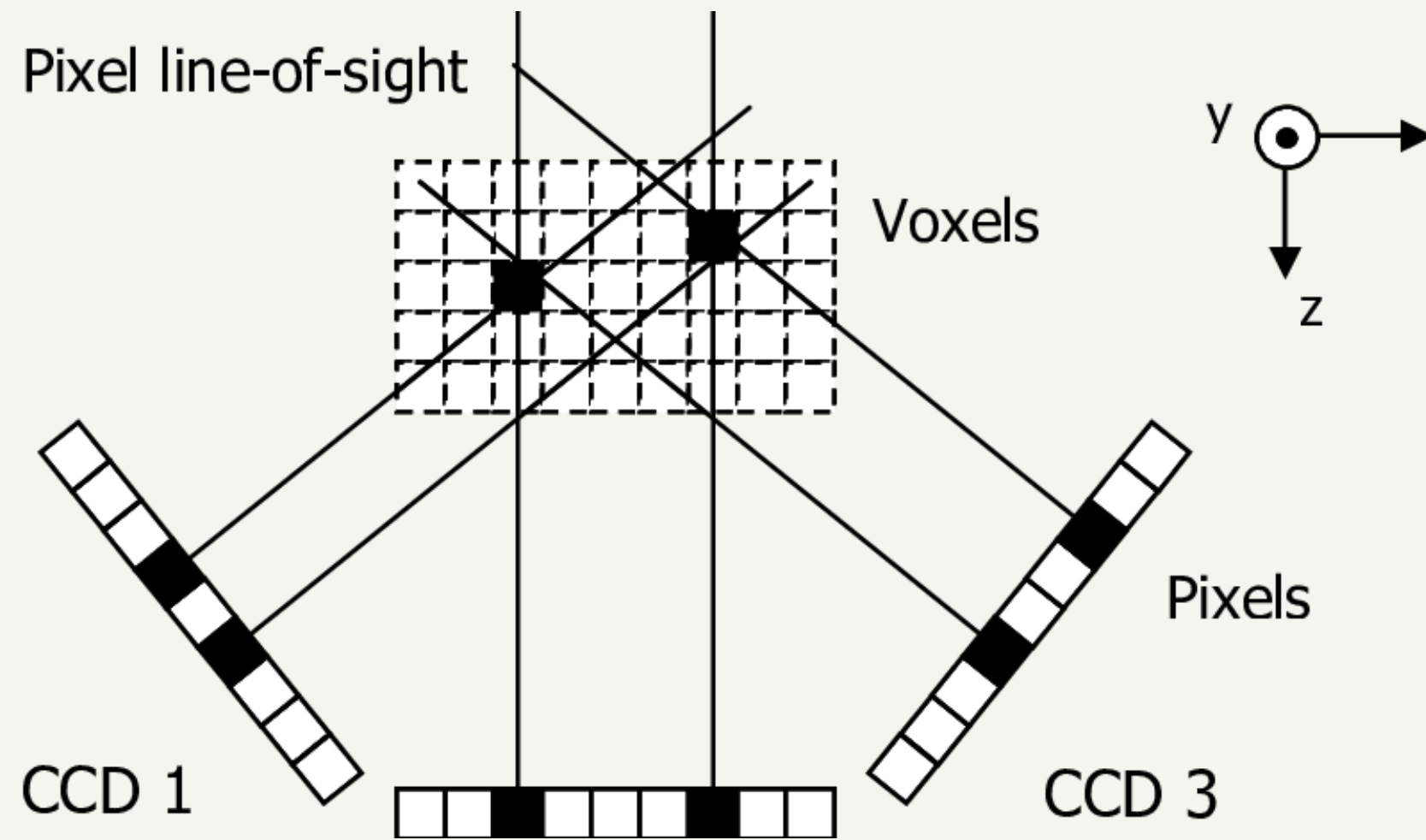
art: 1.39181 seconds
bart: 4.68652 seconds
fbp: 3.89114 seconds
gridrec: 1.30684 seconds
mlem: 5.20035 seconds
osem: 4.63202 seconds
ospml_hybrid: 5.1935 seconds
ospml_quad: 4.83098 seconds
pml_hybrid: 4.81047 seconds
pml_quad: 5.71941 seconds
sirt: 4.64881 seconds
tv: 4.90999 seconds
grad: 4.7982 seconds
tikh: 4.87174 seconds

(Librería: TomoPy)



Reconstrucciones con diferentes algoritmos con 180 puntos de observación distribuidos en un rango de 0 a 180 grados.

Algebraic Reconstruction Technique (ART)



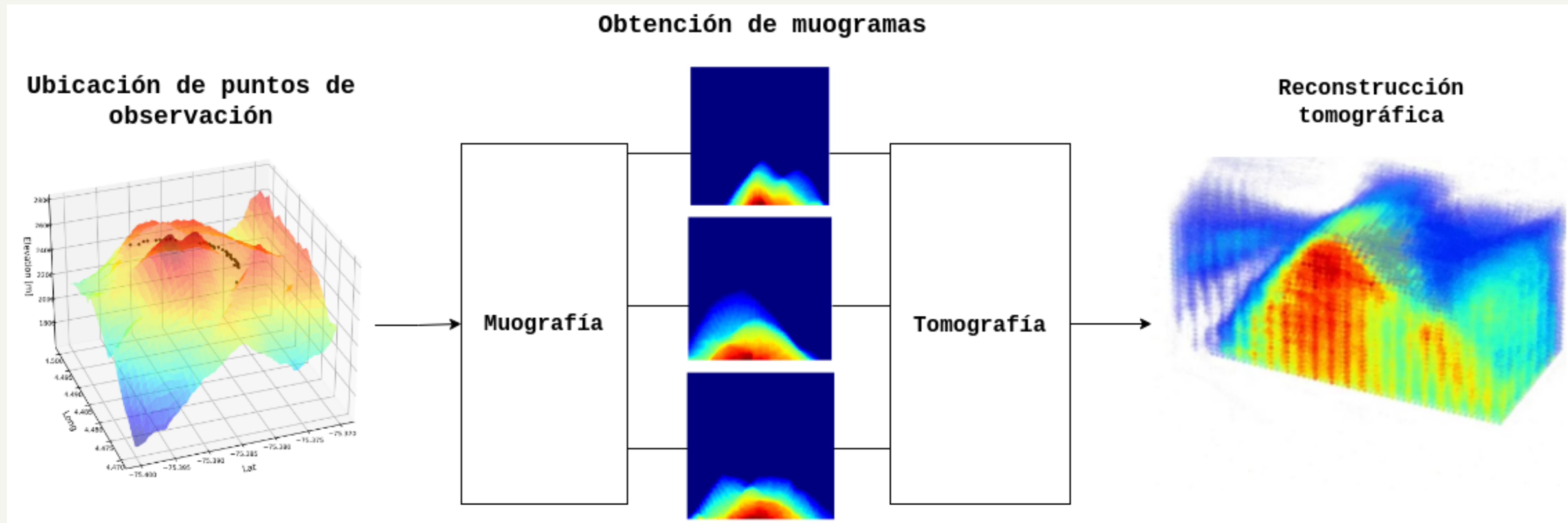
$$x^{k+1} = x^k + \lambda_k \frac{b_i - \langle a_i, x^k \rangle}{\|a_i\|^2} a_i^T$$

x es el volumen a reconstruir vectorizado.

b_i son los pixeles del detector.

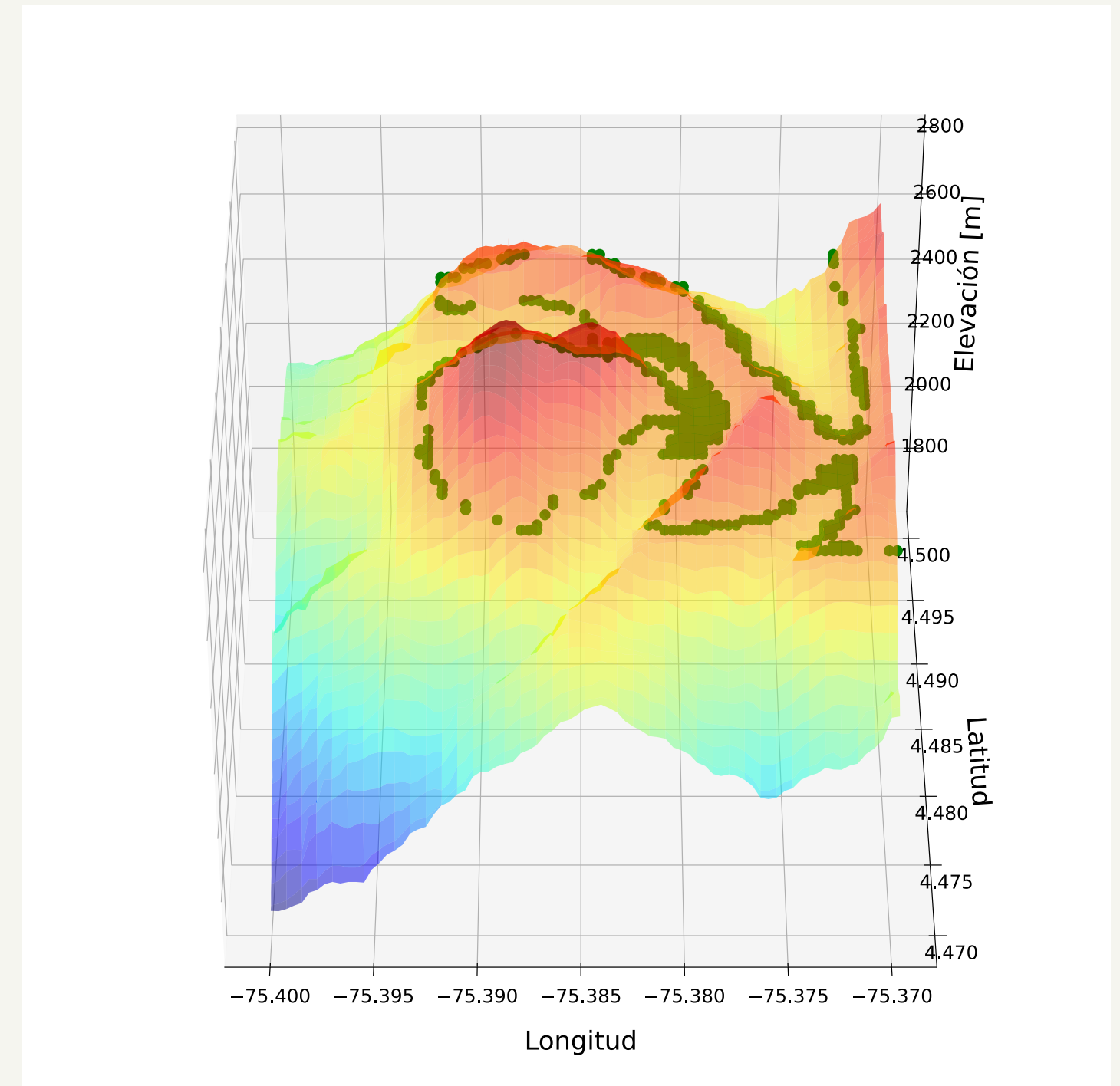
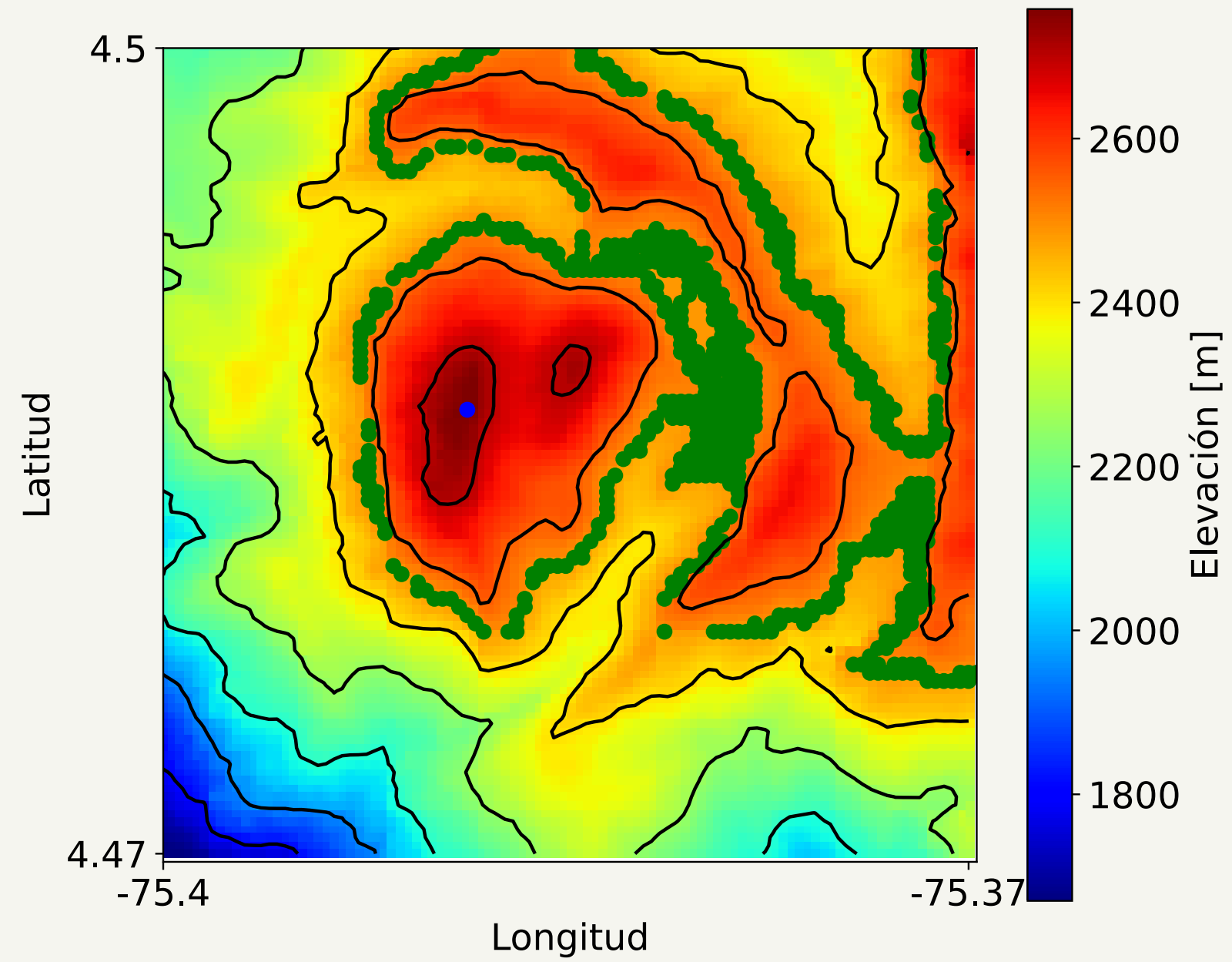
a_i es la distancia entre voxeles que intersectan el eje transversal del detector.

MUYSC



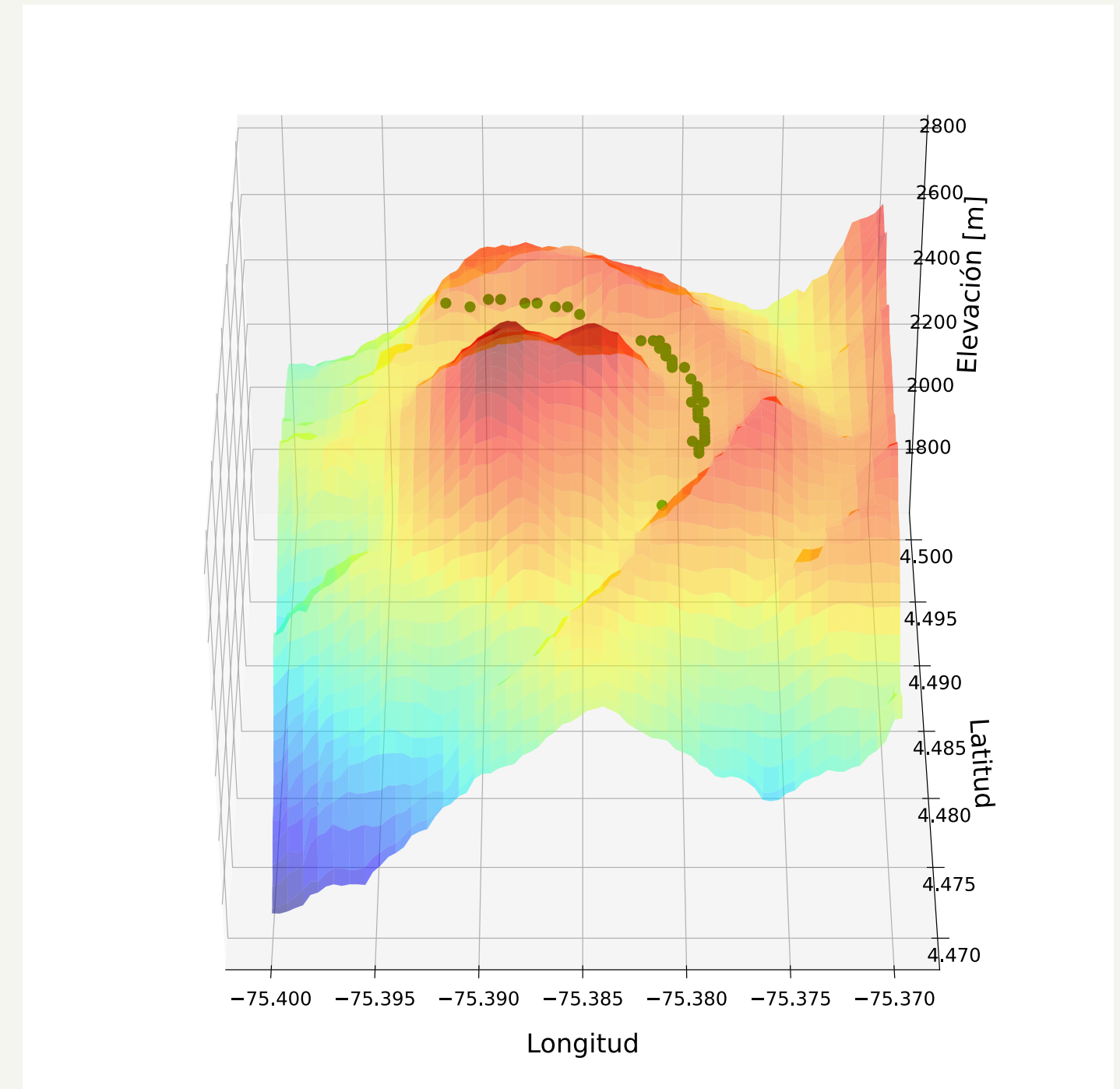
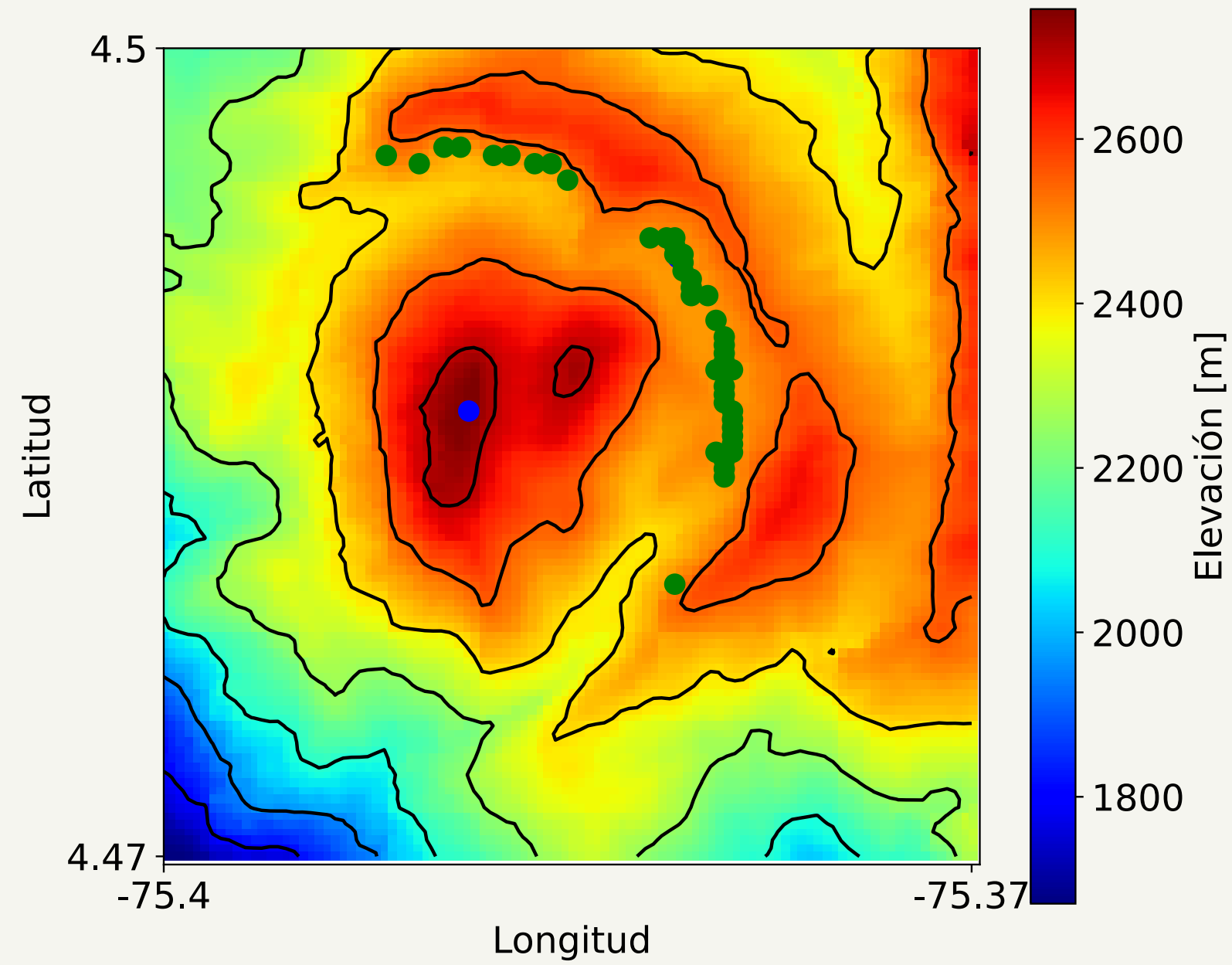
Modelo de proceso de reconstrucción tomográfica de muones.

Filtrado de puntos de observación: Altura



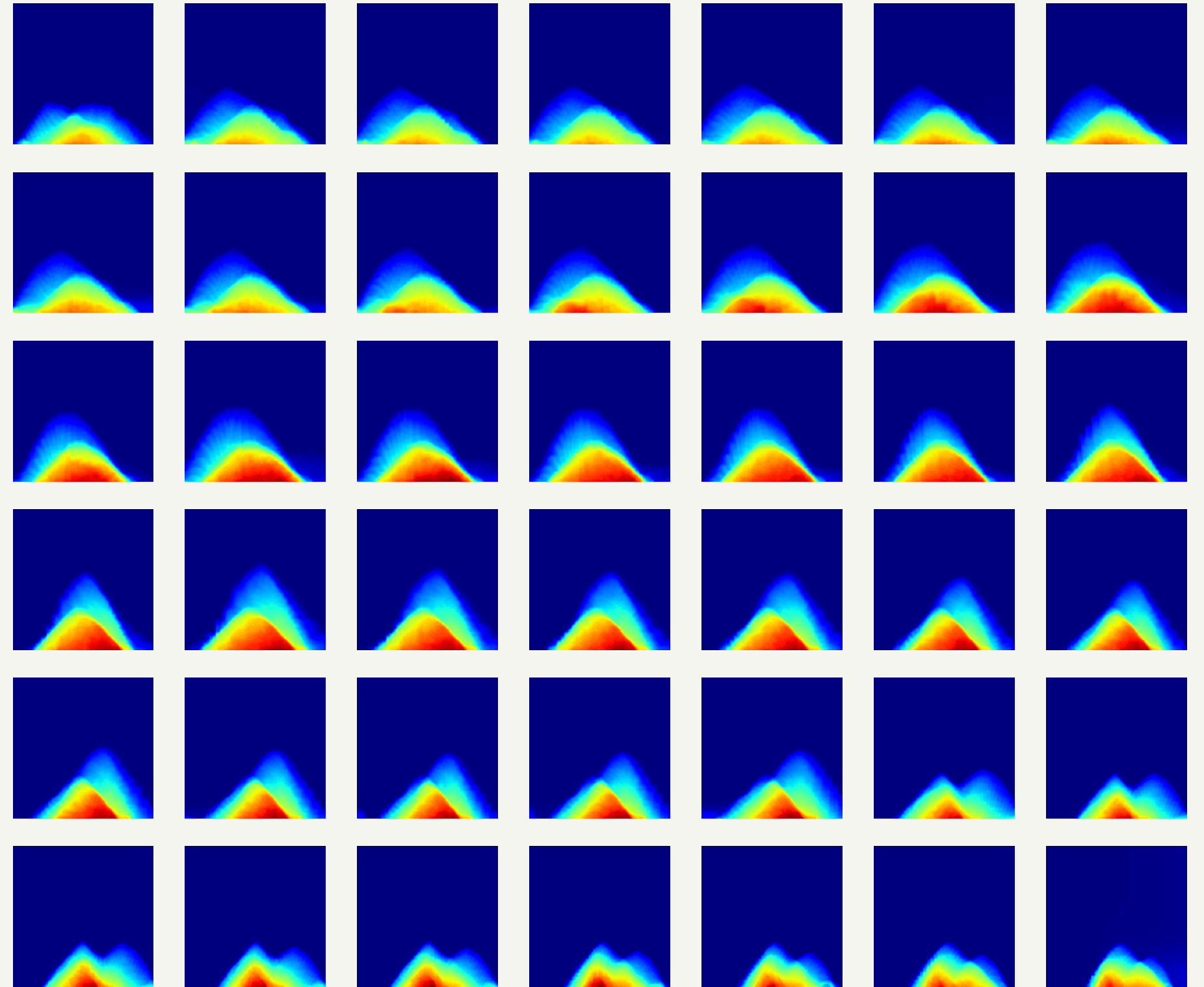
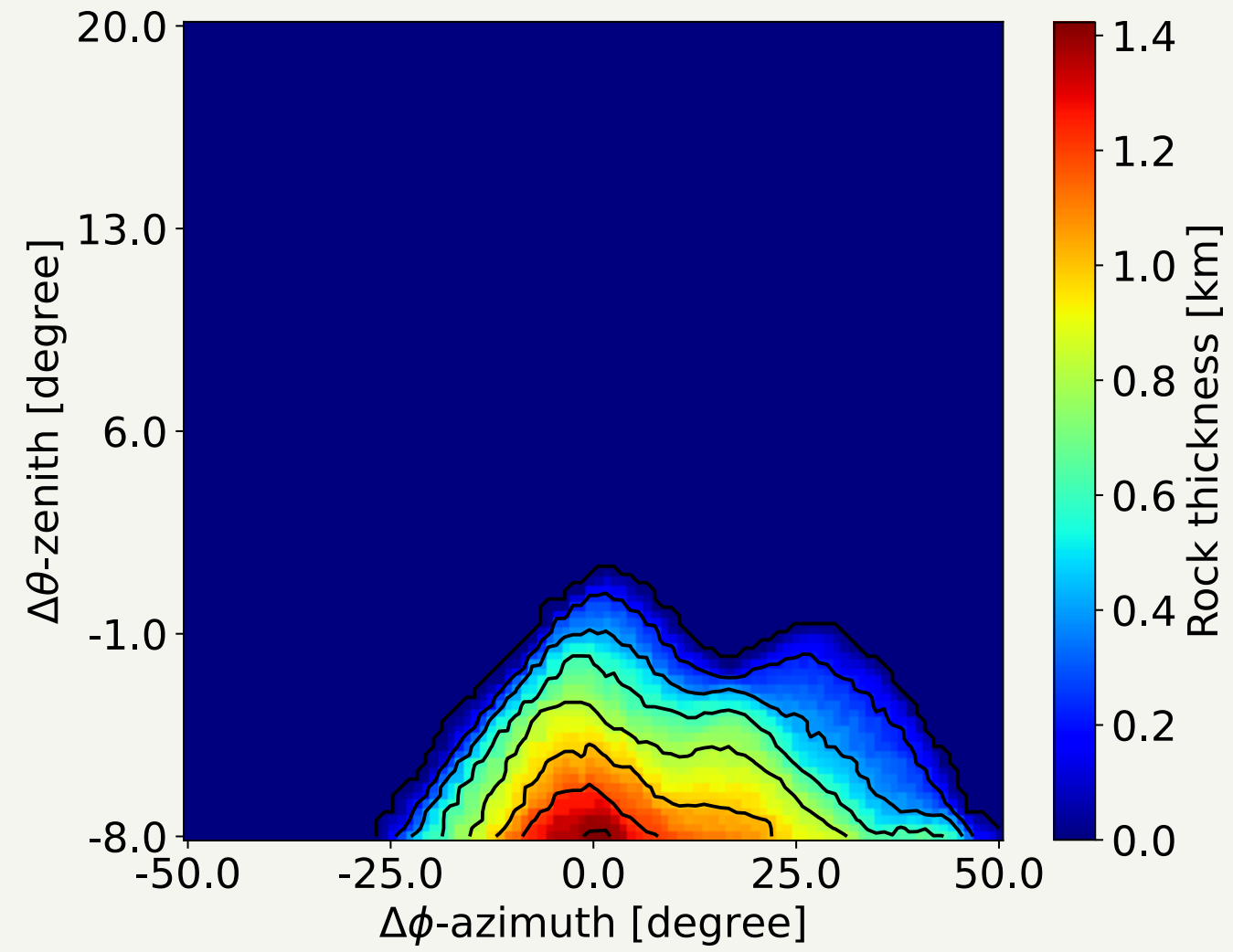
Puntos de observación ubicados en estructura (Misma altura +/- 10 m).

Filtrado de puntos de observación: Equidistancia



Puntos de observación ubicados en estructura (Equidistantes ± 40 m).

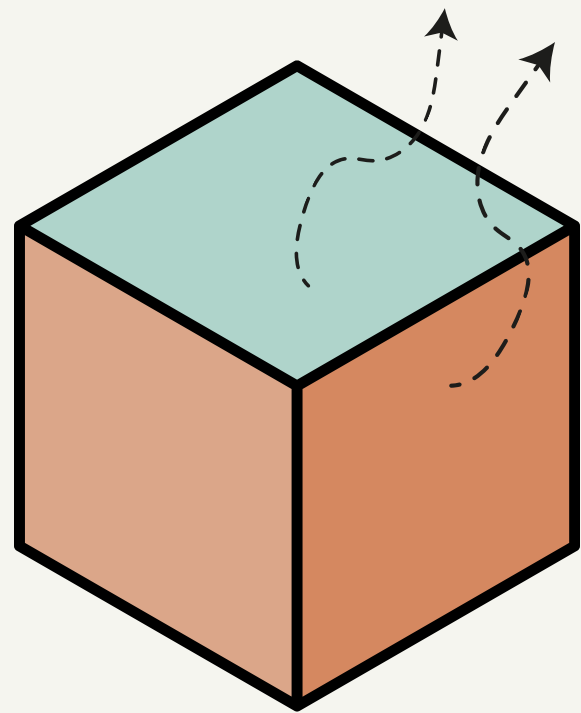
Muogramas



Muogramas del volcán Cerro Machín obtenidos por trazado de rayos (42 puntos).

Reconstrucción

Vistas reconstruidas:
Suma de cortes
perpendiculares al
respectivo eje.

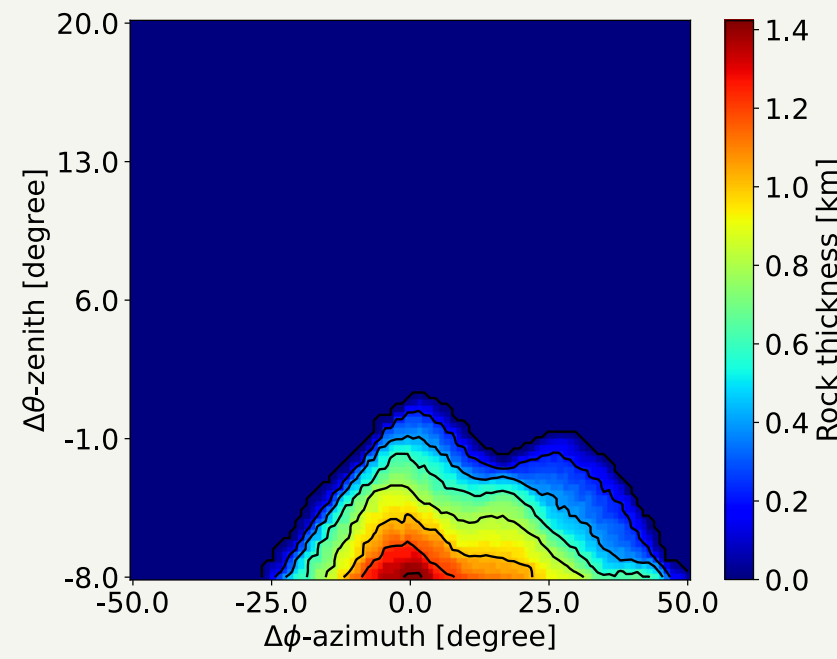
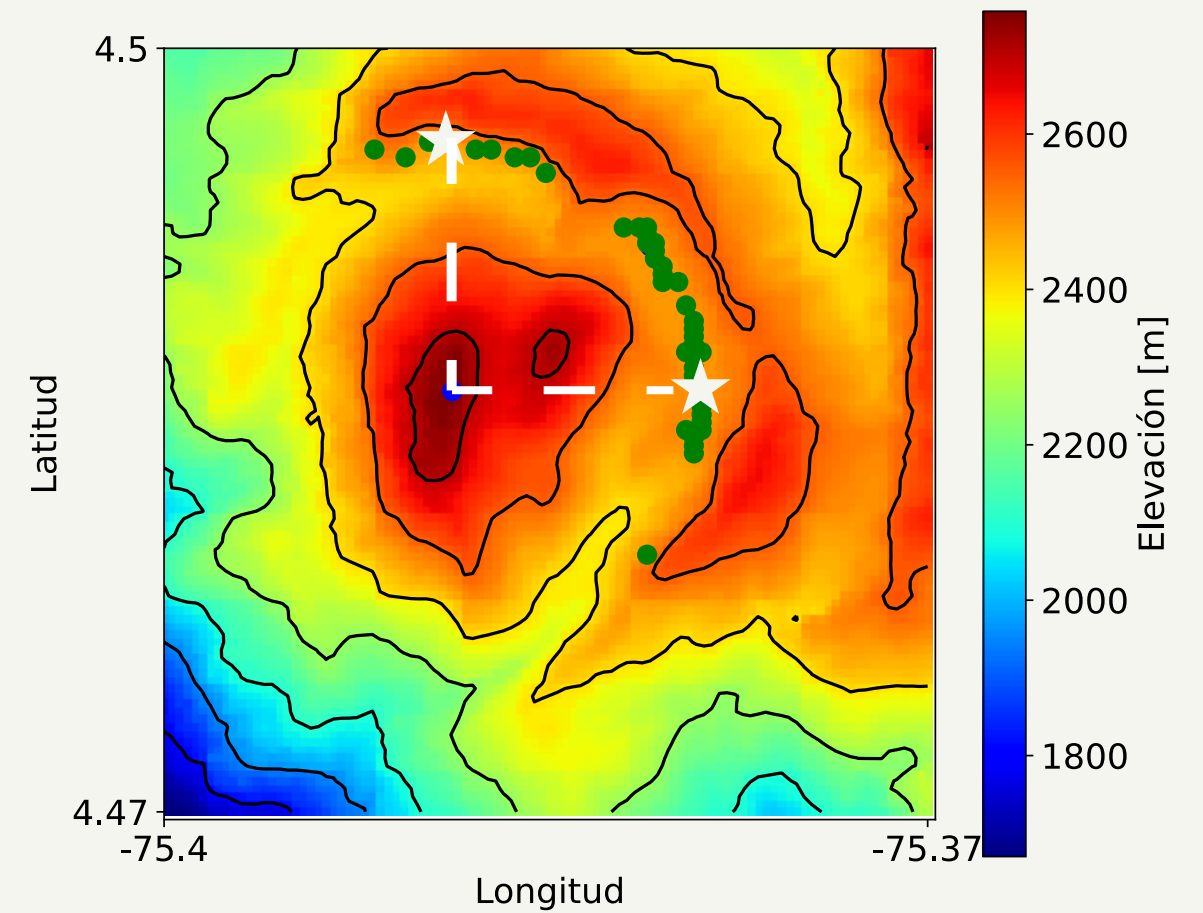


Volumen Reconstruido

No se cuenta con un volumen original para comparar pero sí con vistas.

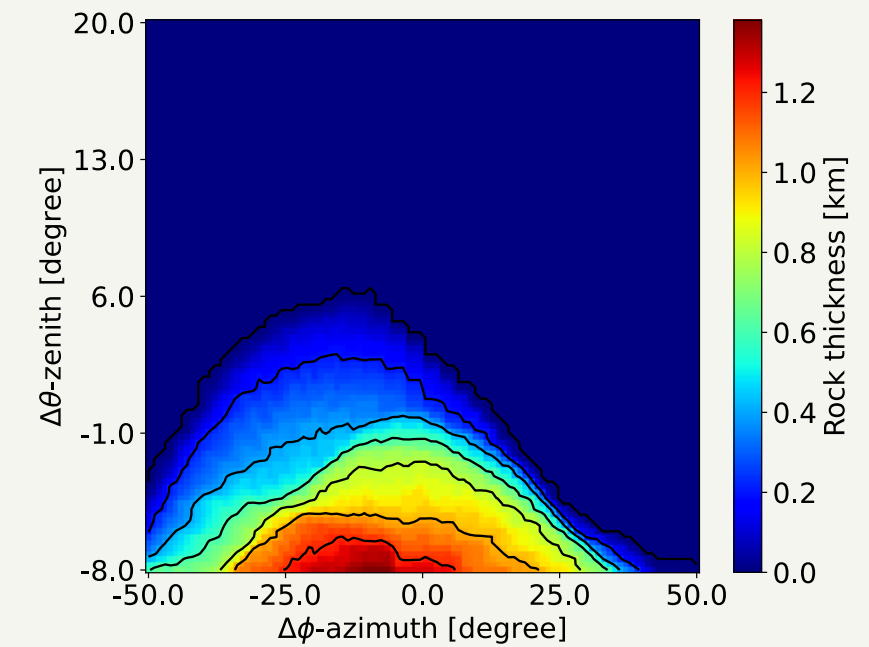
Vistas originales

Vista superior: Topografía del volcán

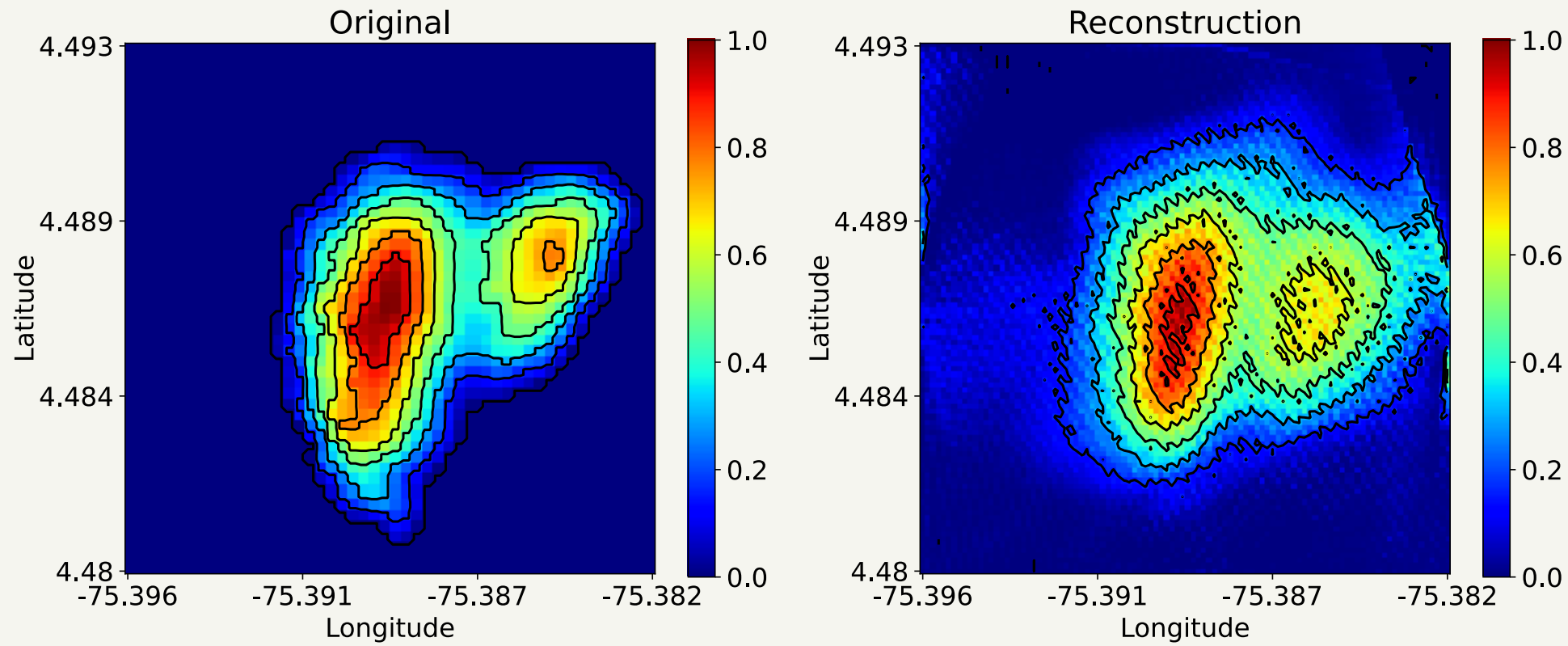


Vista frontal: muograma
ubicado en $\sim 0^\circ$

Vista lateral:
muograma ubicado en
 $\sim 90^\circ$



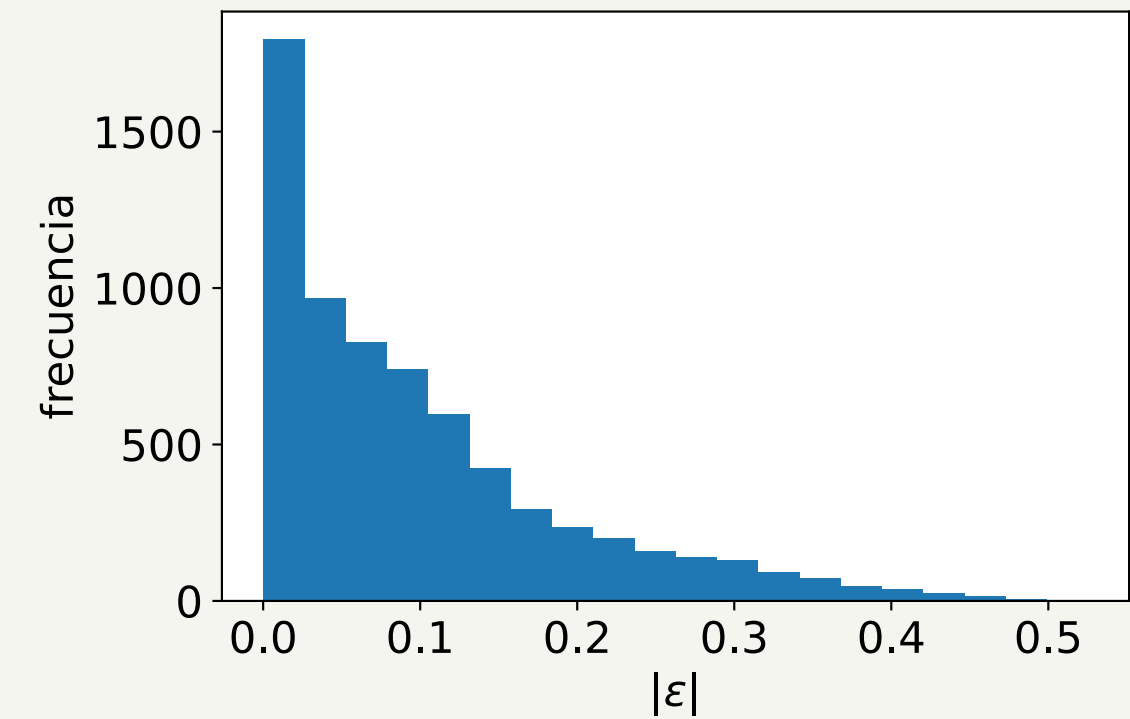
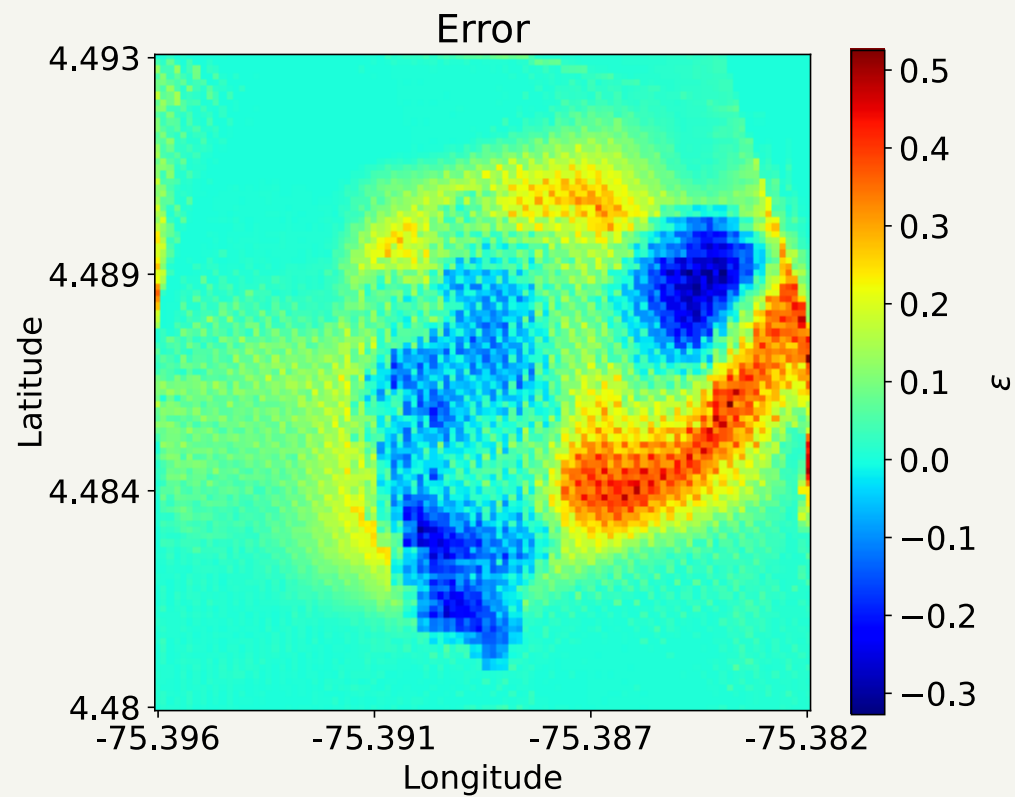
Error vista superior



$$\varepsilon_{i,j} = R_{i,j} - T_{i,j}$$

$$\text{rmse} = \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i,j}^{m,n} (R_{i,j} - T_{i,j})^2}$$

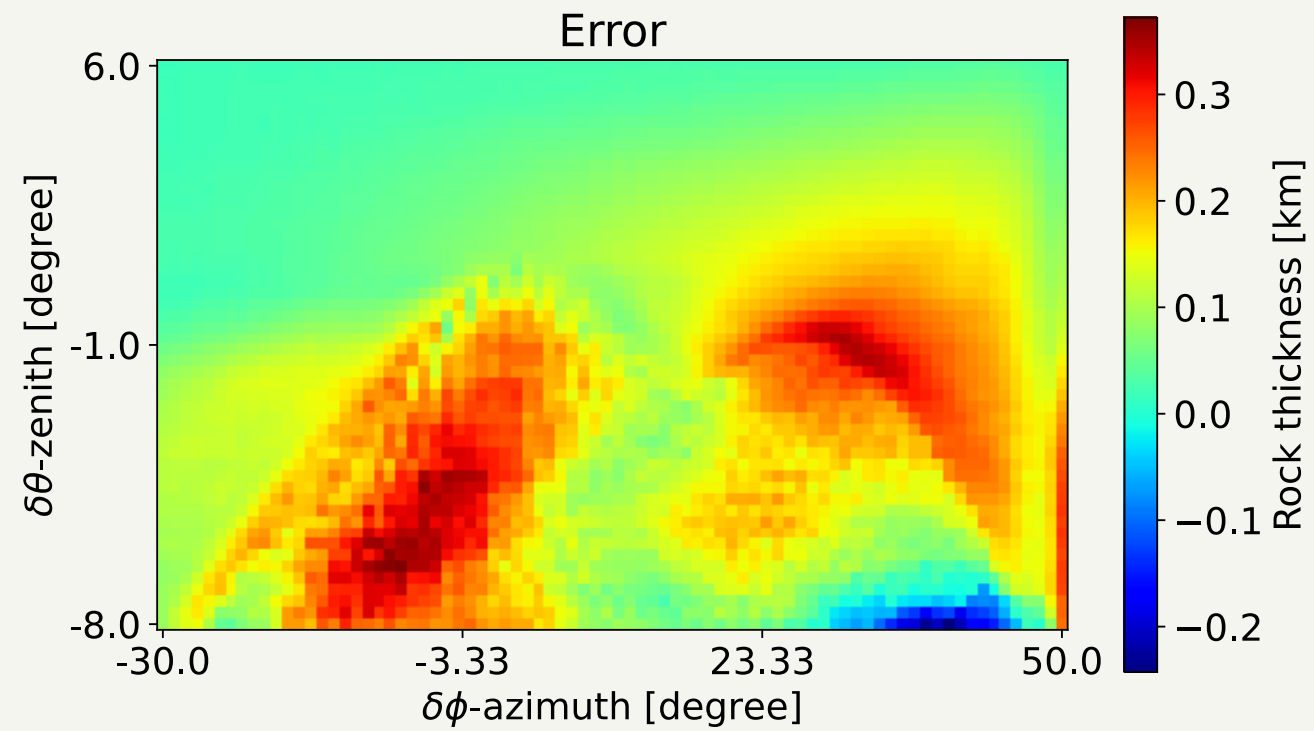
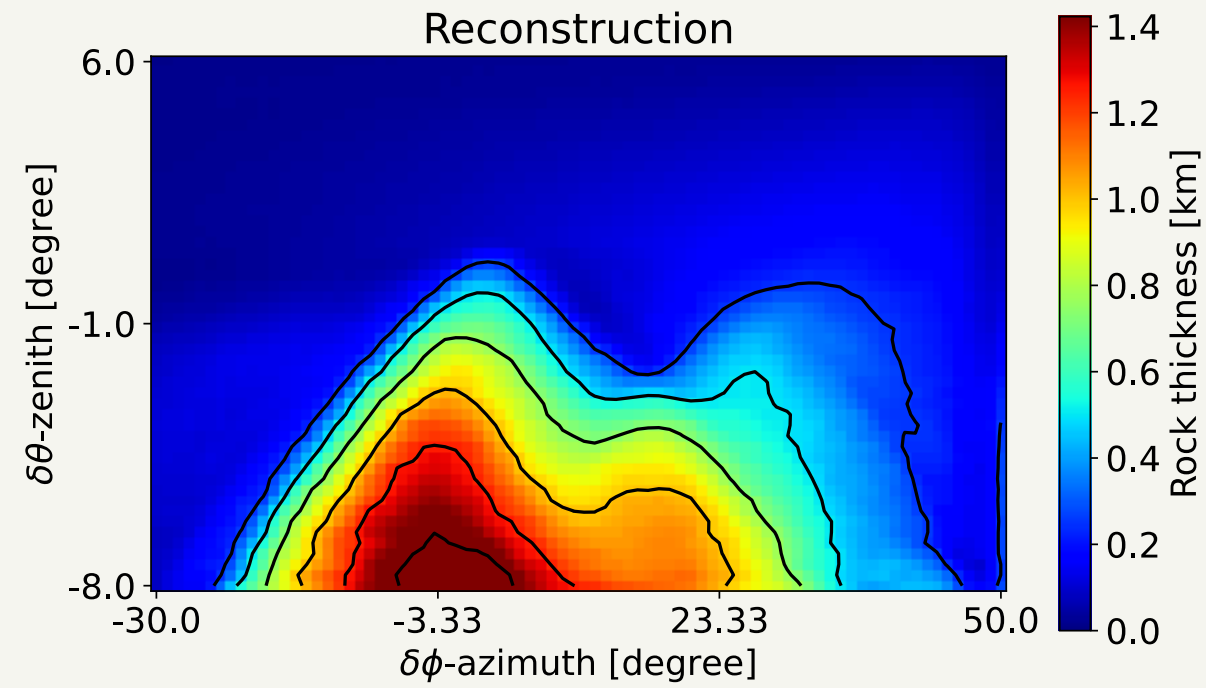
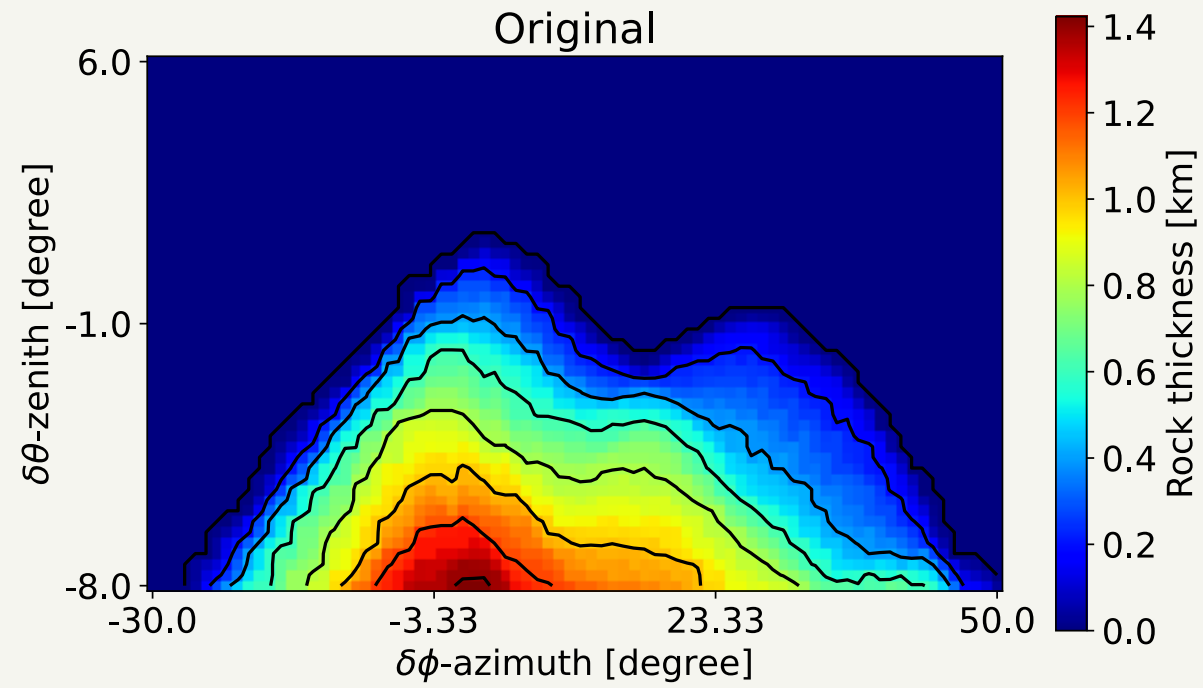
$$\text{rmse} = 0.14 \quad \mu_{|\varepsilon|} = 0.099 \quad \sigma_{|\varepsilon|} = 0.096$$



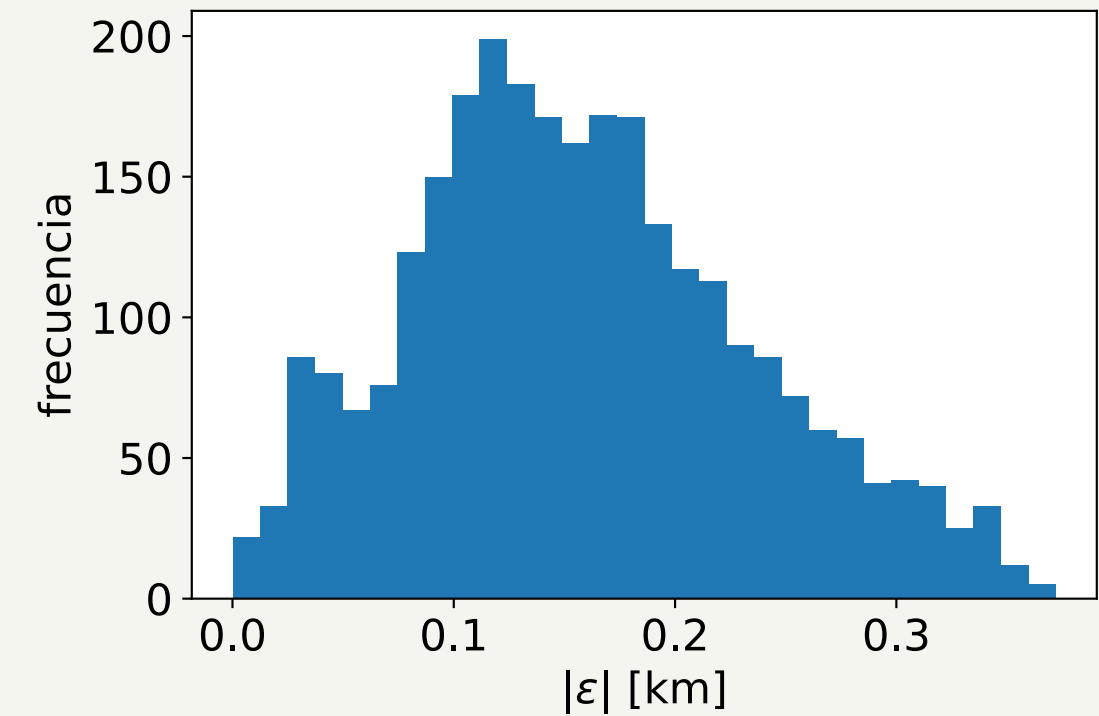
Histograma de error acumulado.

Mapa de error obtenido por la diferencia entre mapa de alturas y vista superior de reconstrucción.

Error vista frontal



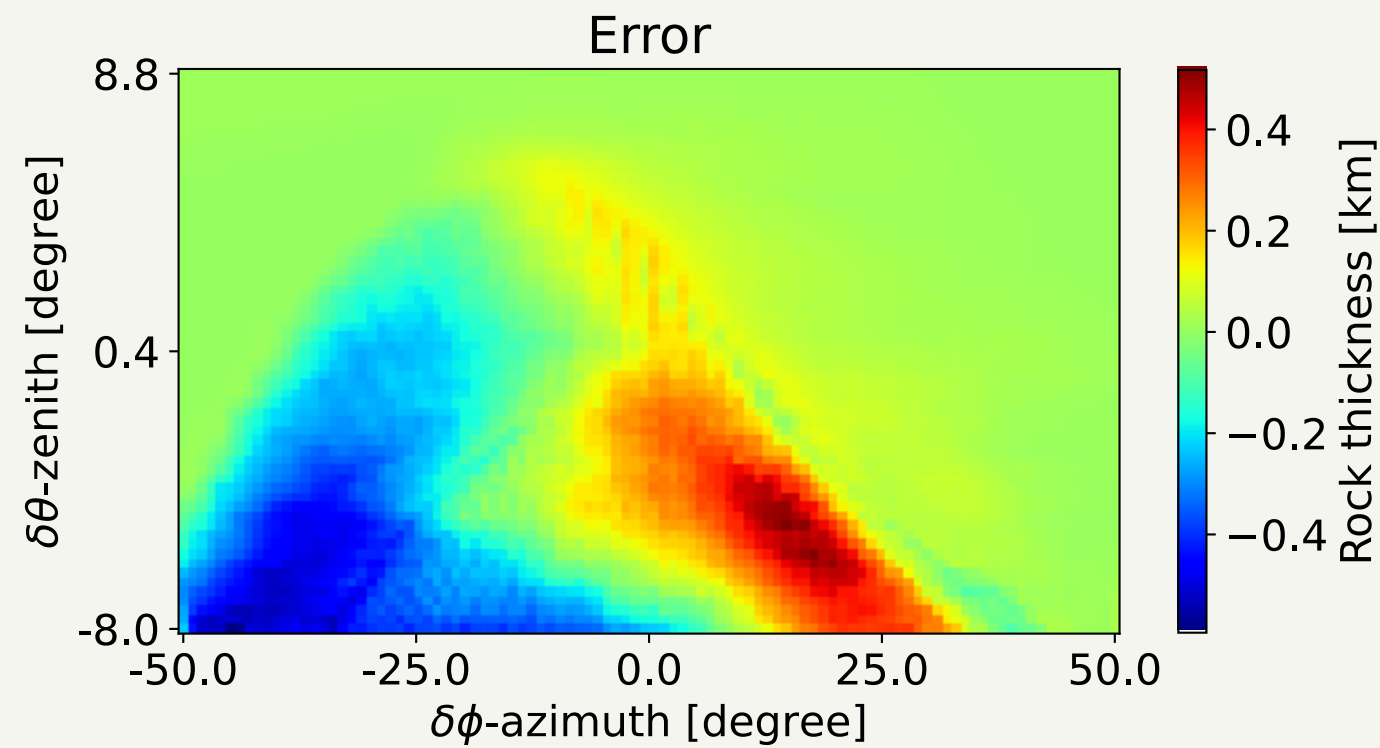
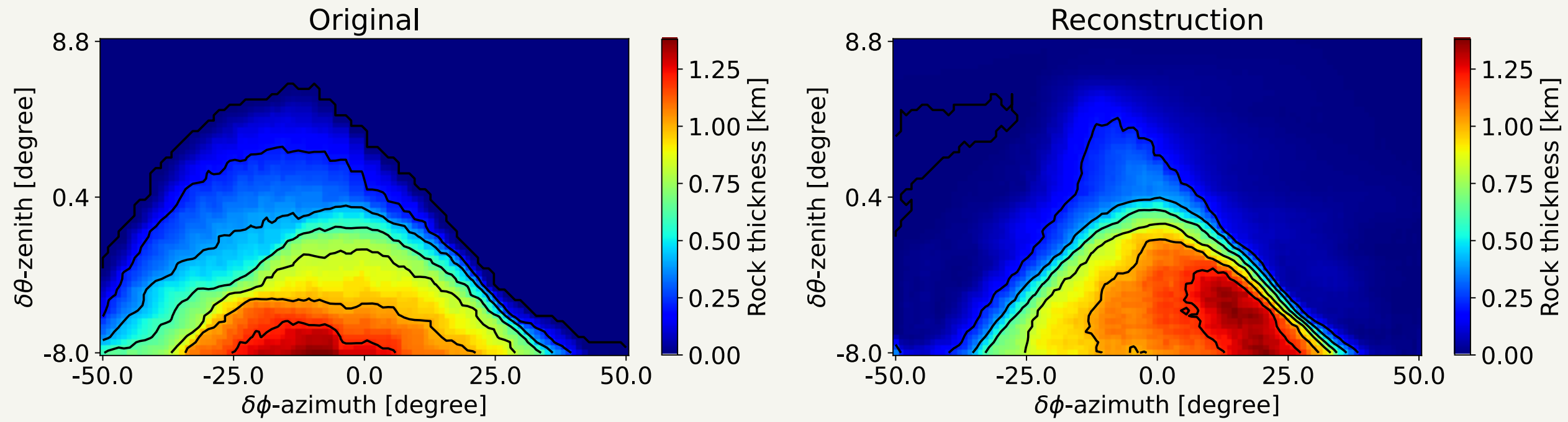
$$\text{rmse} = 0.18 \text{ km} \quad \mu_{|\varepsilon|} = 0.16 \text{ km} \quad \sigma_{|\varepsilon|} = 0.077 \text{ km}$$



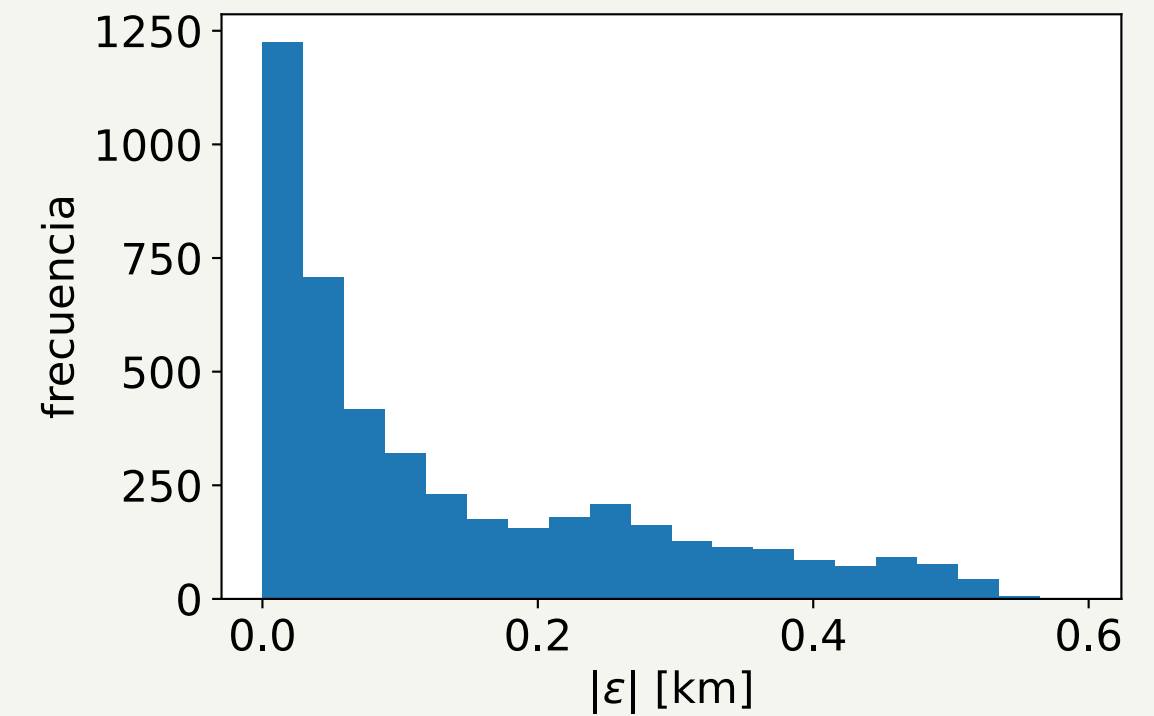
Mapa de error obtenido por la diferencia entre muograma y vista frontal de reconstrucción.

Histograma de error acumulado.

Error vista lateral



$$\text{rmse} = 0.19 \text{ km} \quad \mu_{|\varepsilon|} = 0.14 \text{ km} \quad \sigma_{|\varepsilon|} = 0.14 \text{ km}$$

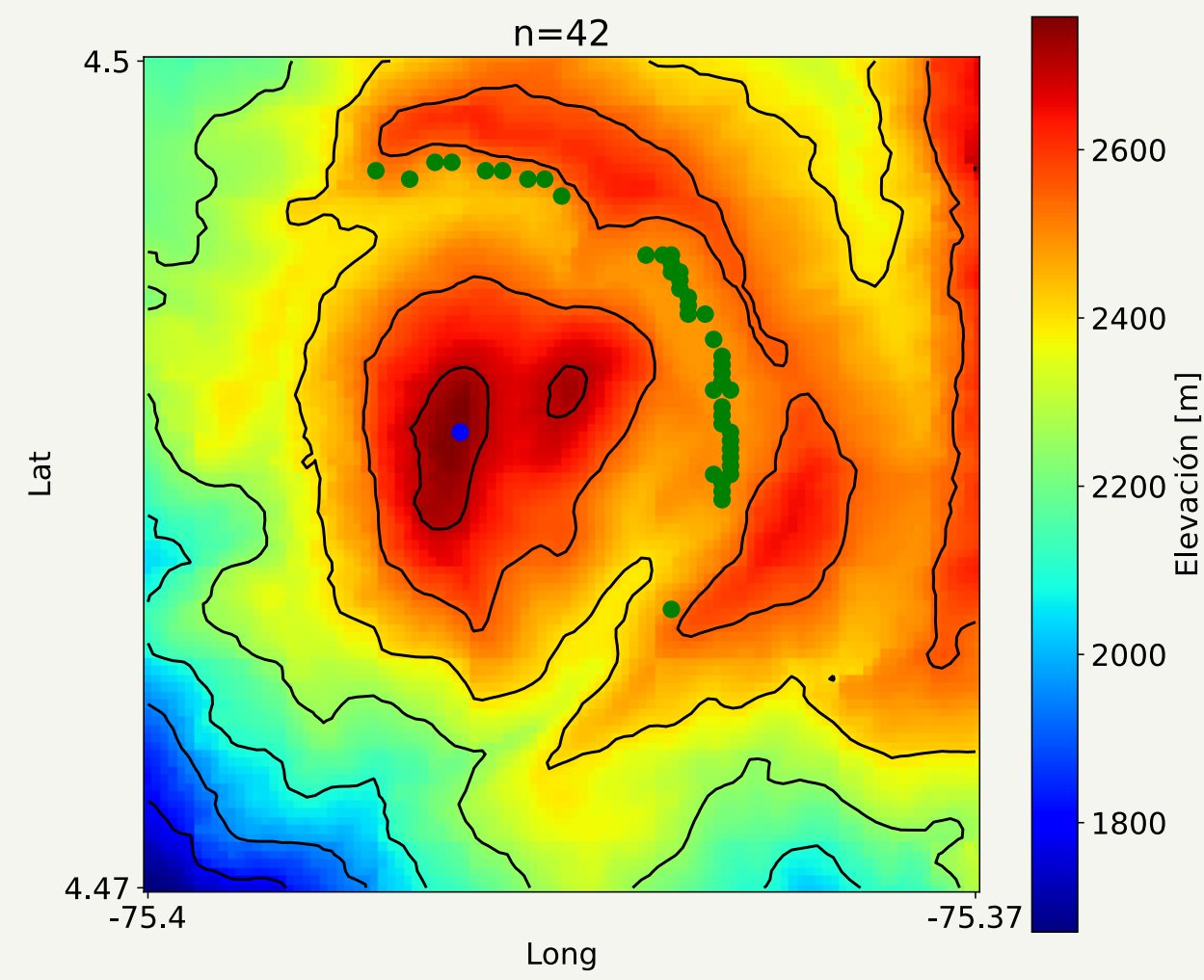


Mapa de error obtenido por la diferencia entre muograma y vista lateral de reconstrucción.

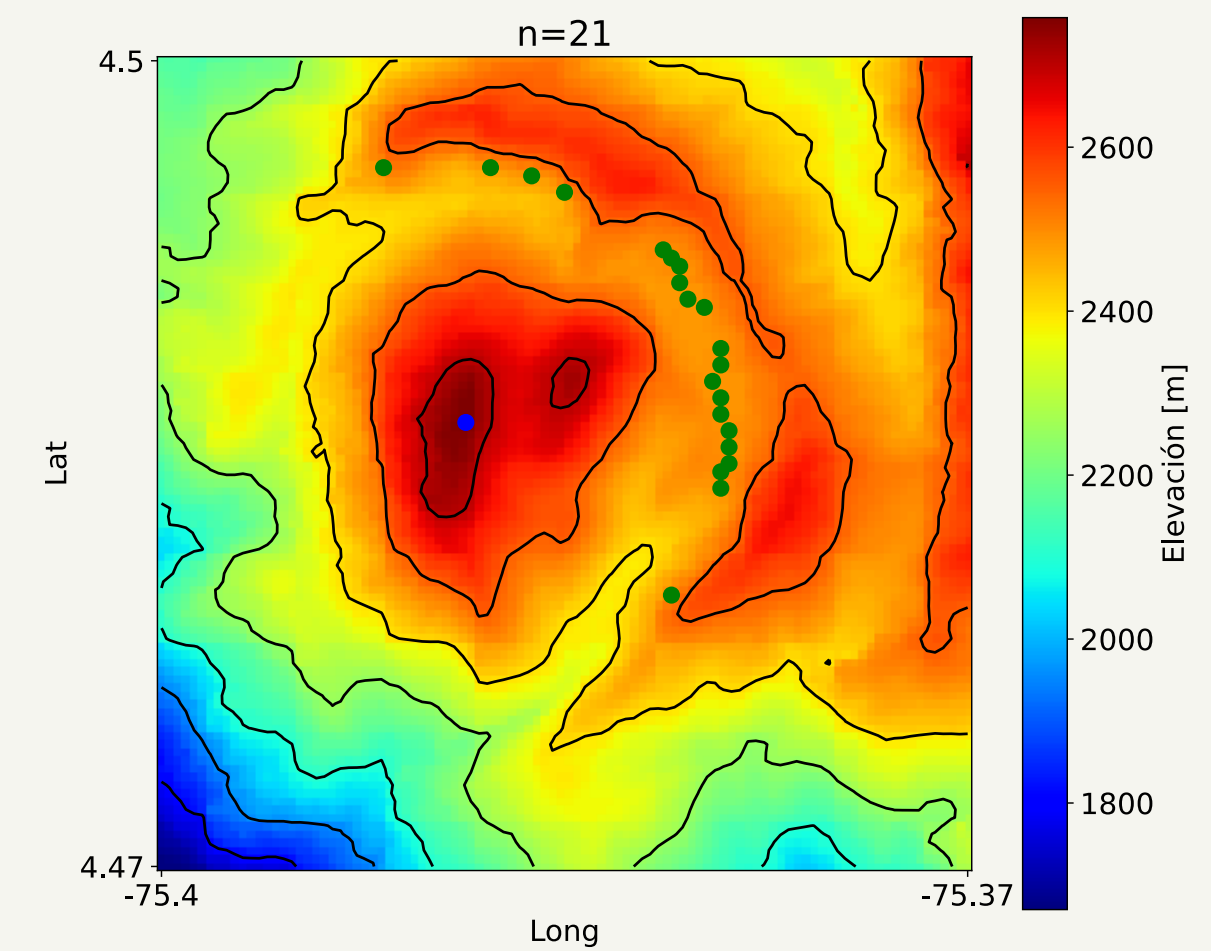
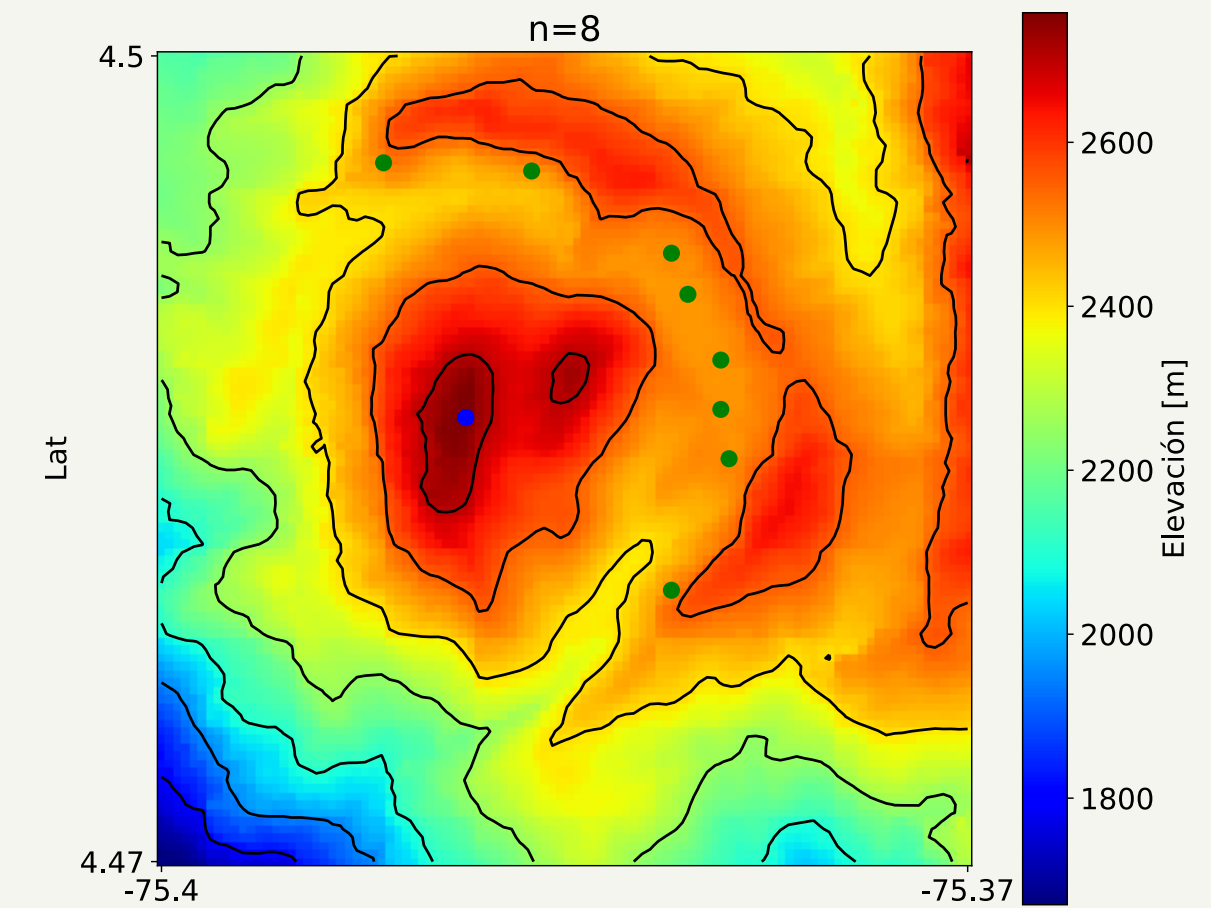
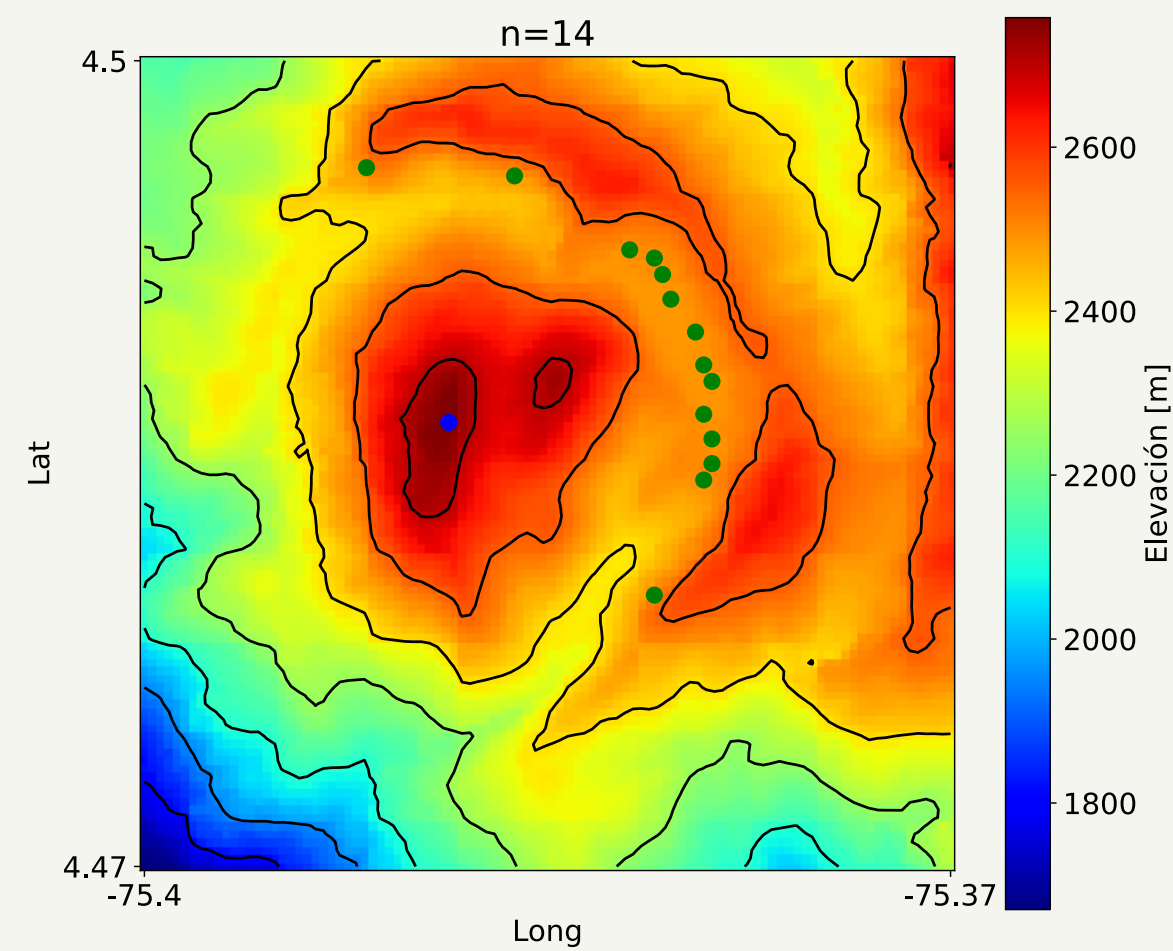
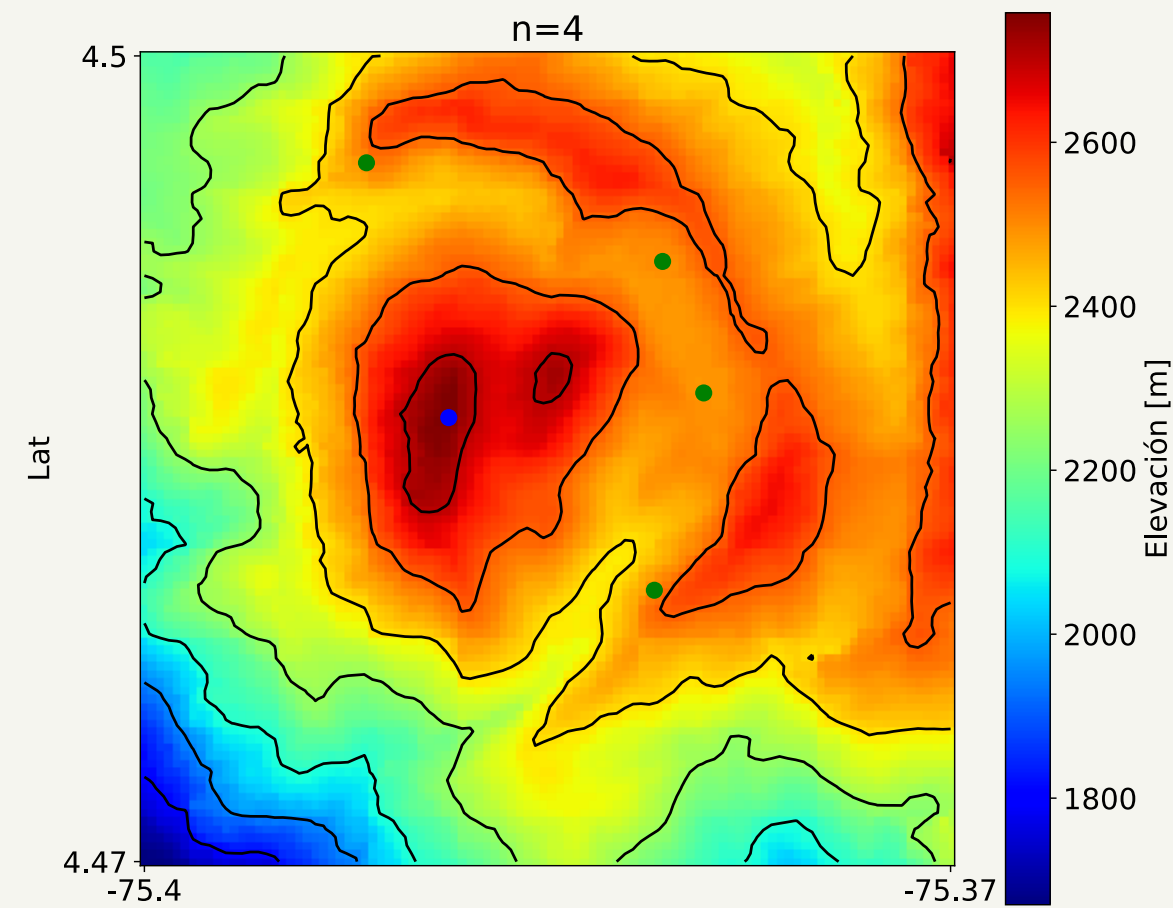
Histograma de error acumulado.

Variación de número de puntos e iteraciones

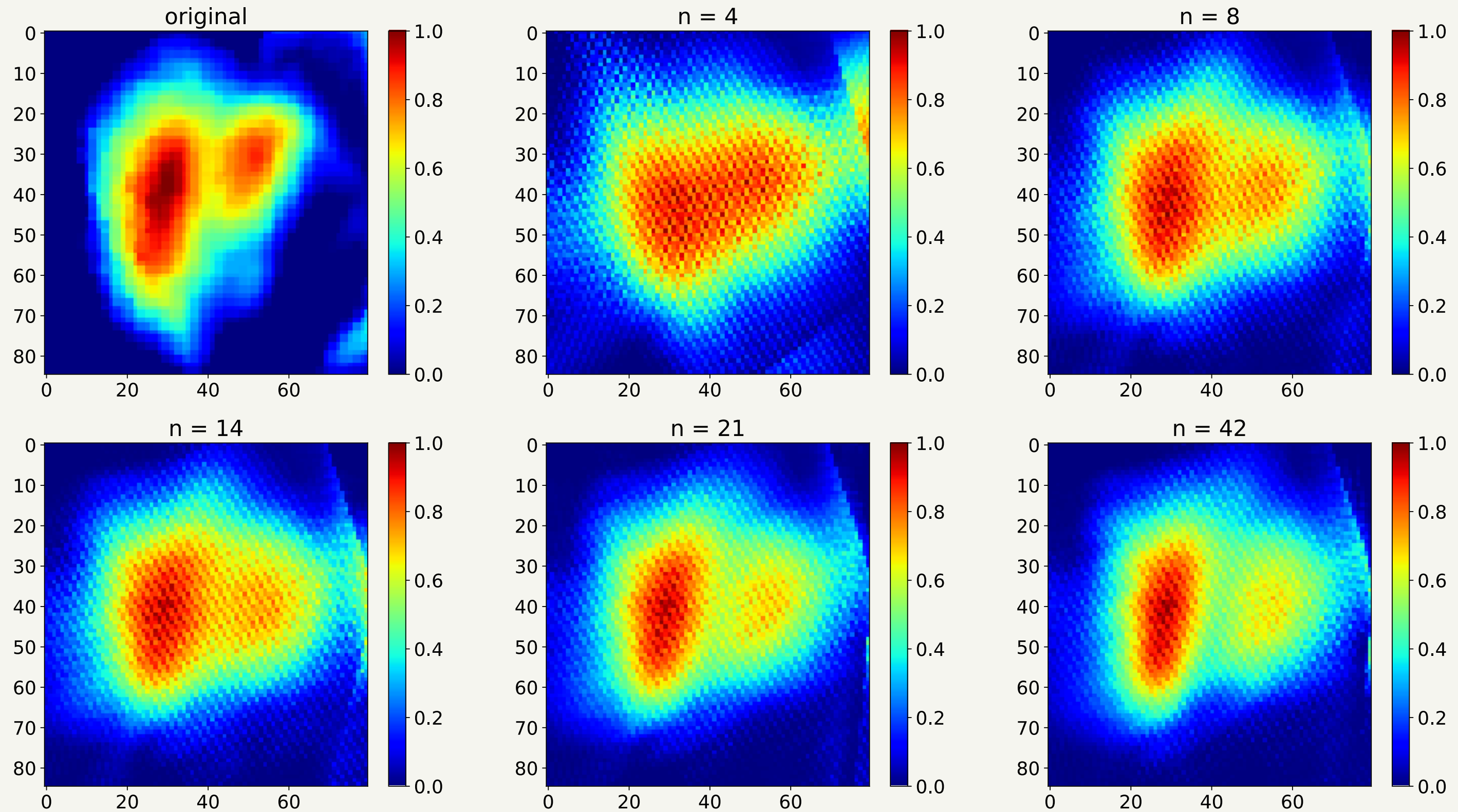
Variación de puntos



Ubicación de puntos de observación usados para reconstrucción.

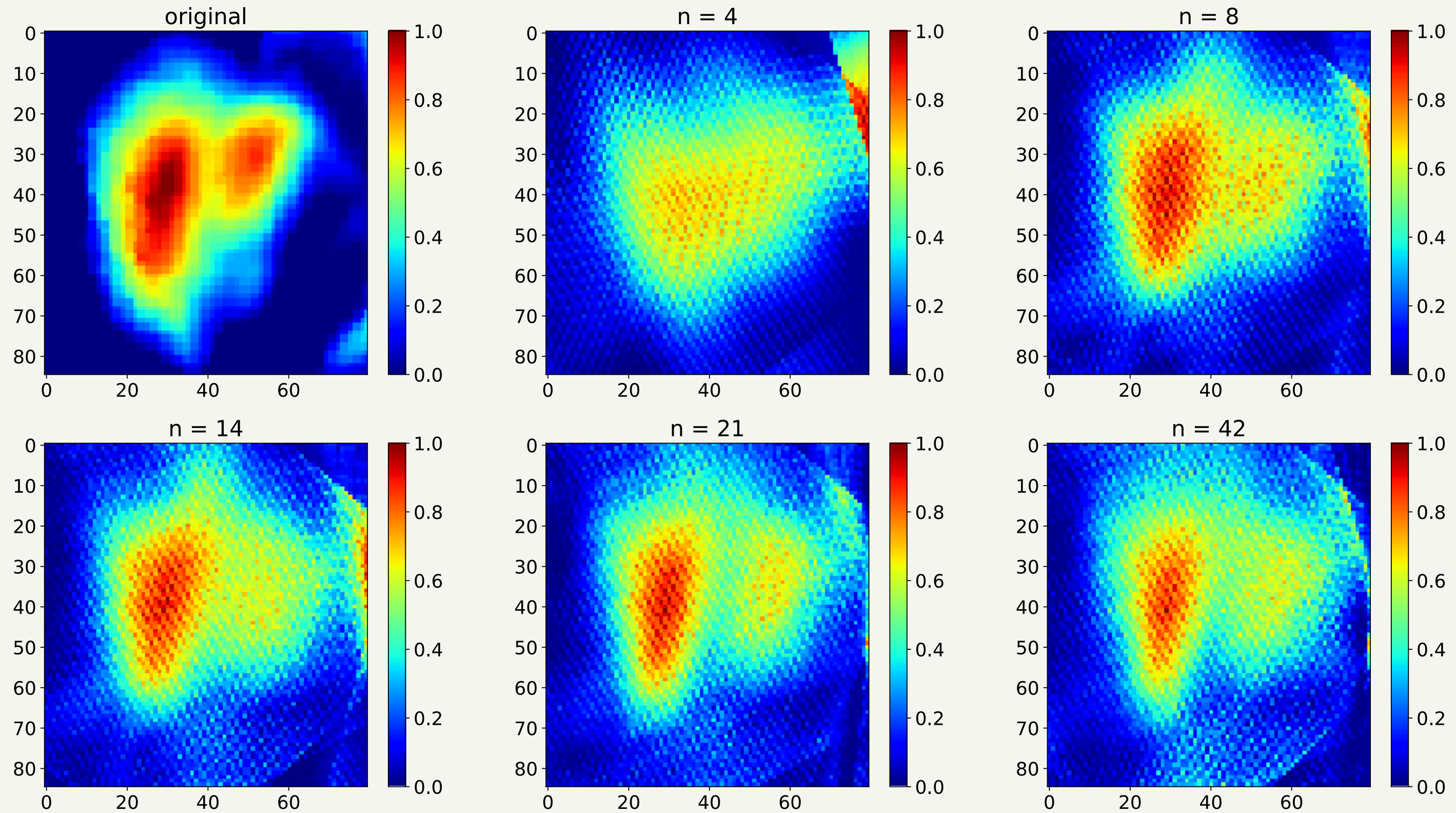


Variación de puntos e iteraciones



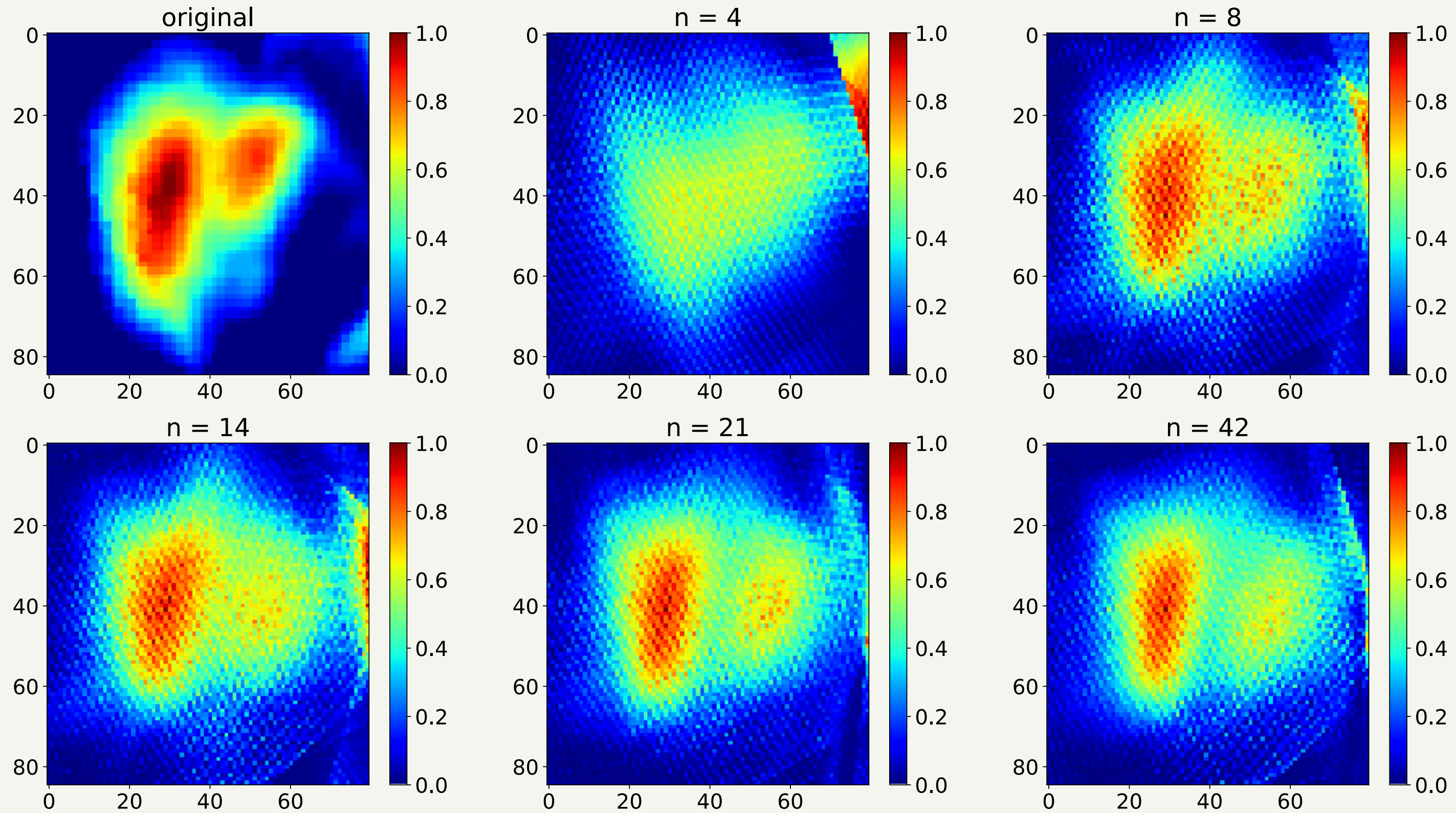
Vista superior de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 1 iteración.

Variación de puntos e iteraciones



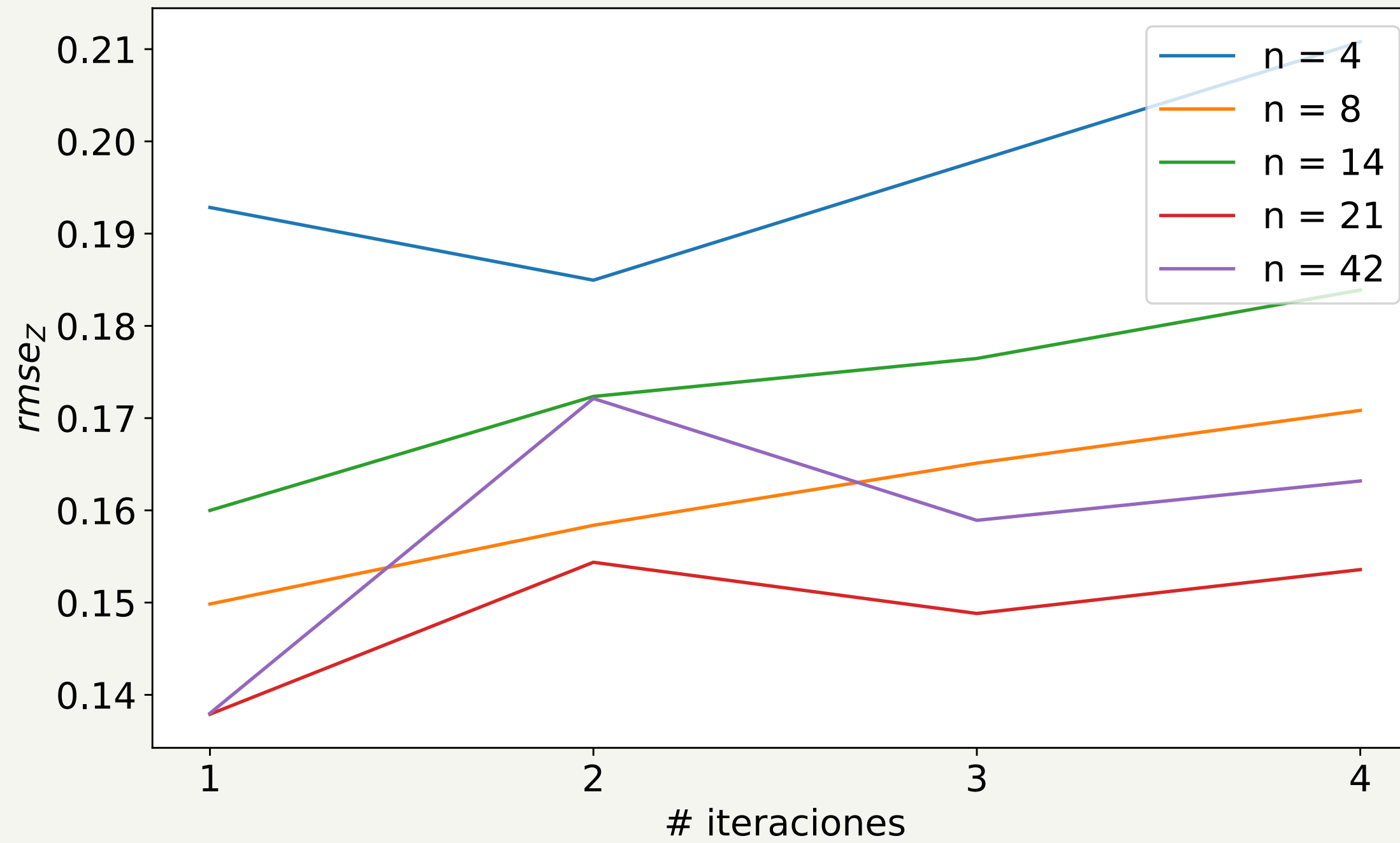
Vista superior de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 2 iteraciones.

Variación de puntos e iteraciones



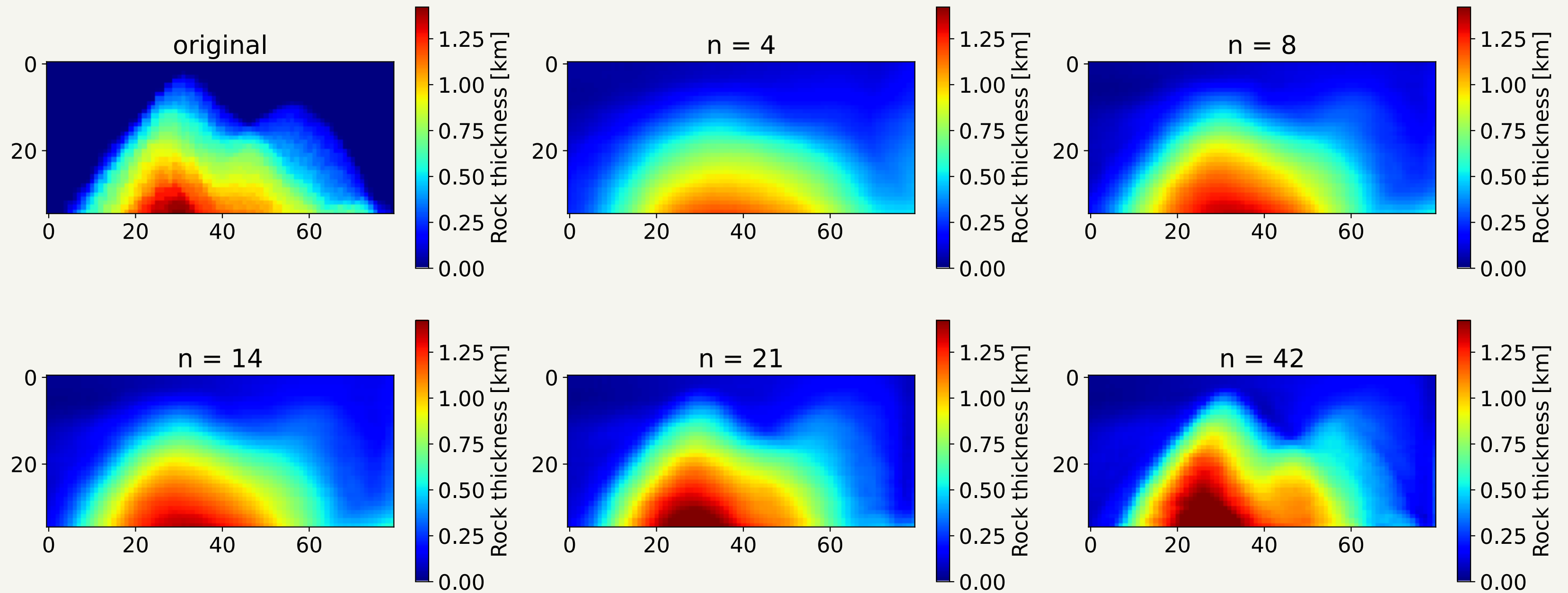
Vista superior de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 3 iteraciones.

Errores vista superior



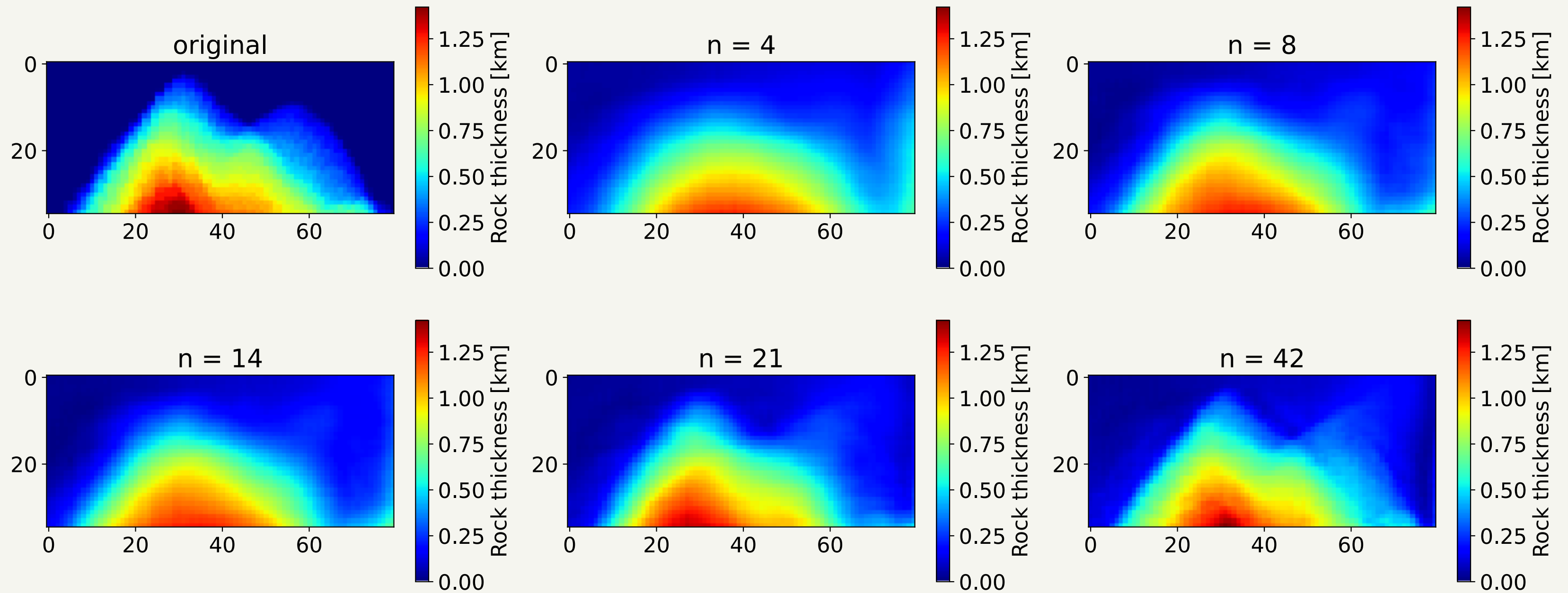
Errores de reconstrucción (vista superior) en cada iteración variando el número de puntos de observación.

Variación de puntos e iteraciones



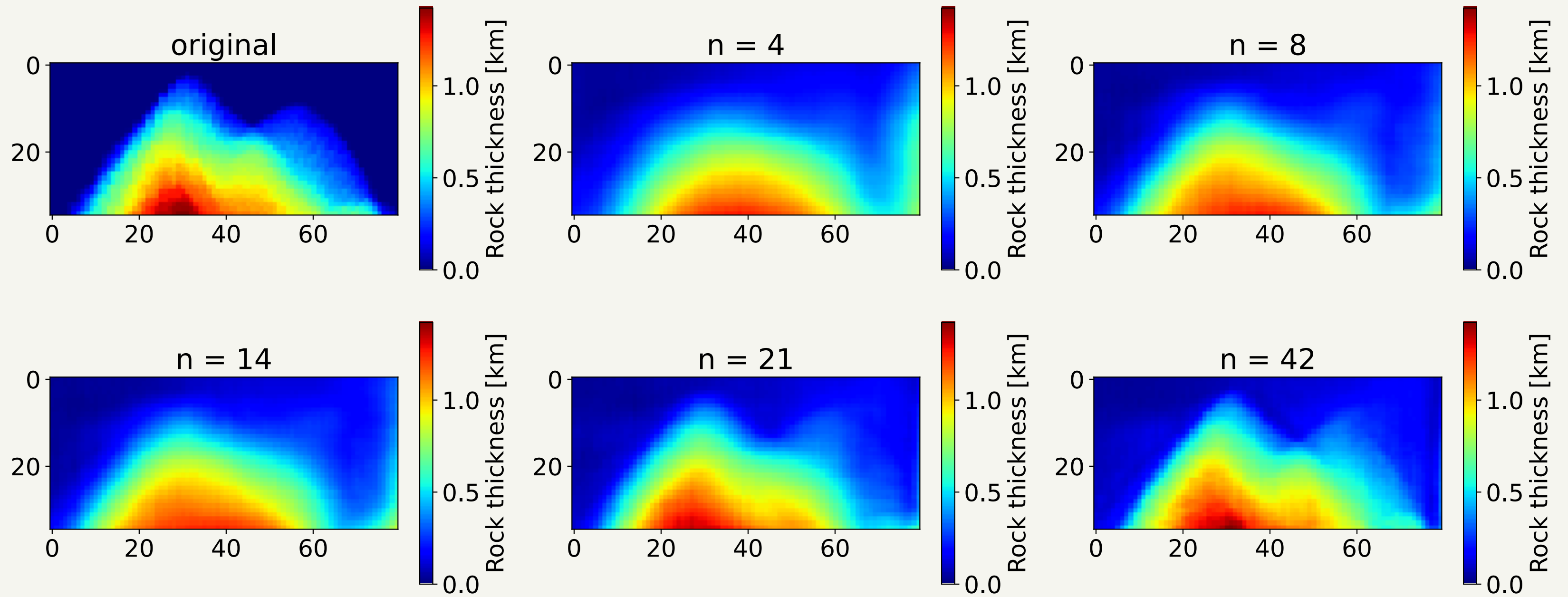
Vista frontal de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 1 iteración.

Variación de puntos e iteraciones



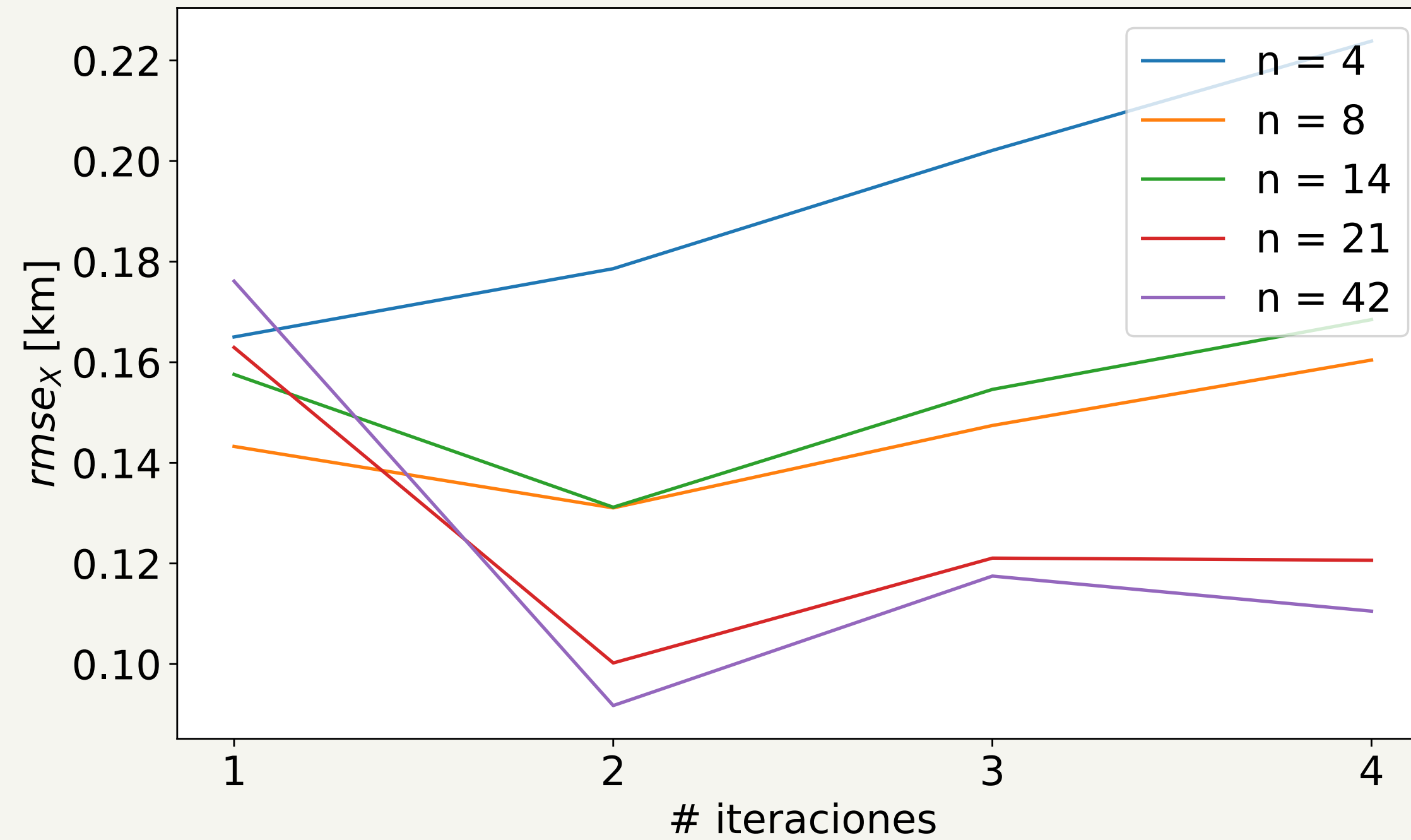
Vista frontal de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 2 iteraciones.

Variación de puntos e iteraciones



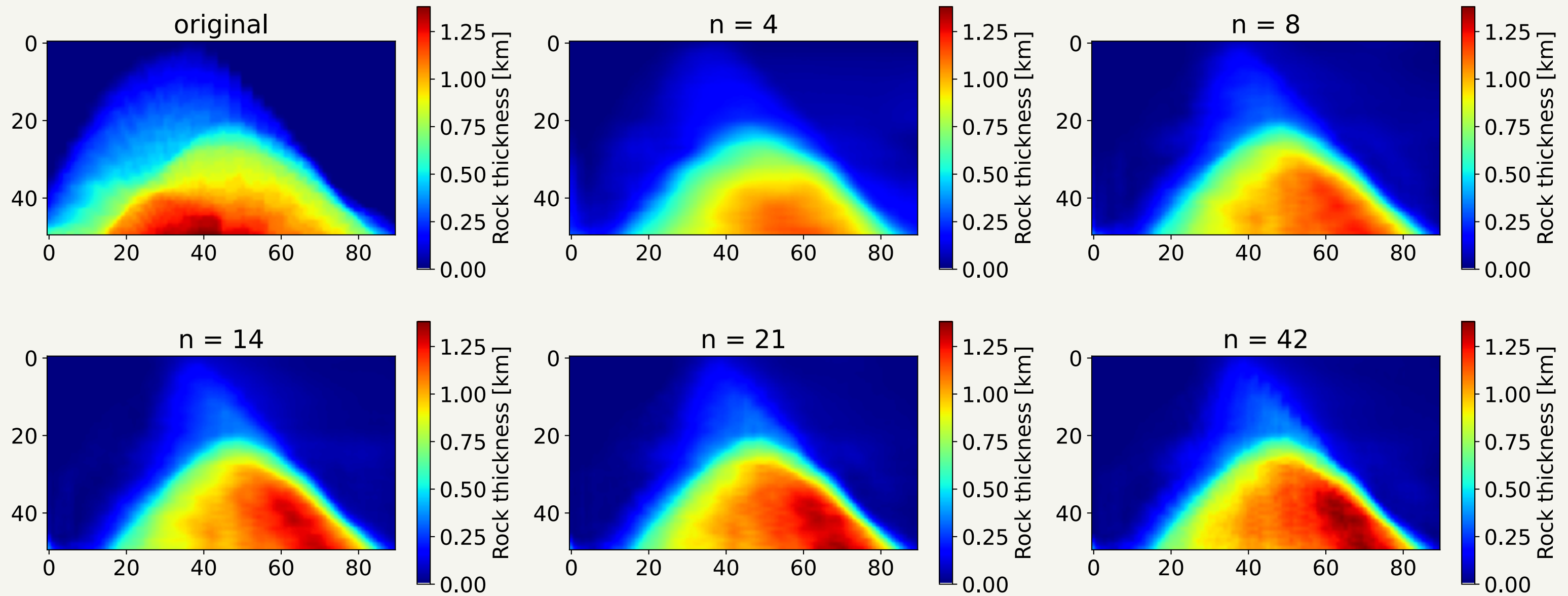
Vista frontal de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 3 iteraciones.

Errores vista frontal



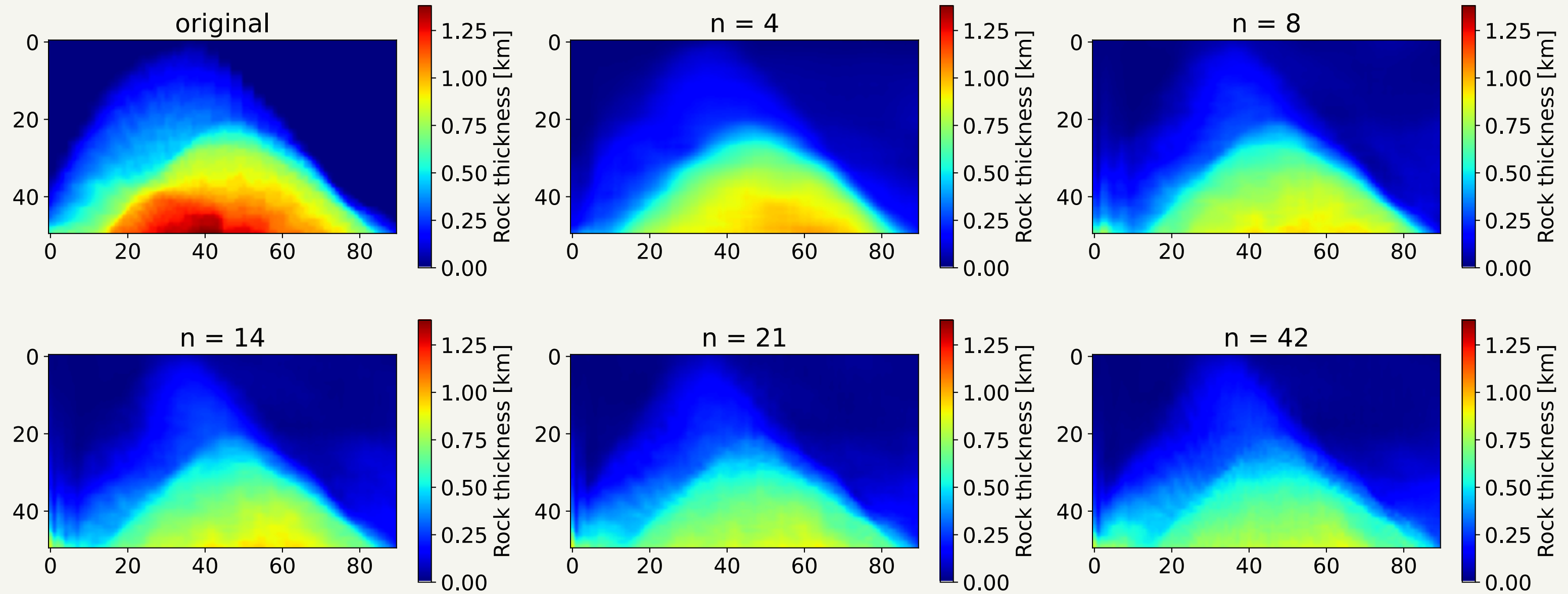
Errores de reconstrucción (vista frontal) en cada iteración variando el número de puntos de observación.

Variación de puntos e iteraciones



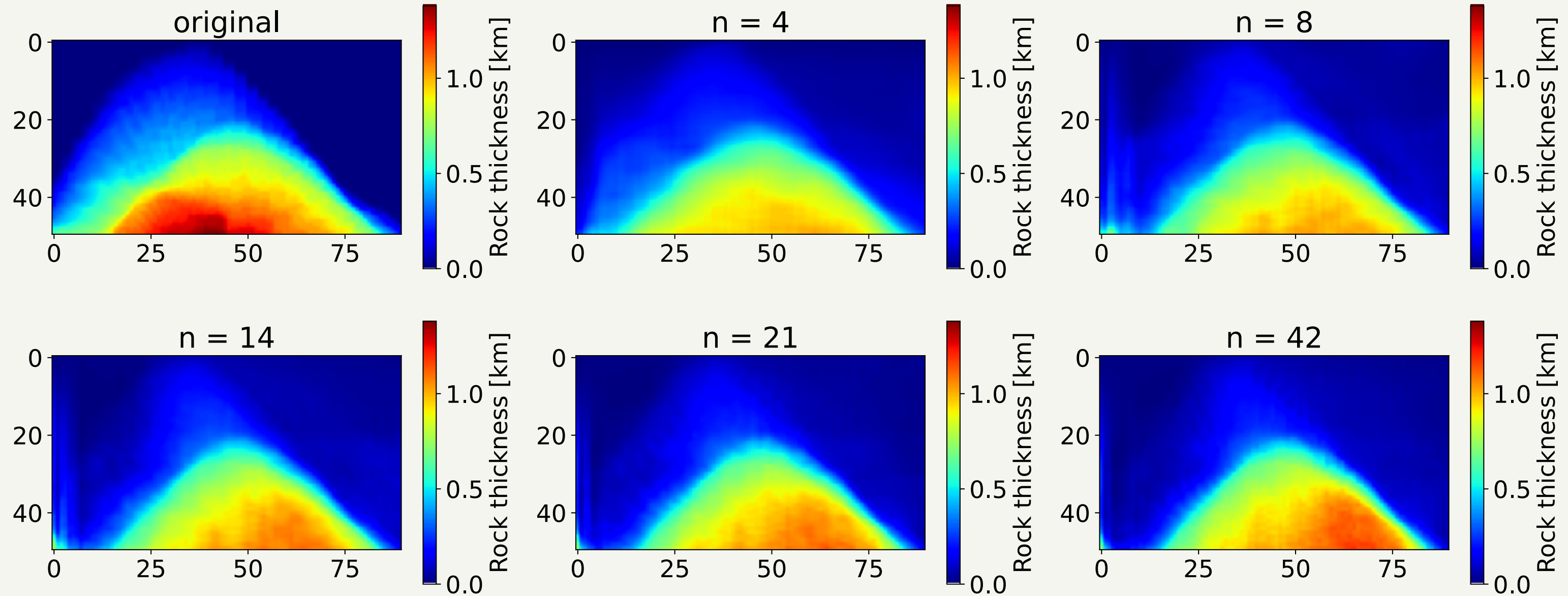
Vista lateral de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 1 iteración.

Variación de puntos e iteraciones



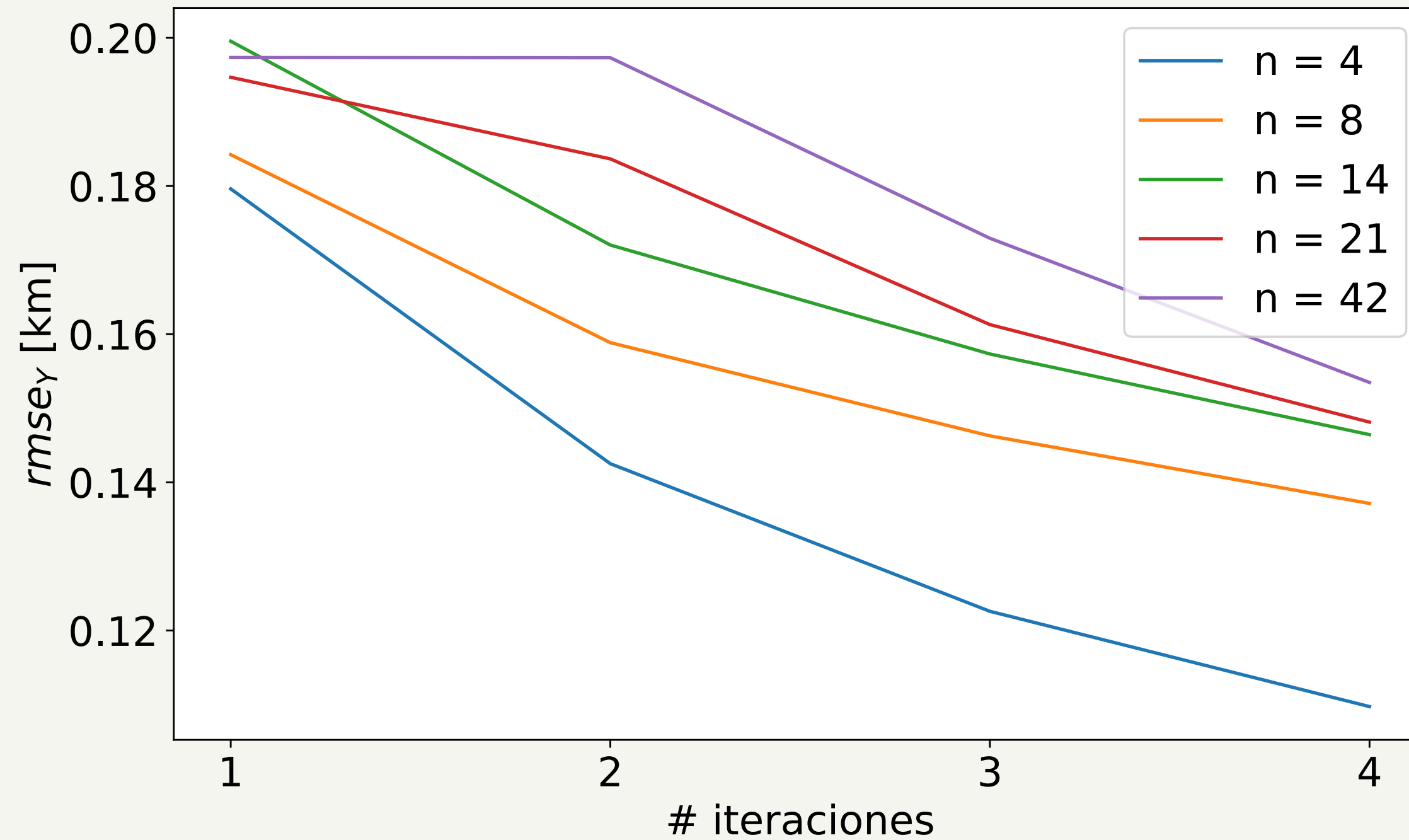
Vista lateral de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 2 iteraciones.

Variación de puntos e iteraciones



Vista lateral de reconstrucciones con diferente número de puntos de observación y 3 iteraciones.

Errores vista lateral

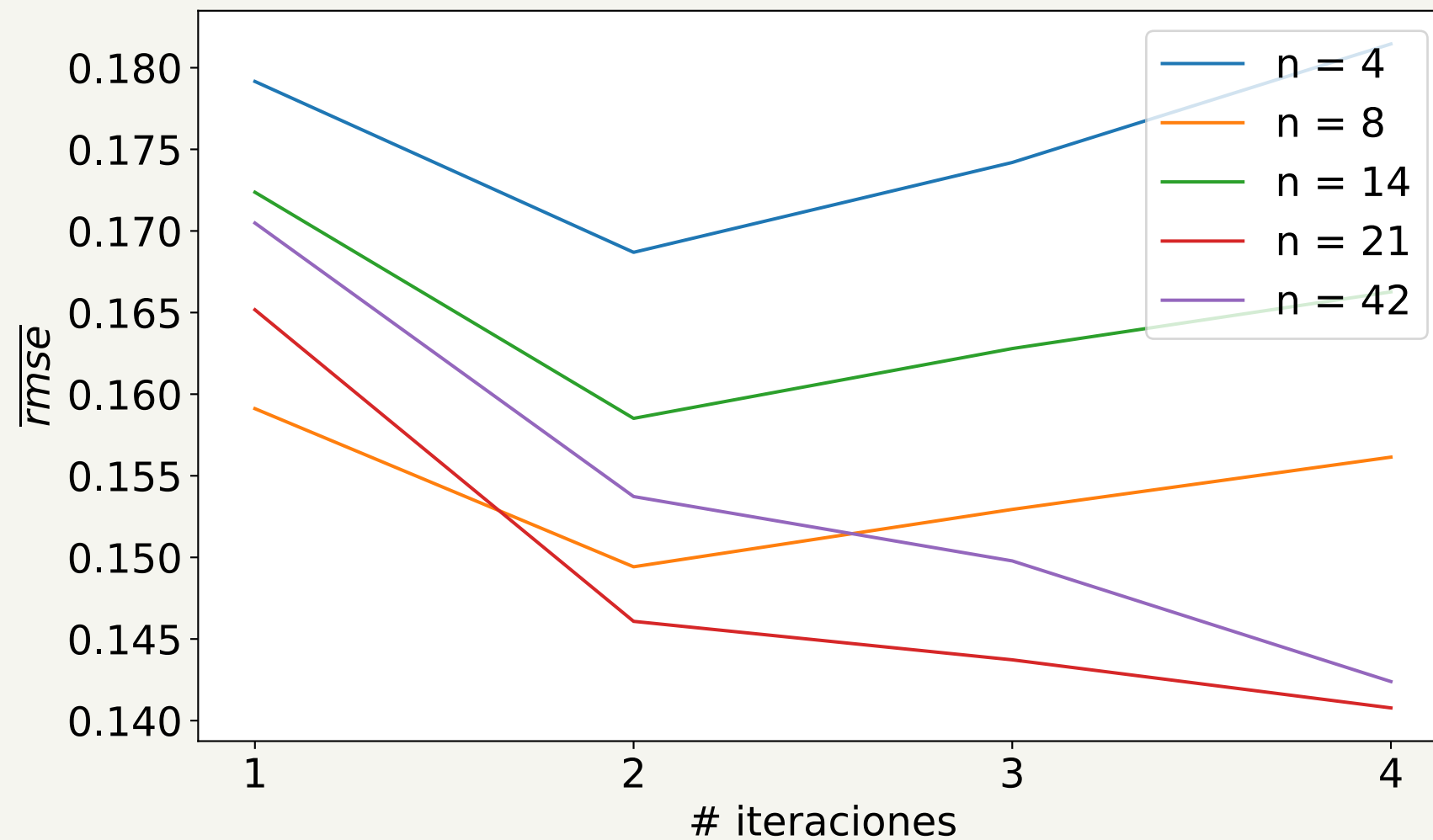


Errores de reconstrucción (vista lateral) en cada iteración variando el número de puntos de observación.

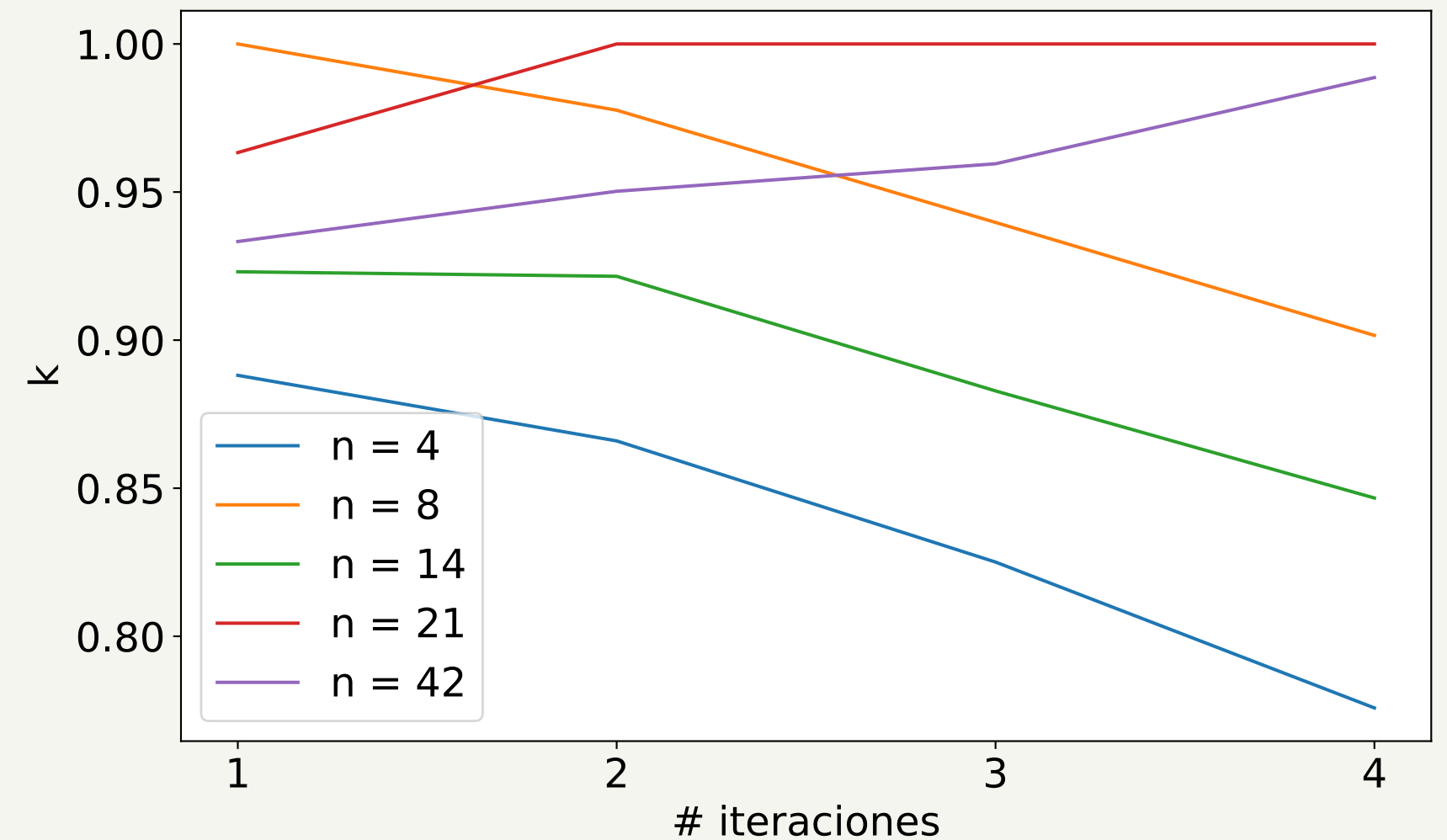
Errores de las tres vistas juntas

$$\overline{\text{rmse}} = \frac{\text{rmse}_Z + \text{rmse}_X + \text{rmse}_Y}{3}$$

$$k = \frac{\min\{\overline{\text{rmse}}\}}{\overline{\text{rmse}}}$$



Promedio del error de vista superior, frontal y lateral en cada iteración para diferente número de puntos de observación.



Coefficiente de error en cada iteración para diferente número de puntos de observación.

Conclusiones

- Se logró obtener una reconstrucción de los dos domos del volcán Cerro Machín.
- El mayor número de puntos de observación (42) presenta un error mayor que 21 puntos, lo cual puede deberse a una agrupación de puntos que resulta en un exceso de magnitud.
- Se obtuvo un error menor con 8 puntos mejor distribuidos que con 14.
- El aumento en iteraciones favorece a las reconstrucciones con menor número de puntos, mientras que aumenta el error en las de mayor número de puntos.



Jorge Jaimes

yo

Luis Núñez

Jesús Peña





yo sin tiempo para
escribir el libro



yo haciendo gráficas



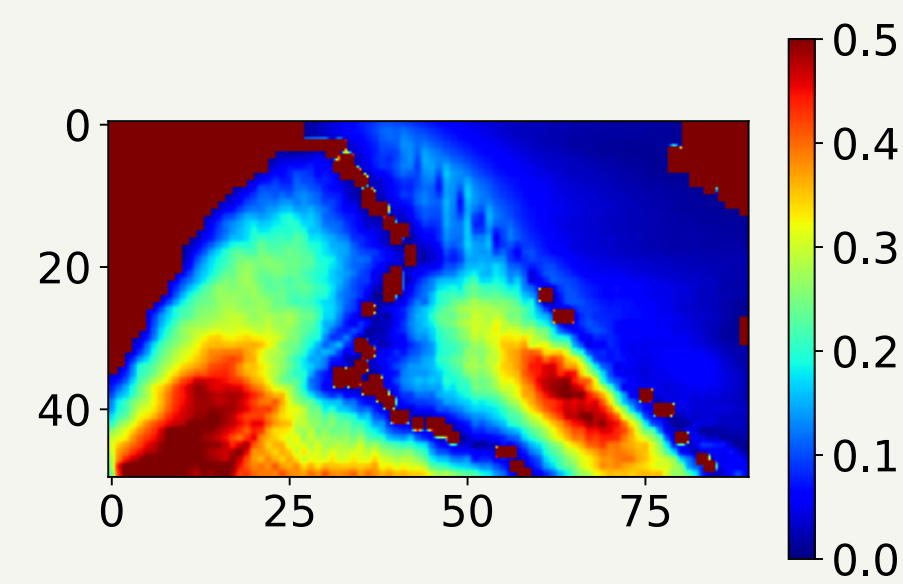
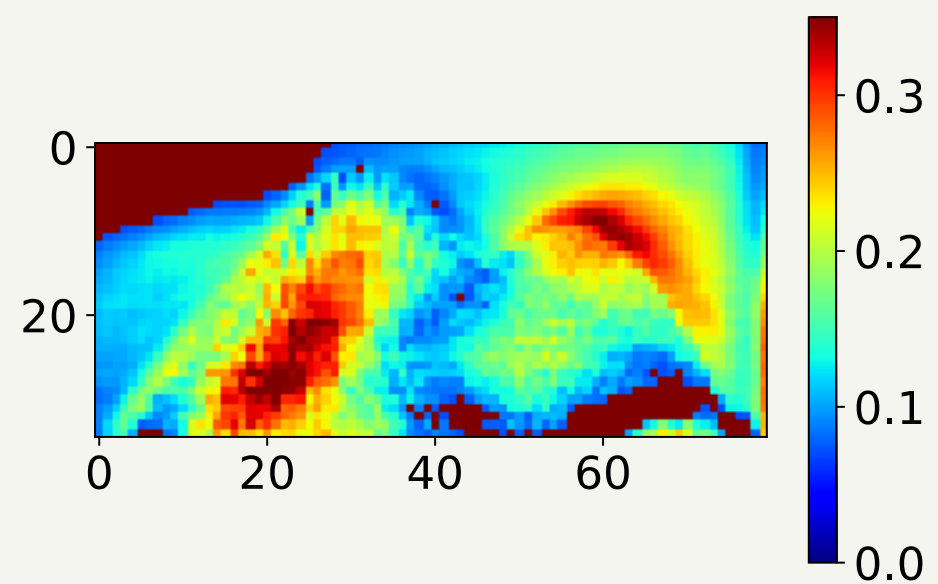
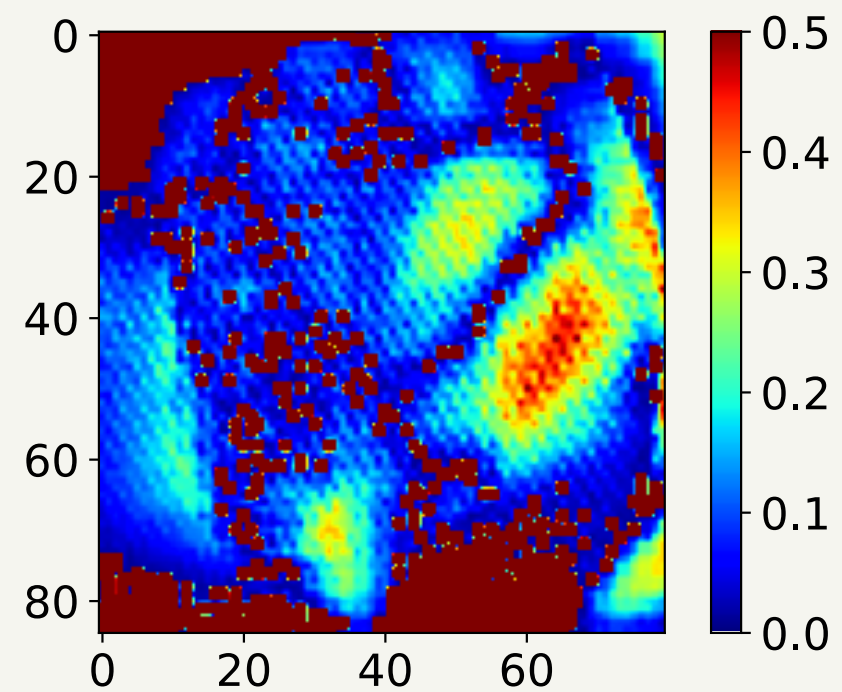
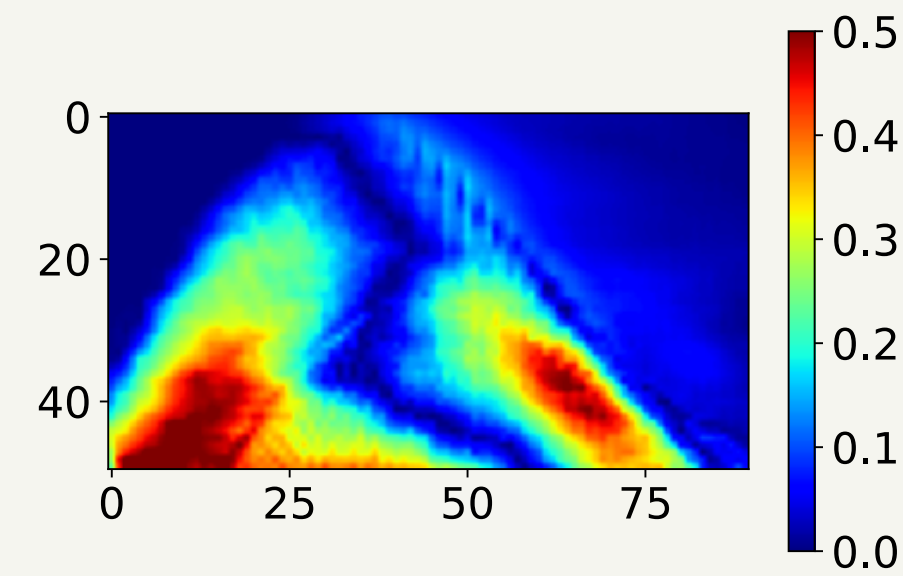
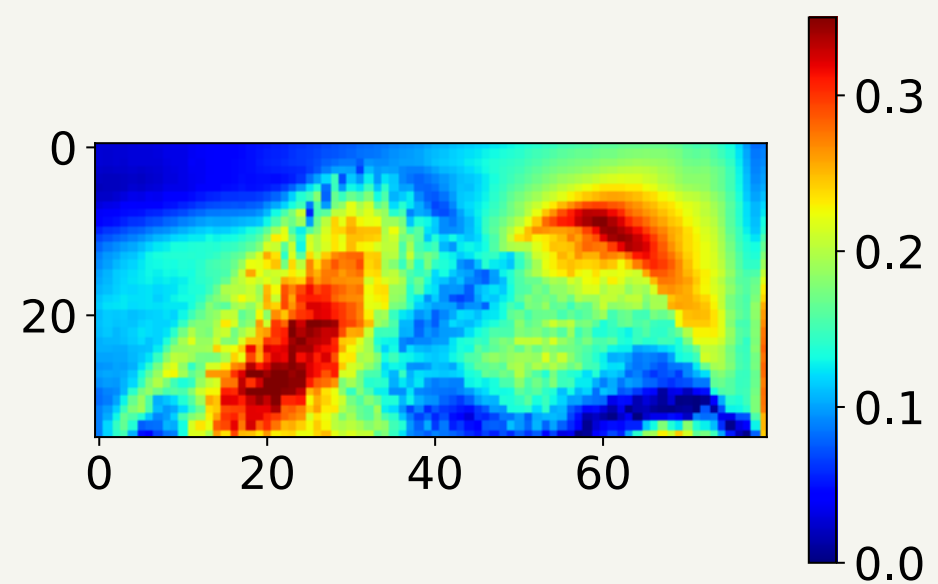
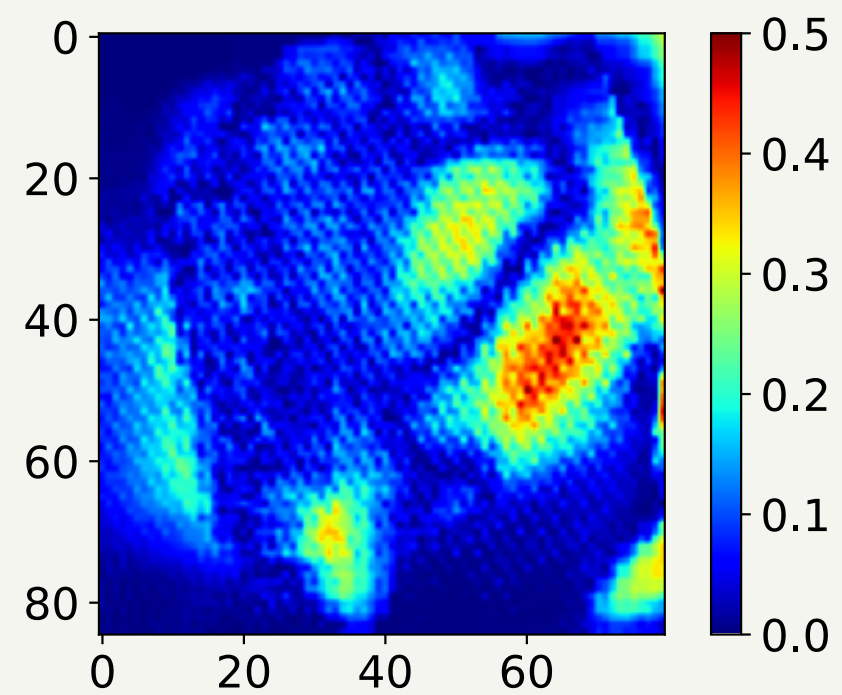
salario
digno

desarrollo
web

yo queriendo ser
investigador

Anexos

Eliminación zonas vacías



Eliminación valores menores a 0.01

Eliminación valores menores a 0.07

Eliminación valores menores a 0.01