



**Vittorio Casella**

Laboratorio di Geomatica - DICAR

Università di Pavia

email: [vittorio.casella@unipv.it](mailto:vittorio.casella@unipv.it)



**Il lidar: introduzione e principi di funzionamento**

**Dispense**

# Licenza

Questa presentazione è © 2011 Vittorio Casella (vittorio.casella@gmail.com) disponibile nella modalità **creative commons** ([www.creativecommons.org](http://www.creativecommons.org))

Se usi figure o parti della presentazione all'interno di tue presentazioni, articoli o altri scritti, devi sempre citarne l'origine.



Attribuzione - Non commerciale - Condividi allo stesso modo 2.5 Italia

#### Tu sei libero:



di riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare quest'opera



di modificare quest'opera

#### Alle seguenti condizioni:



**Attribuzione** — Devi attribuire la paternità dell'opera nei modi indicati dall'autore o da chi ti ha dato l'opera in licenza e in modo tale da non suggerire che essi avallino te o il modo in cui tu usi l'opera.



**Non commerciale** — Non puoi usare quest'opera per fini commerciali.



**Condividi allo stesso modo** — Se alteri o trasformi quest'opera, o se la usi per crearne un'altra, puoi distribuire l'opera risultante solo con una licenza identica o equivalente a questa.

# Terminologia

---

**Laser scanning:** scansione laser; laser scanner

**LASER:** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Emissione di radiazione EM monocromatica e di elevata intensità

**LIDAR:** Light Detection And Ranging

**LADAR:** LAser Detection And Ranging

**RADAR:** Radio Detecting And Ranging

**Laser radar**

**ALS:** Airborne Laser Scanning

**LRF:** Laser Range Finder, distanziometro; talvolta usato come sinonimo di laser scanning

**ALSS:** Airborne Laser Scanning System

**ALTM:** Airborne Laser Terrain Mapper

## Terminologia - 2

---

**GPS:** Global Positioning System

**IMU:** Inertial Measuring Unit

**INS:** Inertial navigation System; a volte usato come sinonimo di IMU; altre volte IMU indica i sensori, mentre INS il sistema completo, costituito da sensori (IMU), elettronica di controllo, software, ecc

Lidar, ladar e laser scanning sono generalmente usati come sinonimi

Si può fare lidar da terra (lidar terrestre, *terrestrial lidar*), da aereo (lidar aereo, *airborne lidar*), da satellite, cioè dallo spazio (*airborne lidar*).

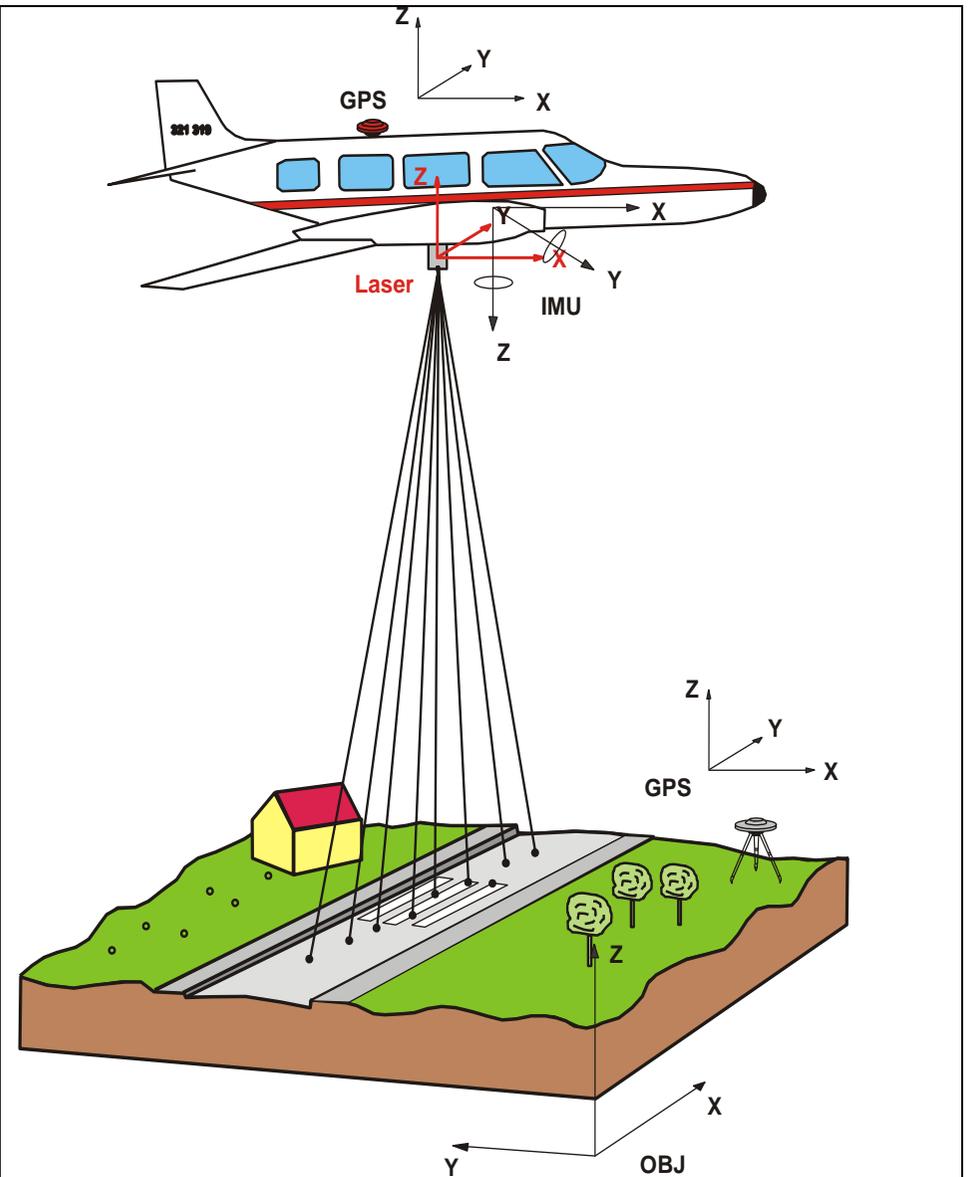
# Schema dello strumento

Sull'aereo (o elicottero)

- Scanner laser
- GPS
- IMU
- Telecamera
- Camera digitale
- Apparatati di servizio

A terra

- GPS master, per cinematico

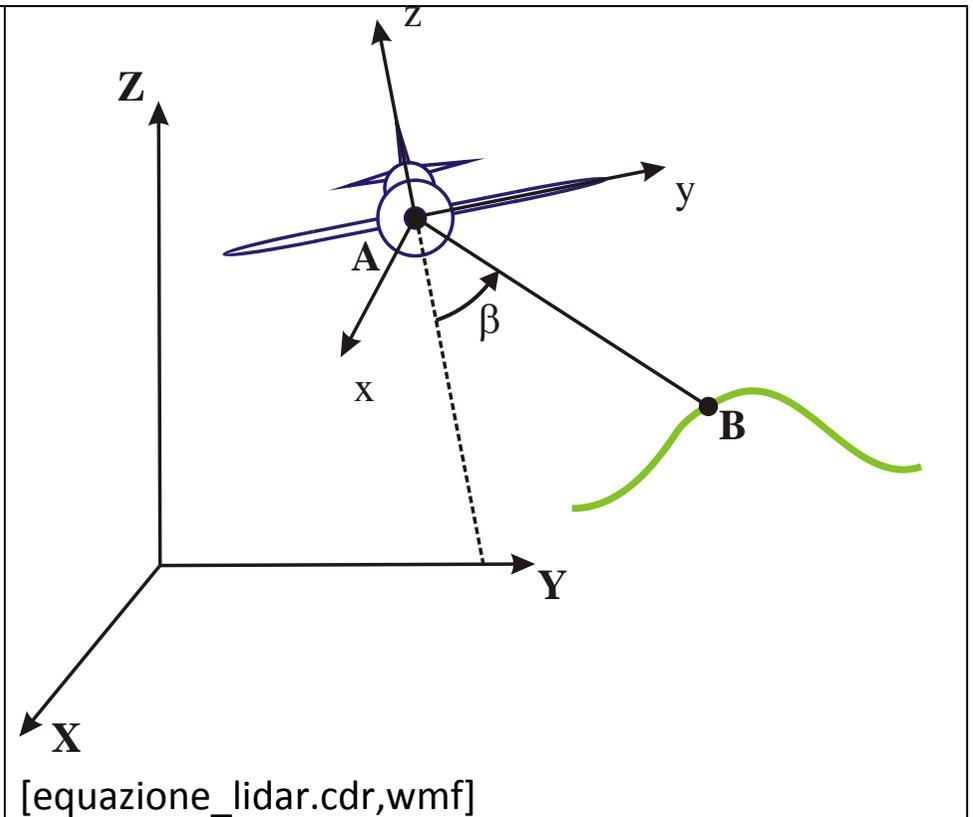


[schema\_laser\_scanning.cdr; wmf]

## La scansione

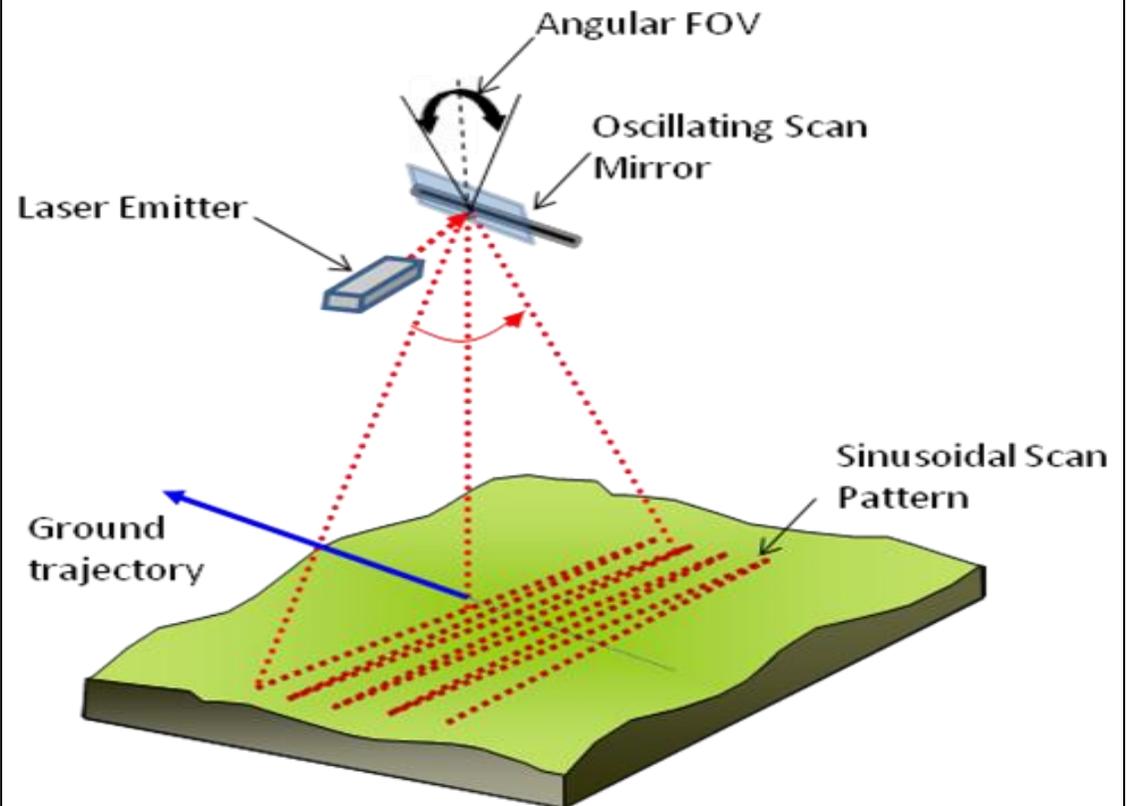
Mentre l'aereo vola in modo rettilineo, lo scanner laser invia verso terra impulsi assimilabili a rette) che si riflettono sul terreno e si propagano all'indietro in tutte le direzioni; una parte della radiazione riflessa raggiunge il telemetro che la individua e misura il tempo di volo.

La scansione avviene nel piano passante per il centro del telemetro A e ortogonale alla direzione di volo.



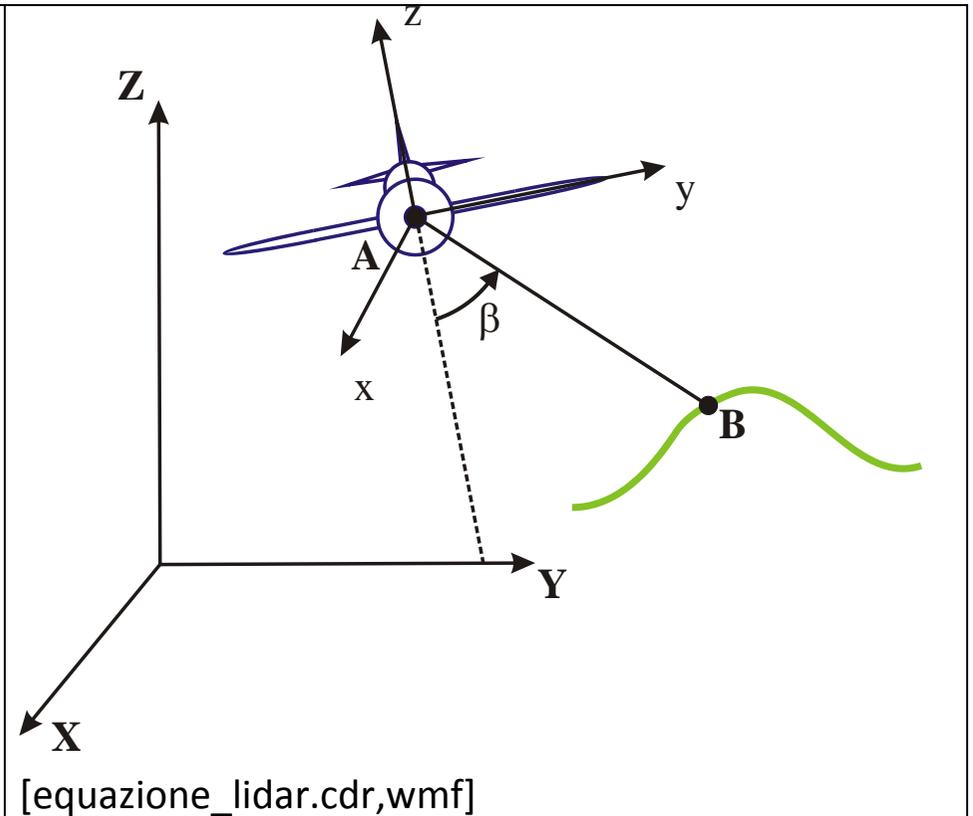
## Come avviene la scansione

Generalmente il raggio laser viene emesso in una direzione e deflesso da uno specchio oscillante.



## L'angolo di scansione

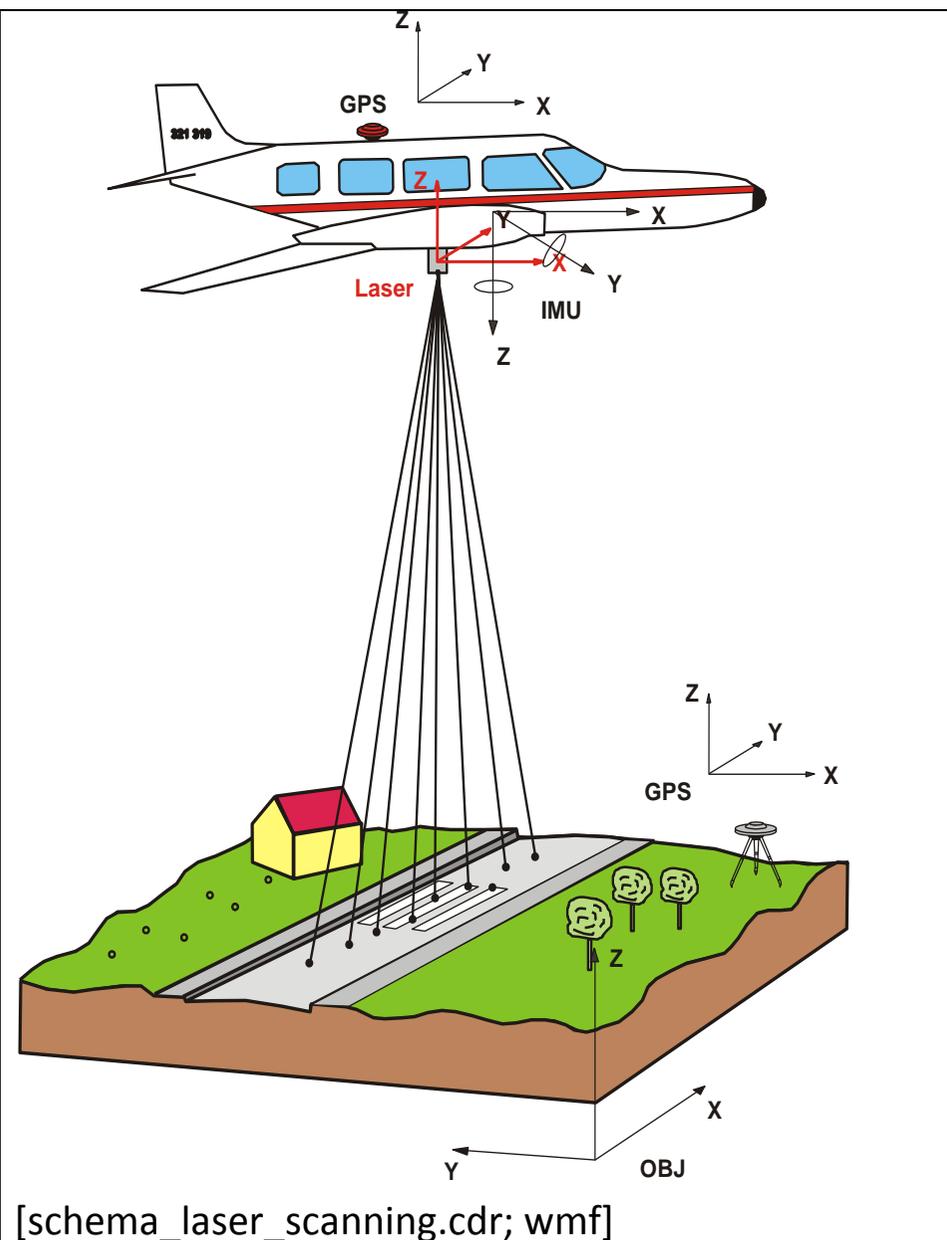
La meccanica e l'elettronica dello strumento conoscono, per ogni impulso emesso, l'angolo  $\beta$  che la retta di propagazione dell'impulso forma con la retta passante per A e ortogonale al piano definito dalle ali dell'aereo, mentre questo si muove.



## Il SR del telemetro (body)

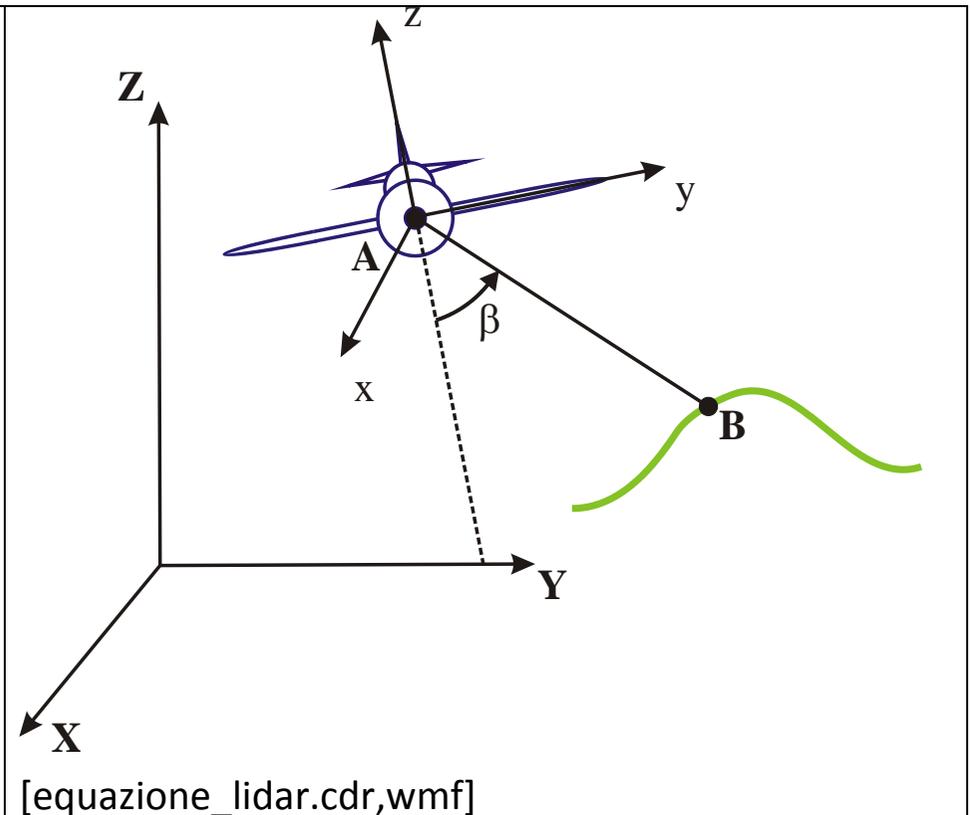
In realtà il telemetro con la sua fisicità e i suoi apparati (la direzione in cui oscilla lo specchio, ad esempio) materializza un SR. Esempio strano ma non troppo: la squadratura di un foglio materializza un SR: quello rosso nel disegno.

La scansione avviene nel piano (Y,Z). L'angolo  $\beta$  è misurato rispetto al semiasse negativo Z.



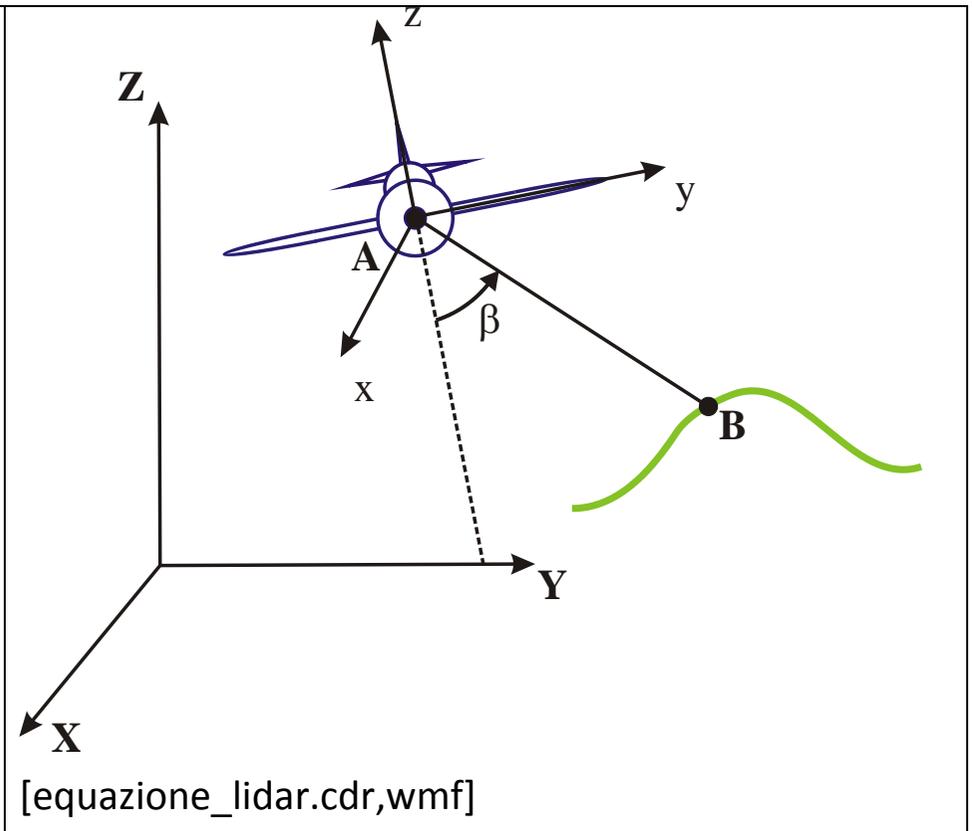
## Posizione o orientamento del SR body

I sistemi GPS/IMU montati sull'aereo consentono di conoscere in ogni istante la posizione dell'origine del SR body (il punto A) e il suo orientamento rispetto al SR oggetto (OBJ)



## Distanza fra i punti A e B

La misura del tempo di volo (di andata e ritorno) consente al telemetro di determinare la distanza fra i punti A e B

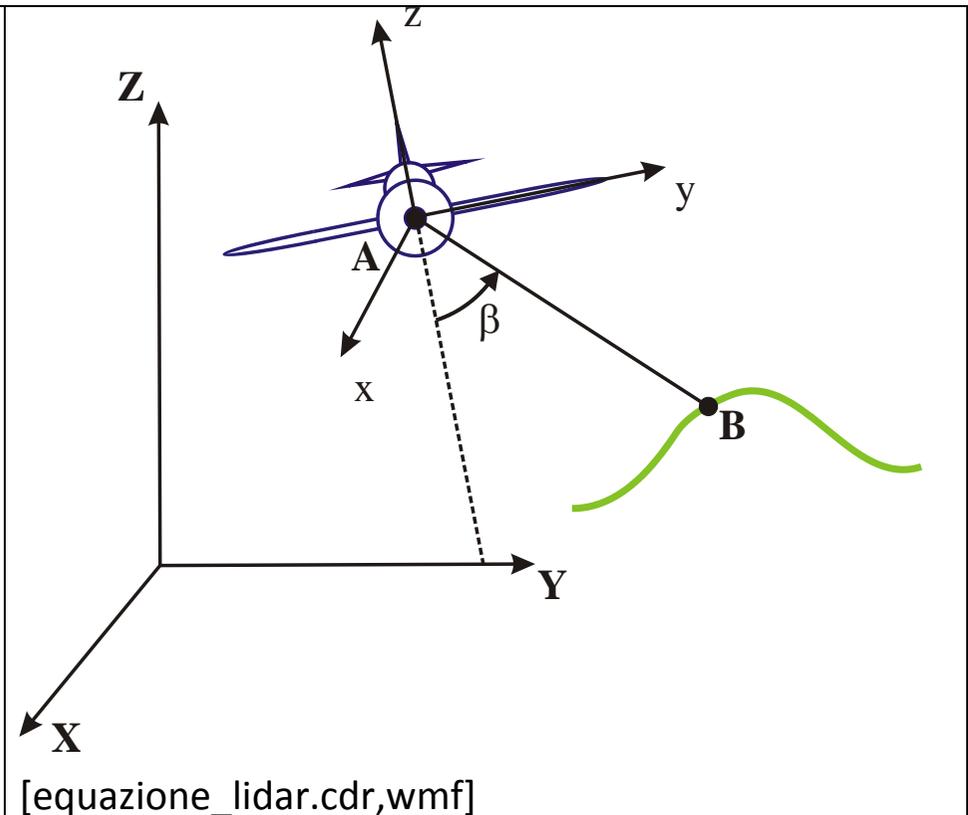


## Sintesi

Istante per istante, si conosce la rototraslazione fra i SR BODY e OBJ.

Per ogni impulso si conosce l'equazione della retta, rispetto a BODY; si conosce la distanza fra i punti A e B, appartenenti alla retta.

Si possono determinare le coordinate del punto B.



## Che cosa produce il lidar

---

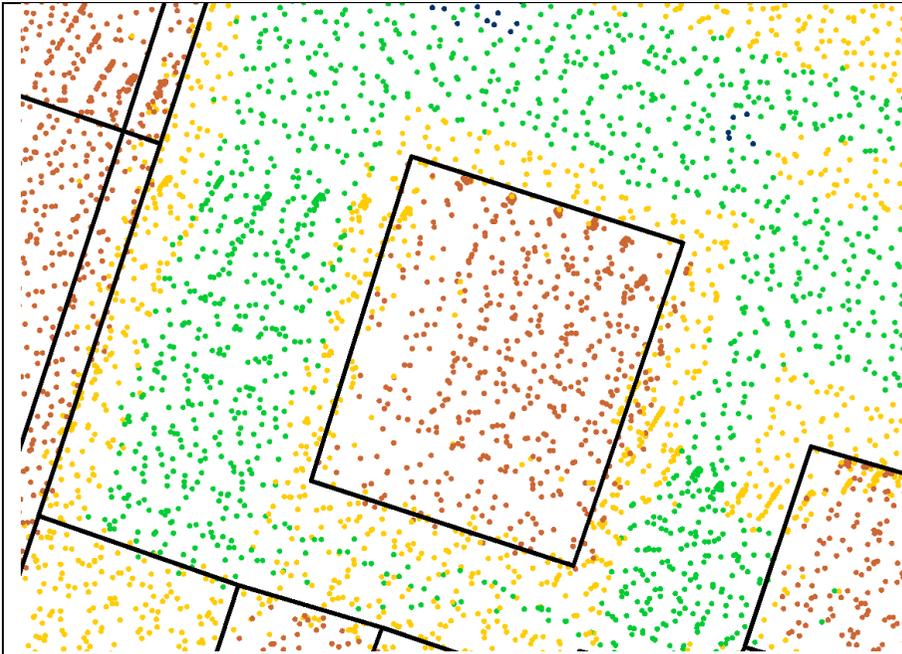
Coordinate tridimensionali di un seminato di punti: densità anche di alcuni punti per mq

Echi multipli

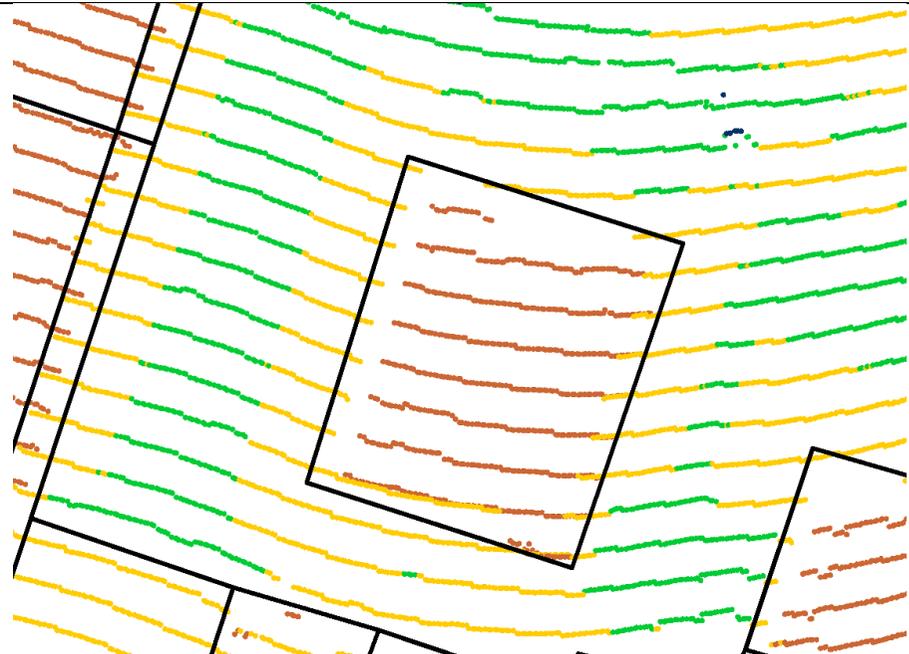
Misura intensità: immagine all'infrarosso del territorio

La produzione avviene in modo pressoché automatico.

## Esempi di punti lidar - 1



Strumento Optech ALTM 1210



Strumento Toposys I

Strumenti diversi generano distribuzioni diverse.

## Esempi di punti lidar - 2

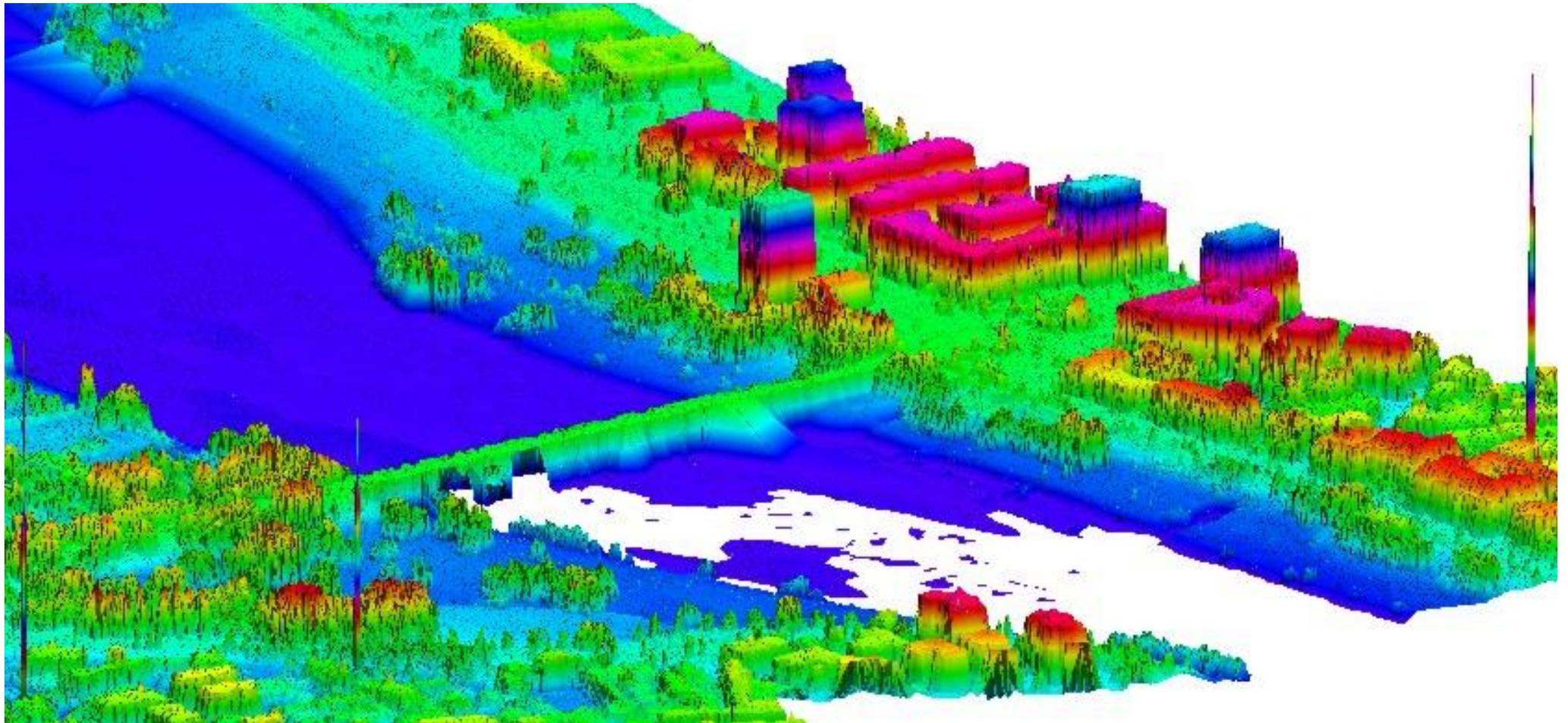
---

DSM di Città Giardino: vista a punti sparsi [Toposis 4.jpg]. Sono punti 3D



## Esempi di punti lidar - 3

---



## Aspetti che qualificano le misure lidar

---

Organizzazione del volo

La divergenza del raggio

Sensore attivo: lavora anche di notte e con nubi soprastanti

Sensore monoscopico: sfrutta piccoli varchi per raggiungere il terreno; non buca la vegetazione

Gli echi multipli

Forma disegnata al suolo

## L'equazione del lidar

---

Le relazioni matematiche che consentono di ricavare dalle quantità misurate le coordinate oggetto dei punti colpiti.

# Le coordinate sferiche

$$x = d \cos(\theta) \sin(\varphi)$$

$$y = d \sin(\theta) \sin(\varphi)$$

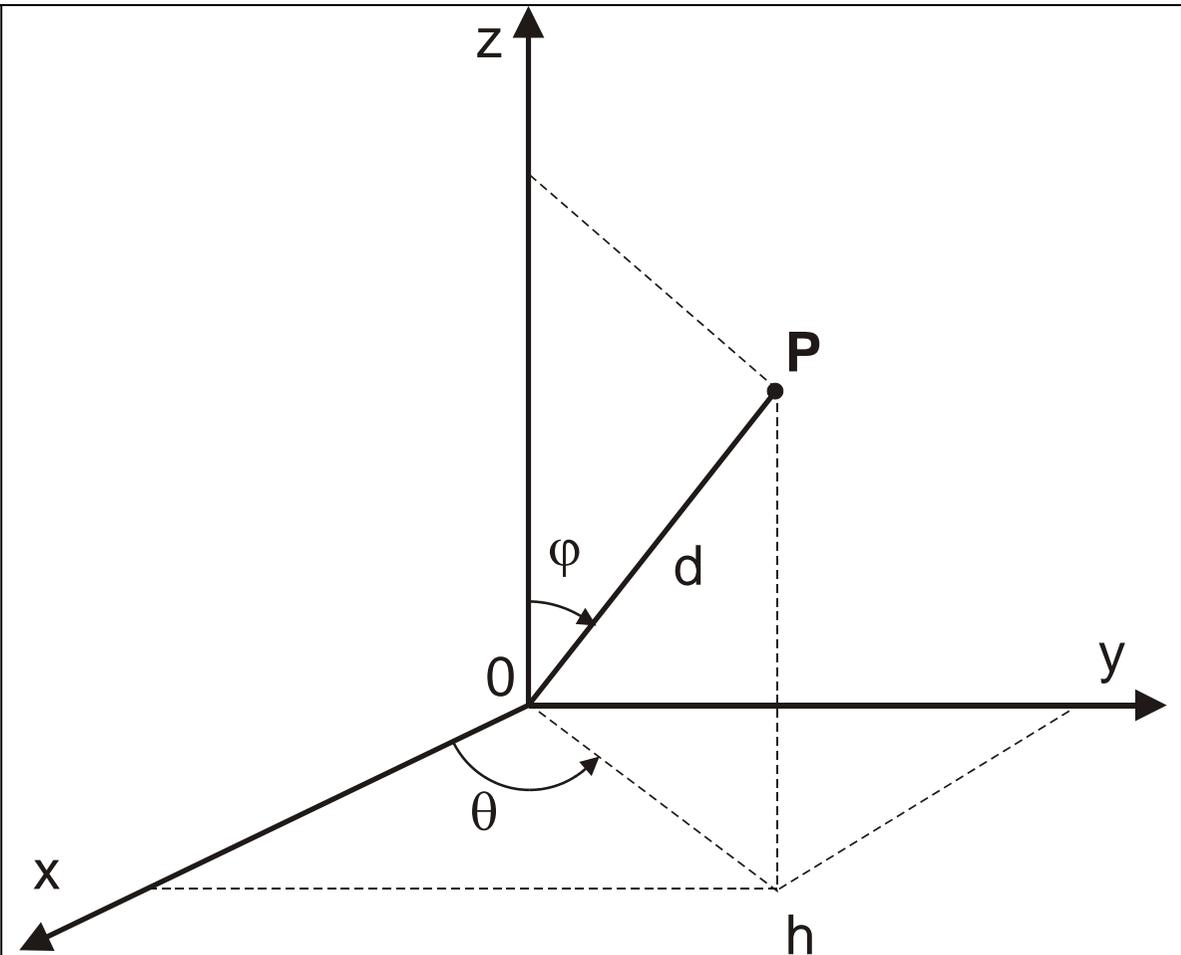
$$z = d \cos(\varphi)$$

$$\theta \in [-180, 180]$$

$$\varphi \in [0, 180]$$

Asse X - muso

Asse Y - ala



[definizione\_coord\_sferiche\_polari.cdr,wmf]

## Le coordinate polari di B rispetto a SR BODY

Quando  $\beta$  è positivo

$$\theta = 90$$

$$\varphi = 180 - \beta$$

$d$

Quando  $\beta$  è negativo

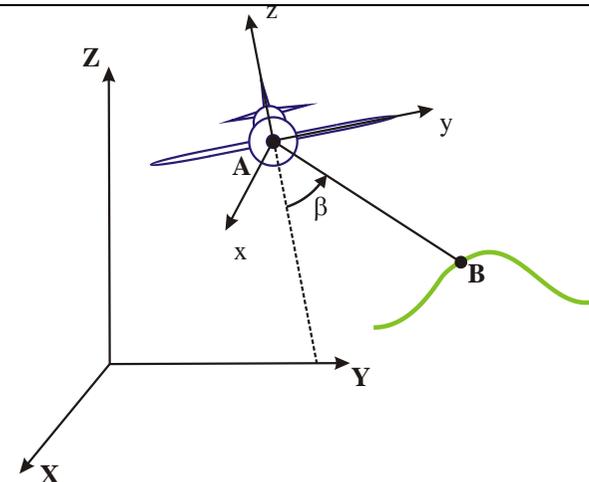
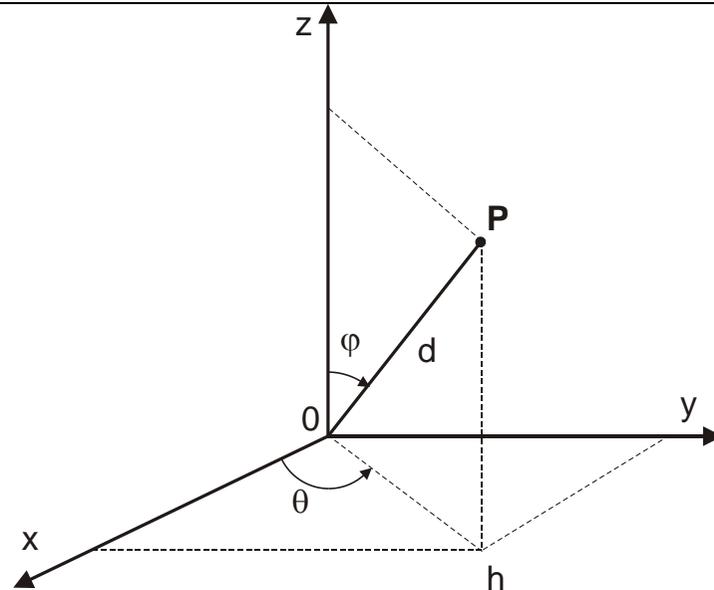
$$\theta = -90$$

$$\varphi = 180 + \beta$$

$d$

$d$  è misurato dal telemetro

$\beta$  è noto al sistema (legata all'angolo di rotazione dello specchio)



## Le coordinate cartesiane di B rispetto a SR BODY

---

Quando  $\beta$  è positivo

$$\begin{cases} \theta = 90 \\ \varphi = 180 - \beta \\ d \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ y = d \sin(180 - \beta) \\ z = d \cos(180 - \beta) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ y = d \sin(\beta) \\ z = -d \cos(\beta) \end{cases}$$

Quando  $\beta$  è negativo

$$\begin{cases} \theta = -90 \\ \varphi = 180 + \beta \\ d \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ y = -d \sin(180 + \beta) \\ z = d \cos(180 + \beta) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} x = 0 \\ y = d \sin(\beta) \\ z = -d \cos(\beta) \end{cases}$$

In conclusione

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = d \sin(\beta) \\ z = -d \cos(\beta) \end{cases}$$

## Le coordinate cartesiane di B rispetto a SR OBJ

---

Evidentemente si ha, per quanto riguarda la trasformazione di coordinate,

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_A + R_{xyz}(\omega, \varphi, \kappa) \mathbf{x}_B$$

Facendo sistema si ha

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_A + R_{xyz}(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} 0 \\ d \sin(\beta) \\ -d \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

dove

$\mathbf{X}_A$  (coordinate OBJ del centro del telemetro) è misurato ad ogni istante dal sistema GPS/INS

$(\omega, \varphi, \kappa)$  (angoli di orientamento del SR BODY rispetto a OBJ) è misurato ad ogni istante dal sistema GPS/INS

$d$  è misurato per ogni impulso dal telemetro

$\beta$  è determinato per ogni impulso dalla meccanica ed elettronica del sistema

# Equazione del lidar

---

Equazione in condizioni ideali

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_A + R_{xyz}(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} 0 \\ d \sin(\beta) \\ -d \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

## Perché in condizioni ideali

---

Perché tutti gli strumenti che operano sull'aereo materializzano un diverso SR. esistono dunque i SR OBJ, BODY, IMU, GPS. Si tratta di SR rototraslati nello spazio.

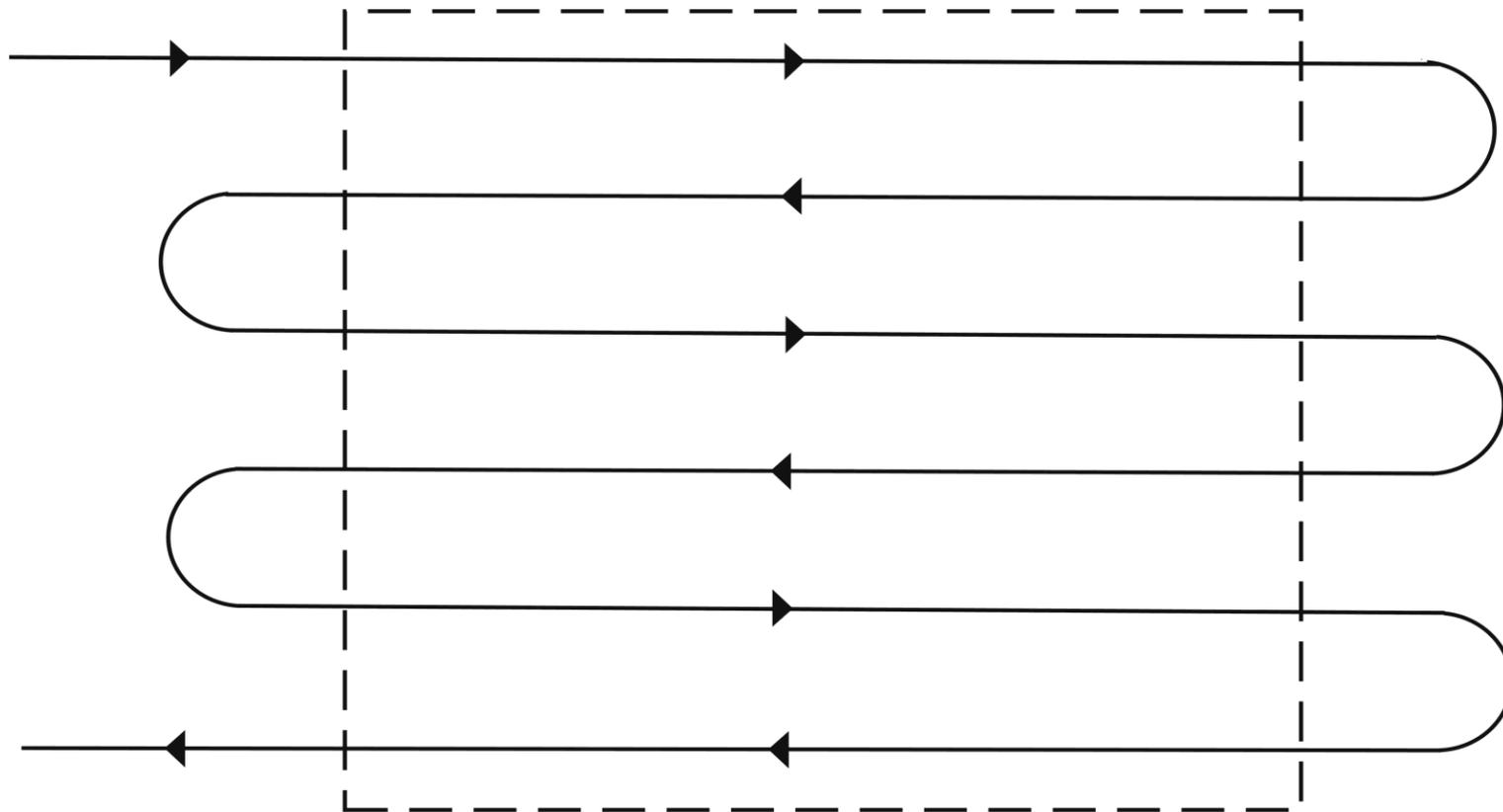
La relazione completa che lega le coordinate polari di B con le sue OBJ richiede dunque la presenza di diversi altri termini additivi e matrici di rotazione. Ma non cambia la sostanza.

Esiste una fase iniziale, detta calibrazione, in cui ad esempio si determinano i parametri di trasformazione fra il SR BODY e INS.

Le equazioni presentate qui corrispondono al caso ideale in cui i SR coincidono.

# Organizzazione del volo

---



Strisciate e blocchi

Ricoprimento trasversale

## La divergenza del raggio

---

Il segnale laser, propagandosi, diverge, formando un cono.

Essendo il segnale laser quasi monocromatico, la sua divergenza è bassa, ma non trascurabile: varia fra 0.3 e 4 mrad in genere.

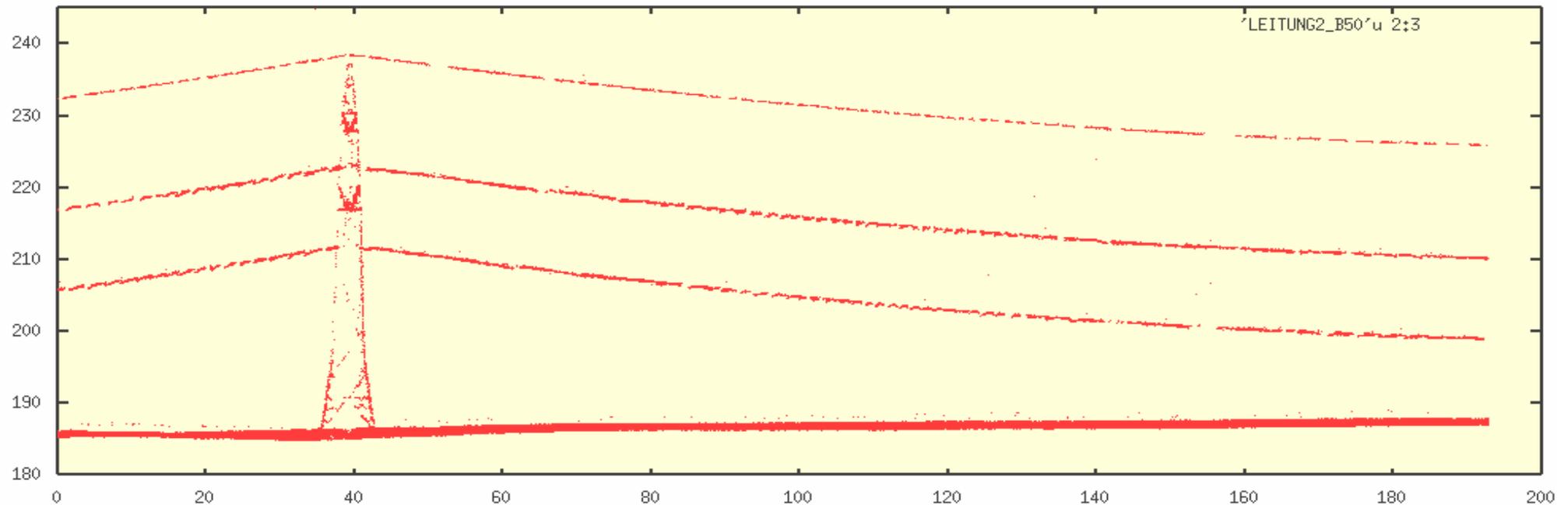
Se la divergenza è 1 mrad e  $h=1000$ , l'impronta a terra  $D$  è

$$D = 0.001 \text{ rad} \times 1000 \text{ m} = 1 \text{ m}$$

L'impronta a terra non trascurabile è la chiave per molte capacità del laser scanning:

- Individuare cavi sospesi e piccoli particolari
- Sfruttare piccoli varchi nella vegetazione per raggiungere il suolo

## Impronta a terra degli impulsi piccola ma significativa



Sezione dei raw-data prodotti da Toposys

Se i raggi fossero simili a rette, la probabilità di intersezione sarebbe pressoché nulla

## Echi multipli

---

I segnali hanno impronta finita

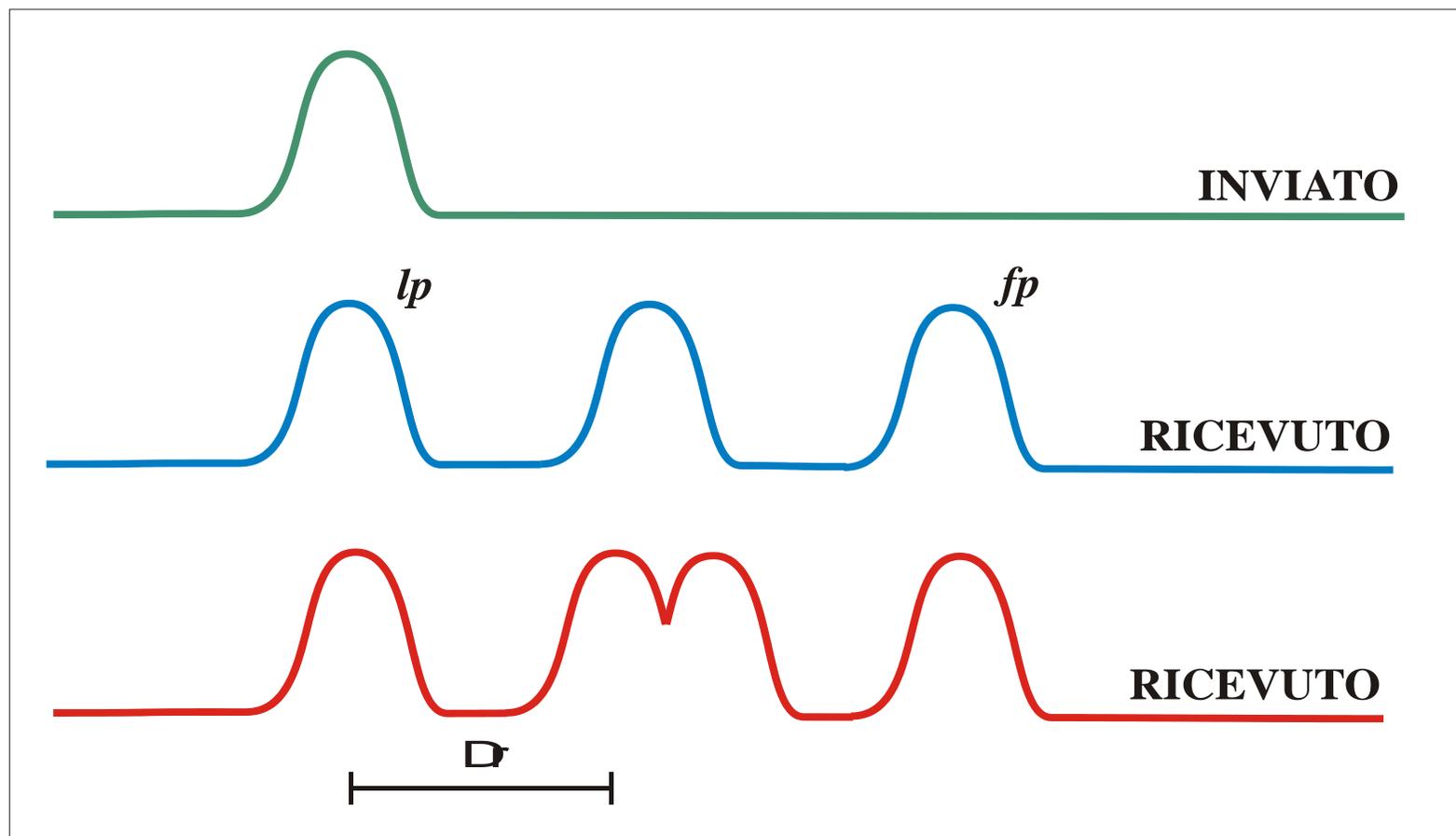
Si verificano quando un segnale incontra un ostacolo

- foglie
- fili sospesi
- cornicioni

Il raggio viene diviso in più componenti che vengono riflesse verso l'alto in tempi diversi. Diverse strategie di acquisizione

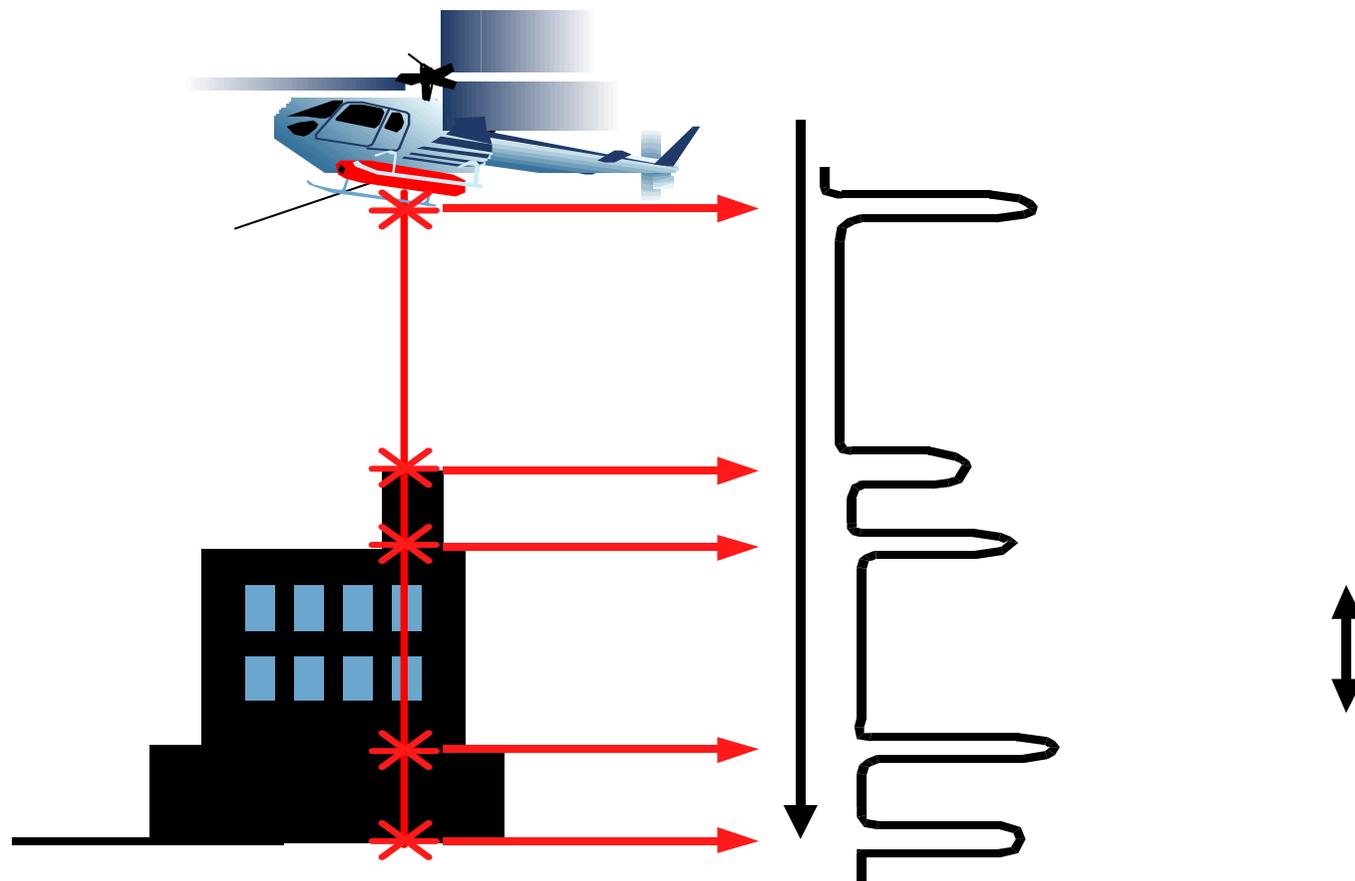
- First pulse mode (prima riflessione)
- Last pulse mode (ultima riflessione)
- First & last pulse
- Multiple pulses mode (riflessioni multiple)

## Echi multipli - 2



Esemplificazione del concetto di risoluzione in distanza

## Echi multipli - 3



## Sensore attivo

---

Emette direttamente la radiazione em con cui rileva il territorio, non sfrutta la riflessione della radiazione prodotta da altri

Può funzionare di notte

Non è disturbato dalle ombre

Non è disturbato dalle nuvole soprastanti

E' disturbato dalle nuvole sottostanti: **non buca le nuvole**

## Buca la vegetazione?

---

**Assolutamente no.**

Tuttavia ha buone possibilità di raggiungere il terreno perché:

È una tecnica monoscopica

Ha piccoli angoli di scansione (rispetto alla fotogrammetria)

Per la larghezza finita dei segnali è quasi come se cercasse un varco in ogni punto del territorio

## Tecnica monoscopica

---

E' una tecnica monoscopica nel senso che basta che un raggio solo colpisca il terreno per misurare le coordinate

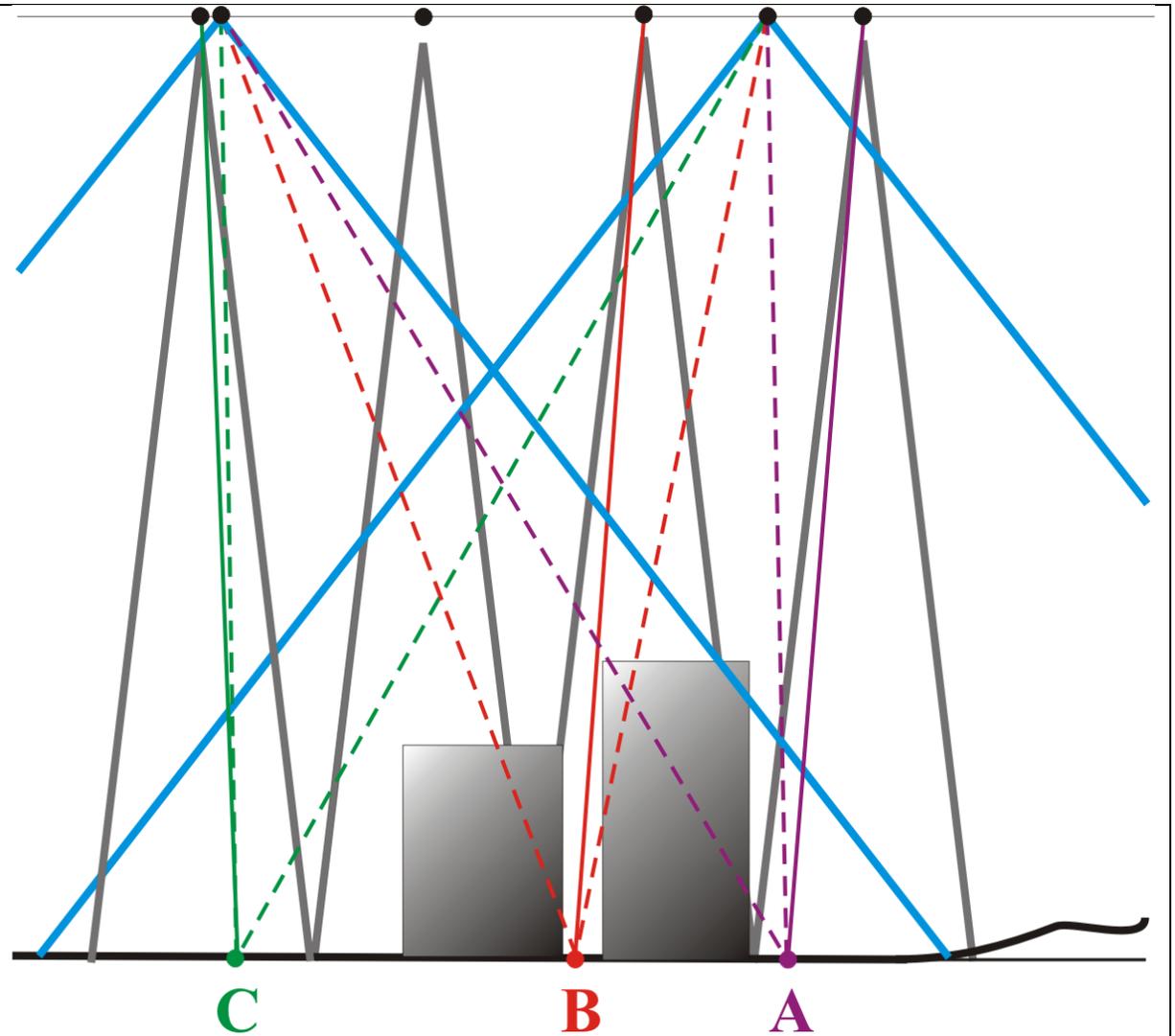
Si può anche dire che nel lidar la tridimensionalità è esplicita: le 3 coordinate dei punti sono determinate in prima istanza

La Fotogrammetria è certo una tecnica di misura 3D, ma in essa la terza dimensione è implicita: usando almeno due immagini bidimensionali, riconoscendo gli stessi punti nelle varie immagini e applicando determinati algoritmi si ottiene la terza dimensione.

## Il lidar vede il terreno più della fotogrammetria

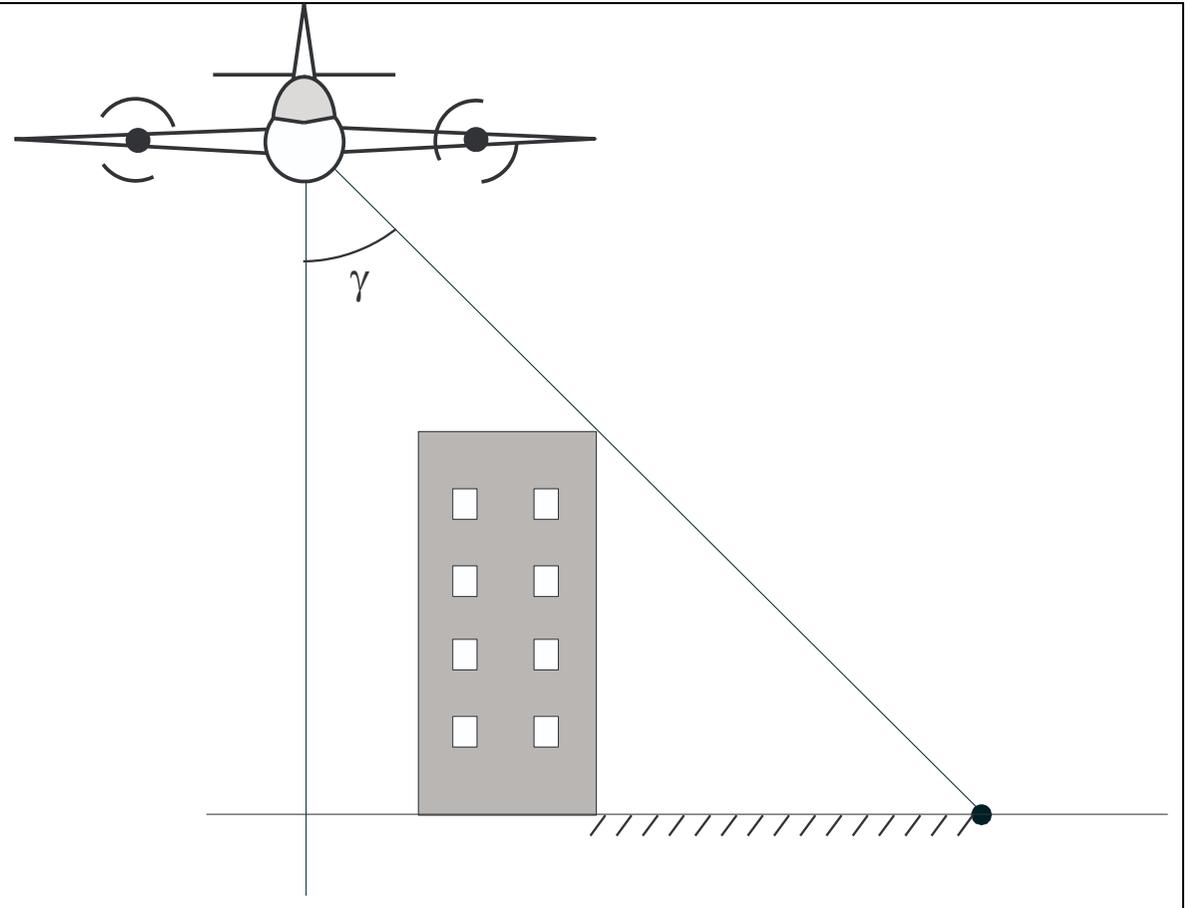
Perché è monoscopico

Perché opera in genere con angoli di apertura ridotti



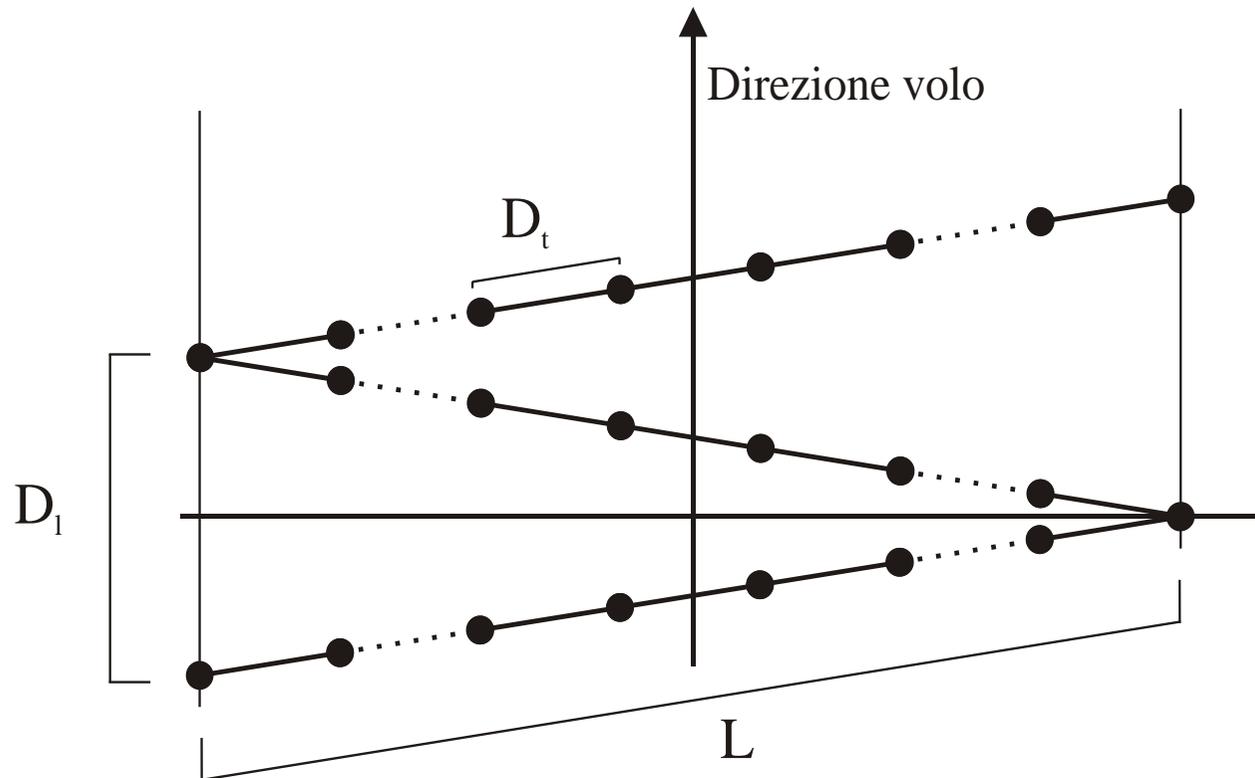
## Il lidar vede il terreno più della fotogrammetria - 2

Maggiore è l'angolo d'apertura, maggiore è l'ostruzione prospettica generata da un certo oggetto



## La forma disegnata al suolo

Lo strumento a specchio oscillante disegna sul terreno la tipica forma a zig zag. Evidentemente la densità dei punti non è del tutto omogenea.



# Argine del Ticino - 1

---

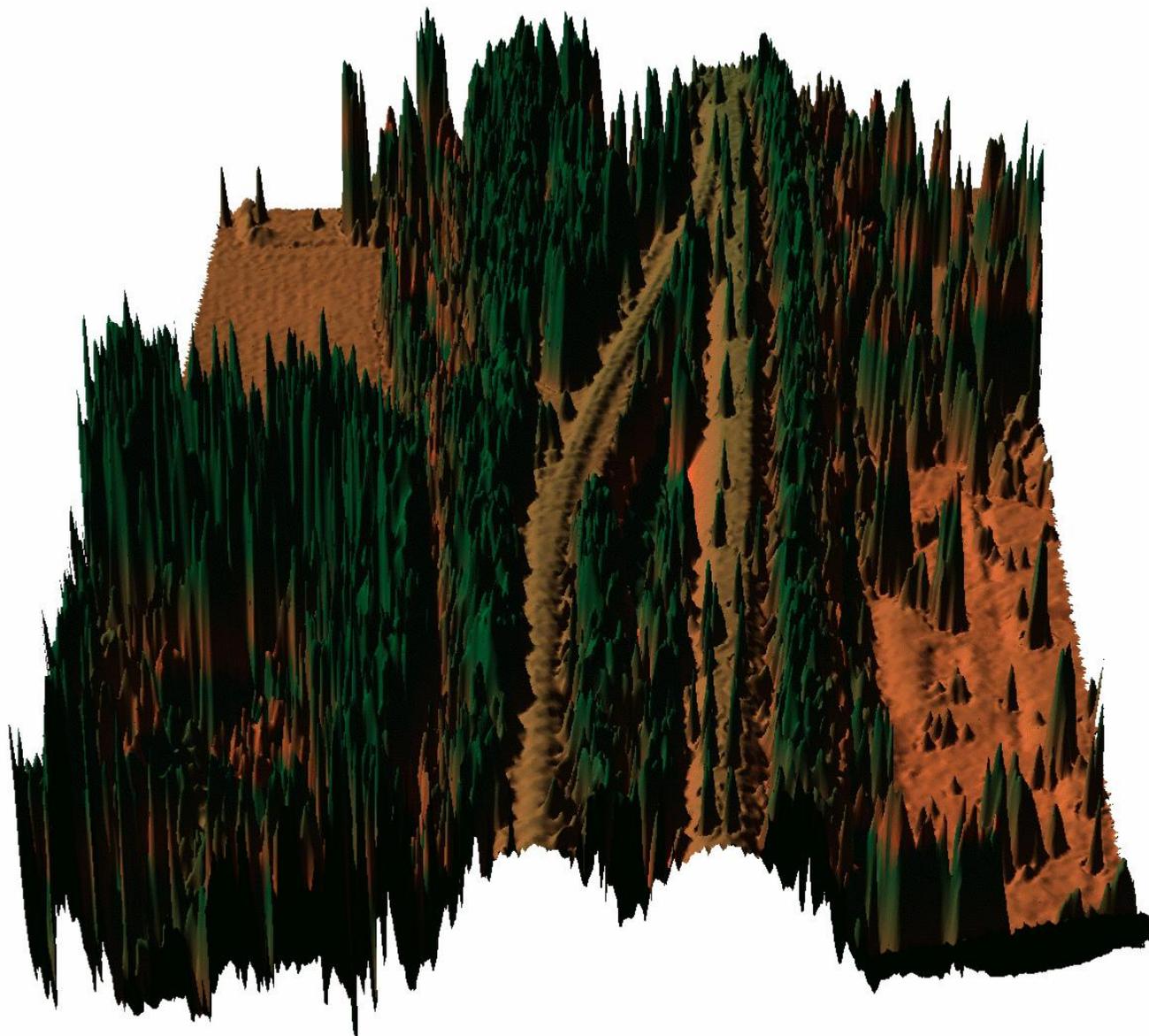
Dove si trova (estratto Google)

Fotografia aerea: è visibile una densa vegetazione sui fianchi del rilevato



## Argine del Ticino - 2

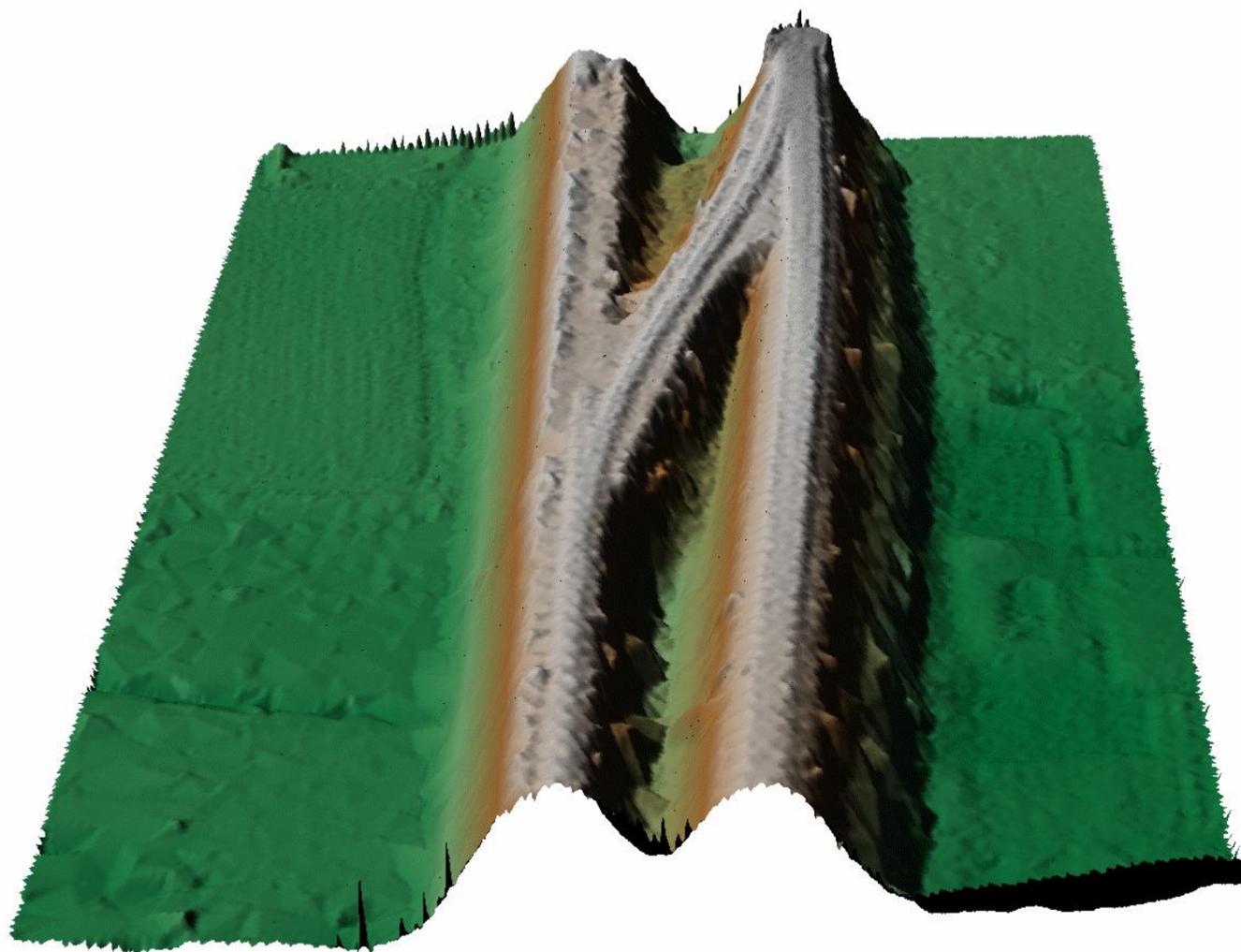
Il DSM lidar



## Argine del Ticino - 3

---

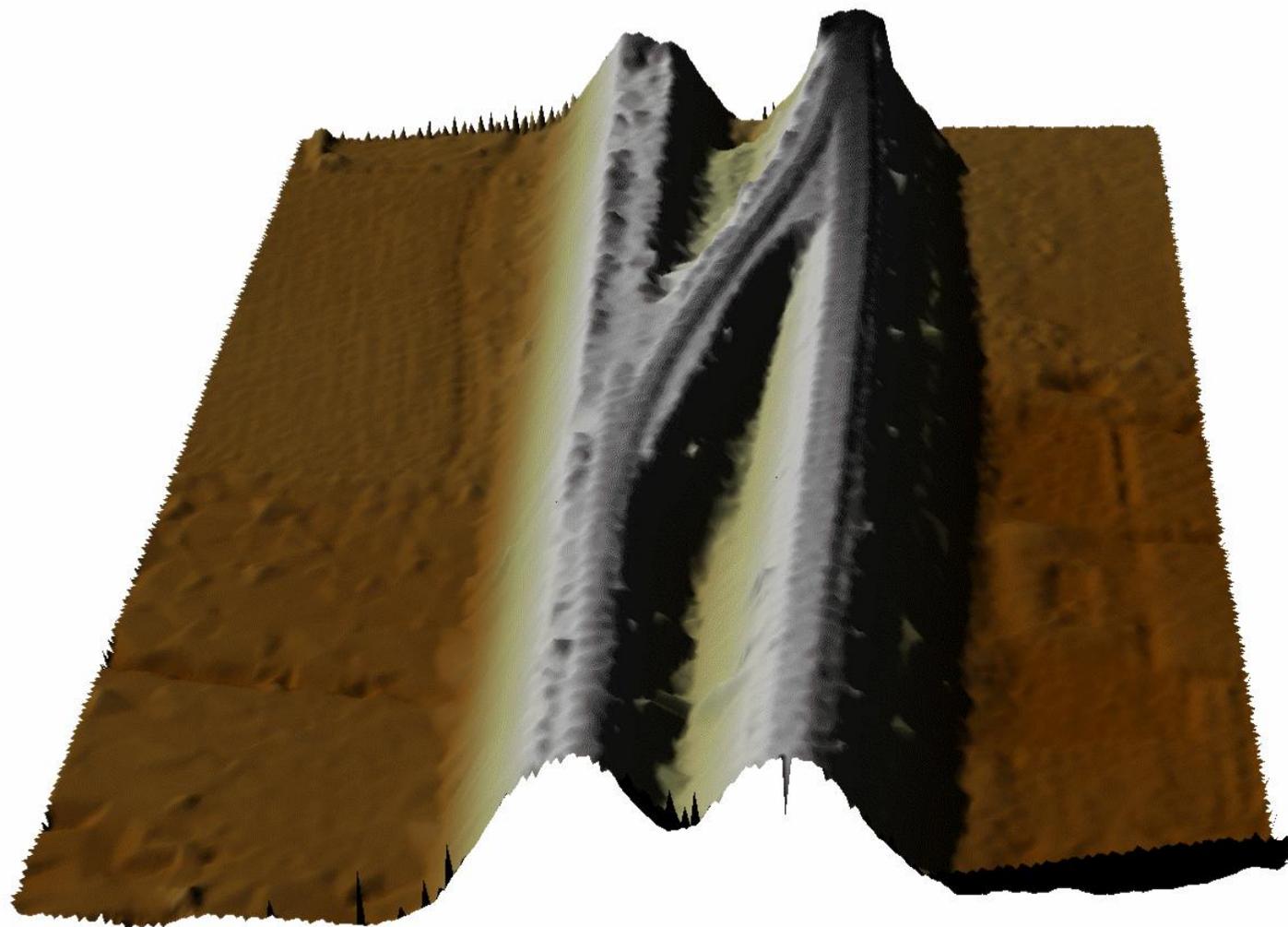
Il DTM lidar



## Argine del Ticino - 4

---

Il DTM lidar

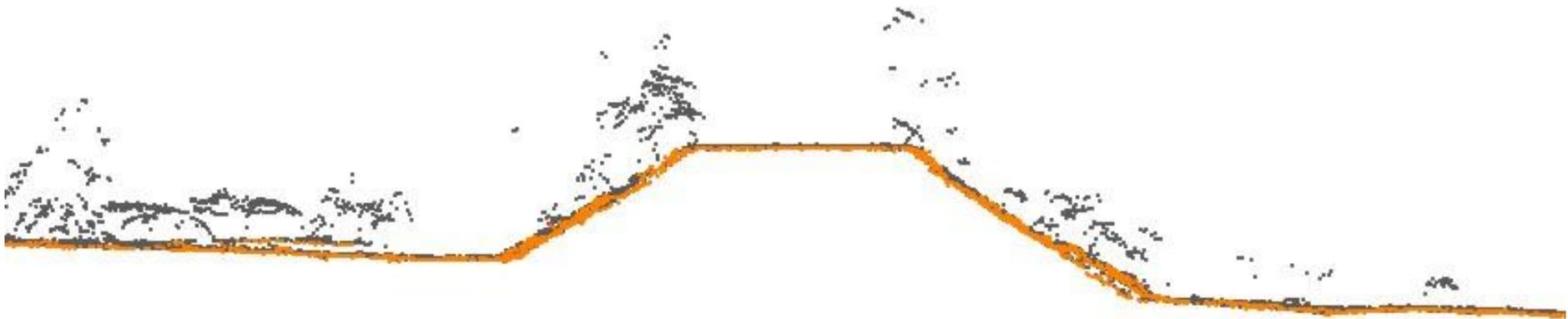


## Il filtraggio

---

Filtraggio: operazione nella quale si genera il DTM dal DSM; vengono eliminati i punti non appartenenti al terreno

Sezione dell'argine del Ticino: sono visibili punti appartenenti al terreno e a vegetazione



## Il filtraggio – 2

---

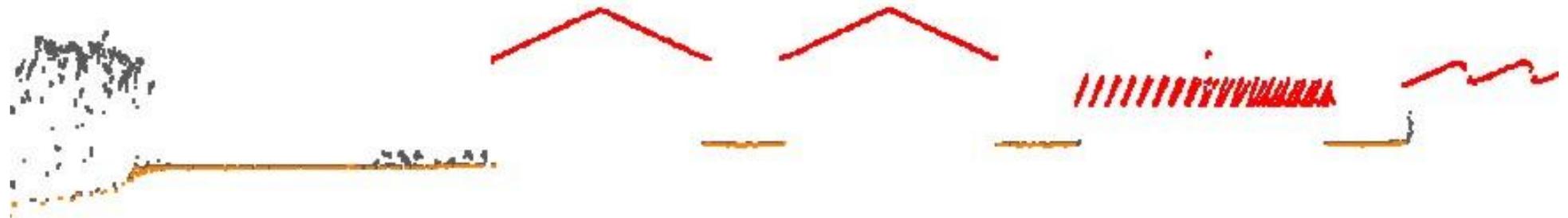
Ancora terreno e vegetazione



## Il filtraggio – 3

---

Terreno, edificato, vegetazione



## Il filtraggio – 4

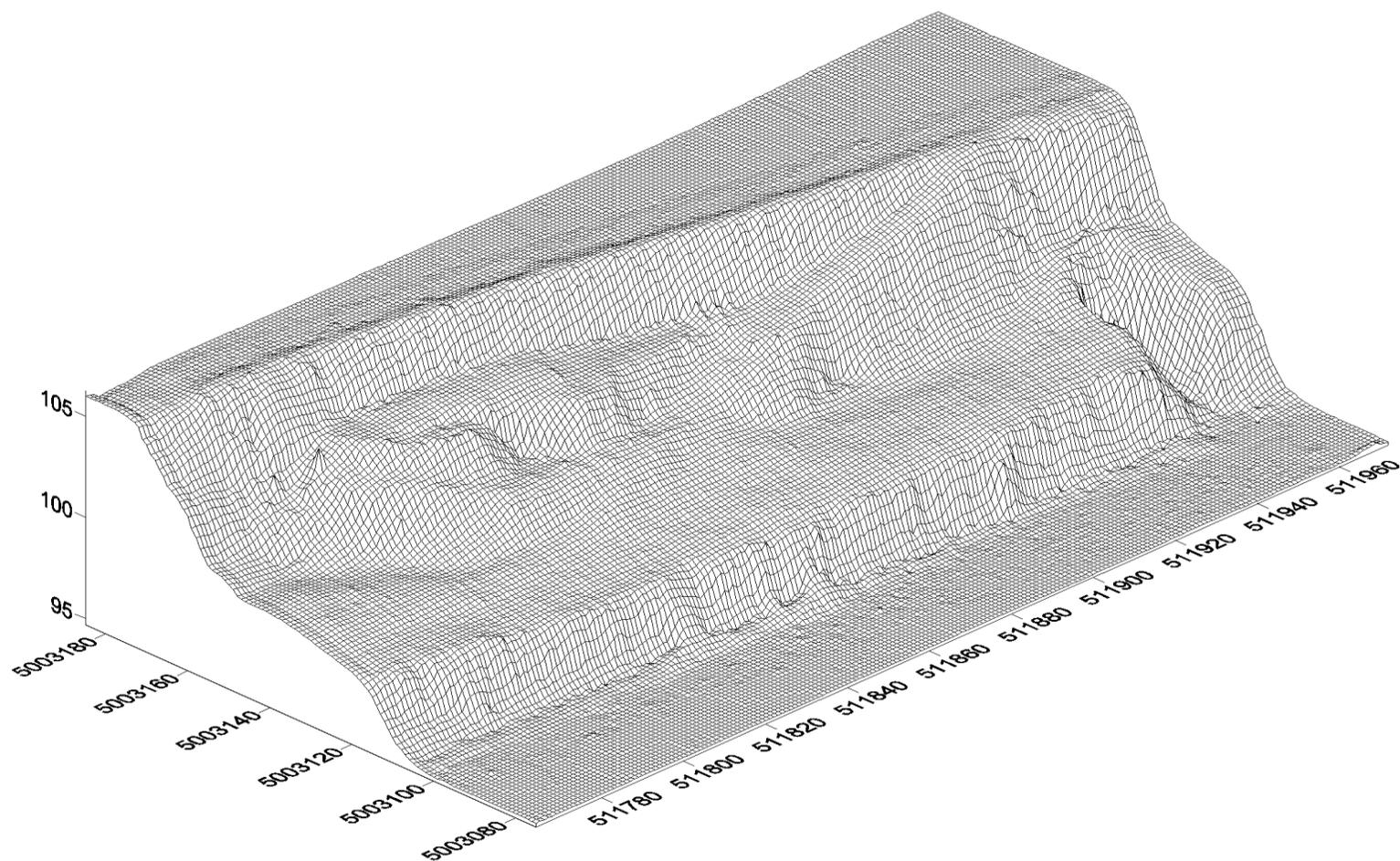
---

Poiché un numero di punti sufficiente raggiunge il terreno, è possibile separare i punti con algoritmi

# Riva del Ticino

---

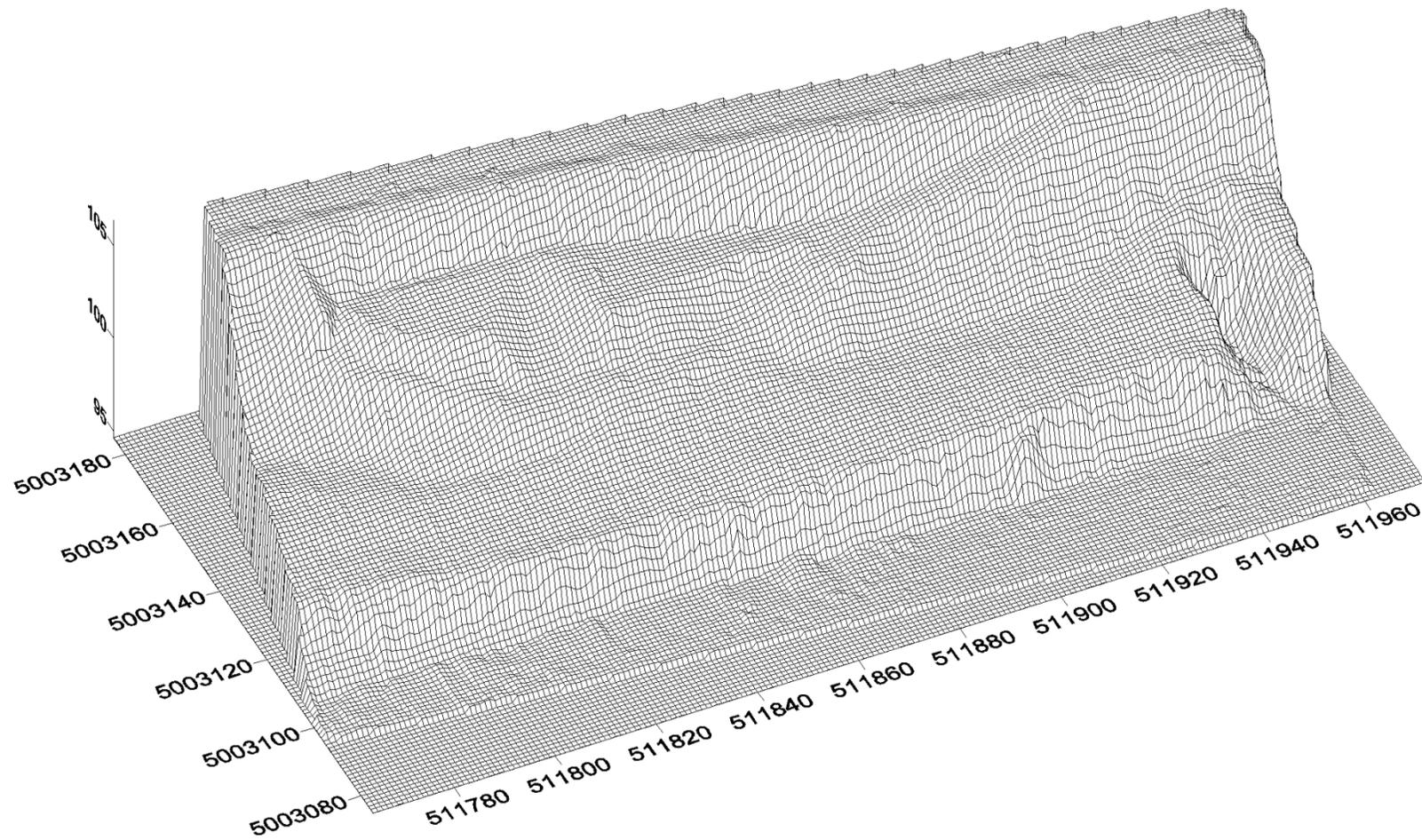
## Dettaglio morfologico – interpolazione IDW



## Riva del Ticino - 2

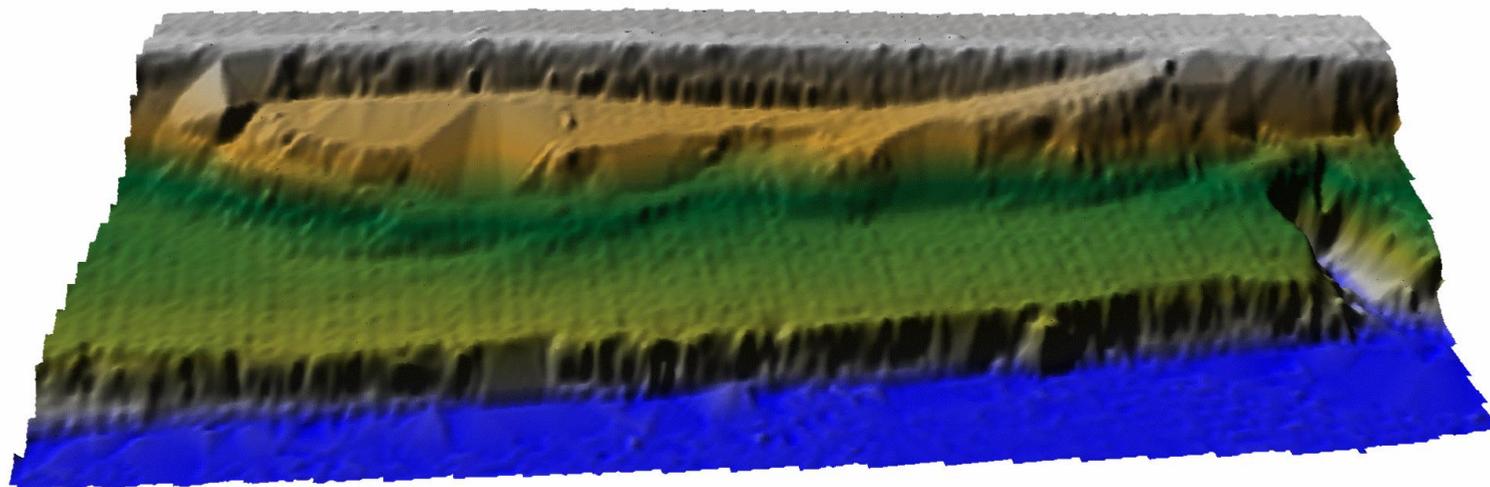
---

### Dettaglio morfologico – interpolazione TIN



## Riva del Ticino - 3

---



## Capacità di vedere fra le case

---



## Capacità di vedere fra le case - 2

---



## Capacità di vedere fra le case - 3

---

Con la fotogrammetria la via indicata non è assolutamente visibile



## Capacità di vedere fra le case – 4

---



## Misure della riflettività

---

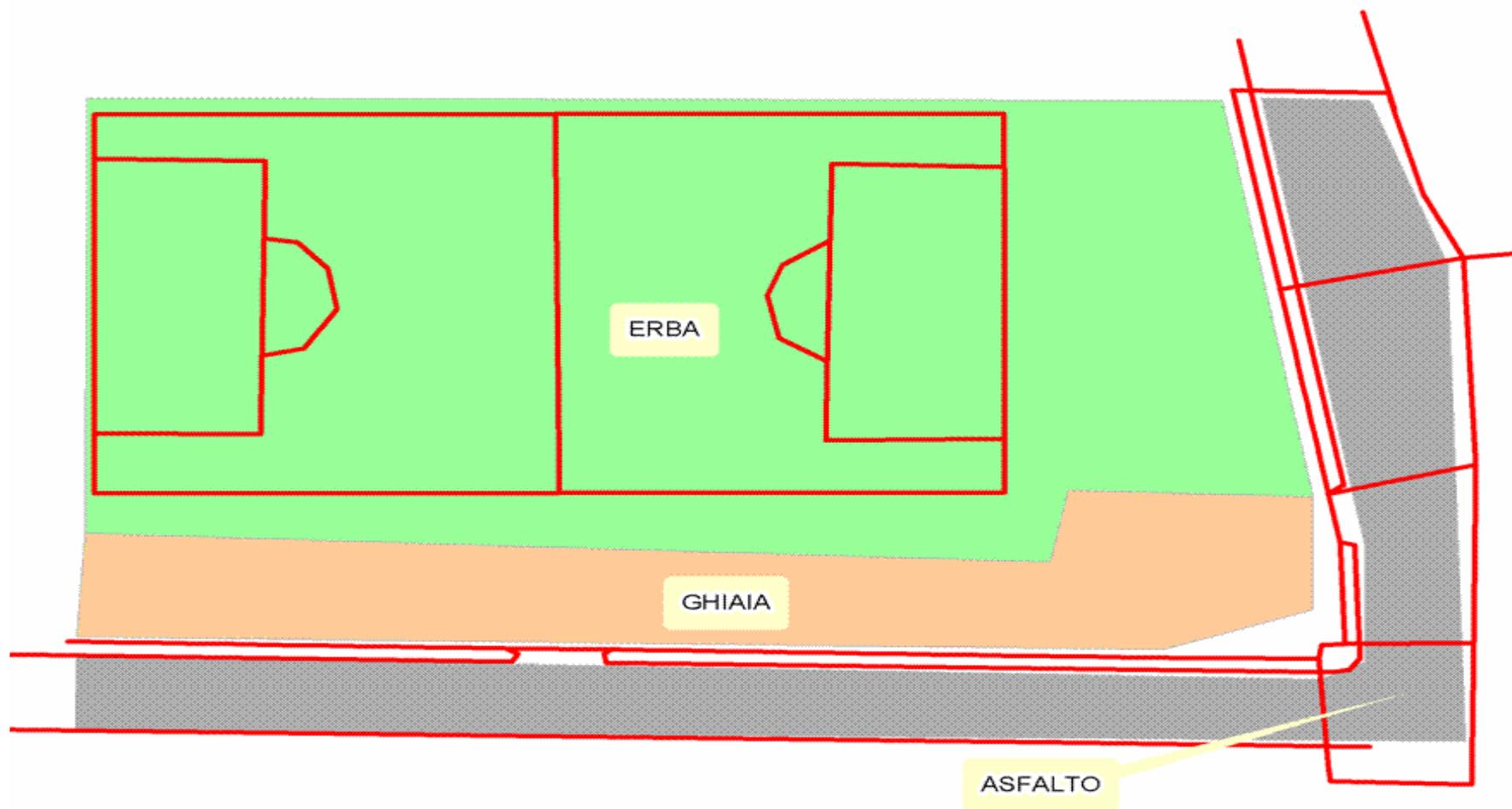
Alcuni strumenti misurano, oltre al tempo di volo (legato alla posizione) l'ampiezza del segnale di ritorno, che dipende dal materiale che ha riflesso il raggio

Esempi ([http://www.riegl.com/principles/e\\_gi004.htm](http://www.riegl.com/principles/e_gi004.htm)),  $\lambda=0.9$  micrometri:

Neve	80-90 %
Conifere	30 %
Asfalto	17 %
Sabbia asciutta	57 %

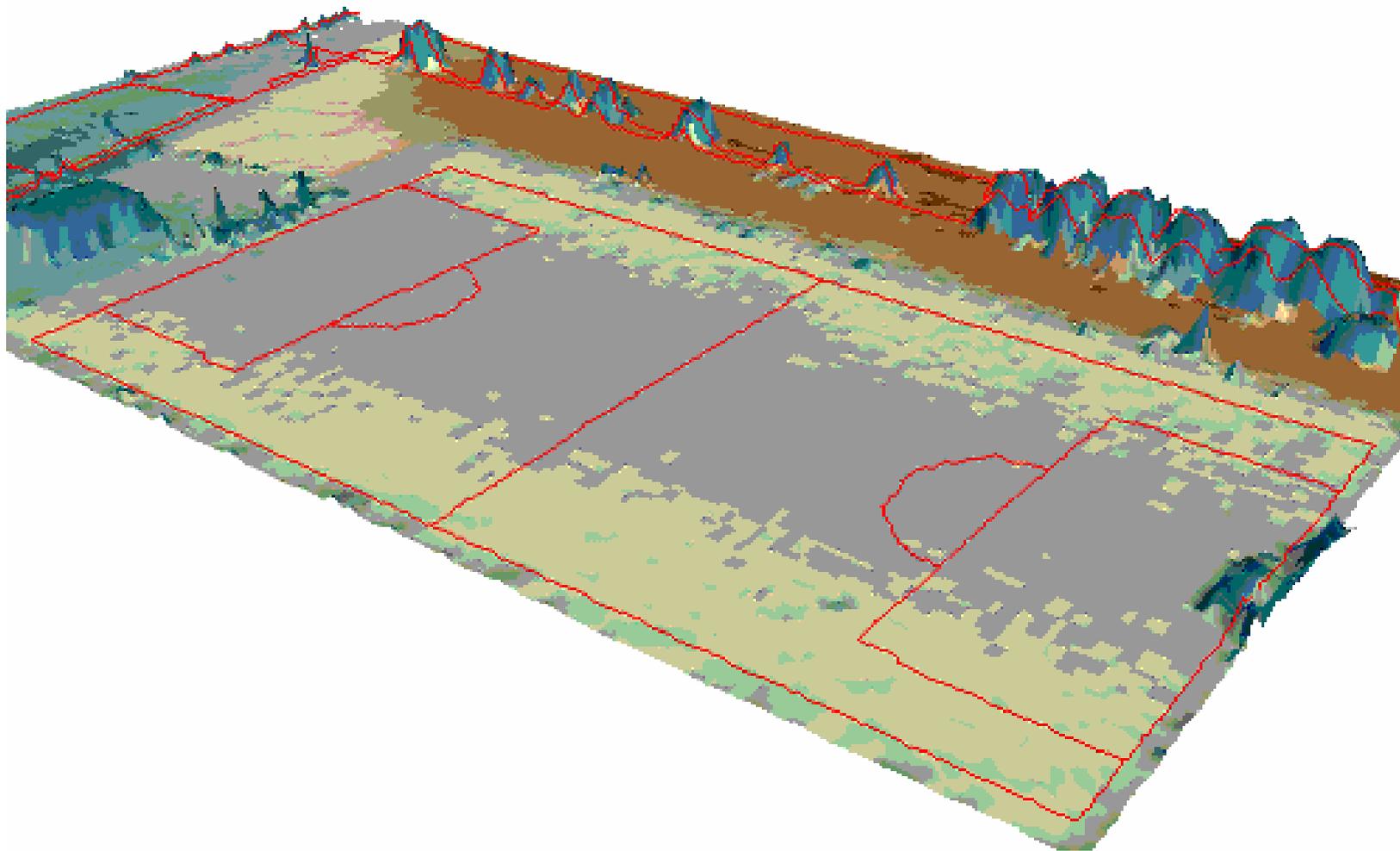
Si produce una sorta di immagine a infrarossi del territorio, che può essere utile per classificazioni

## Esempio: una zona piatta

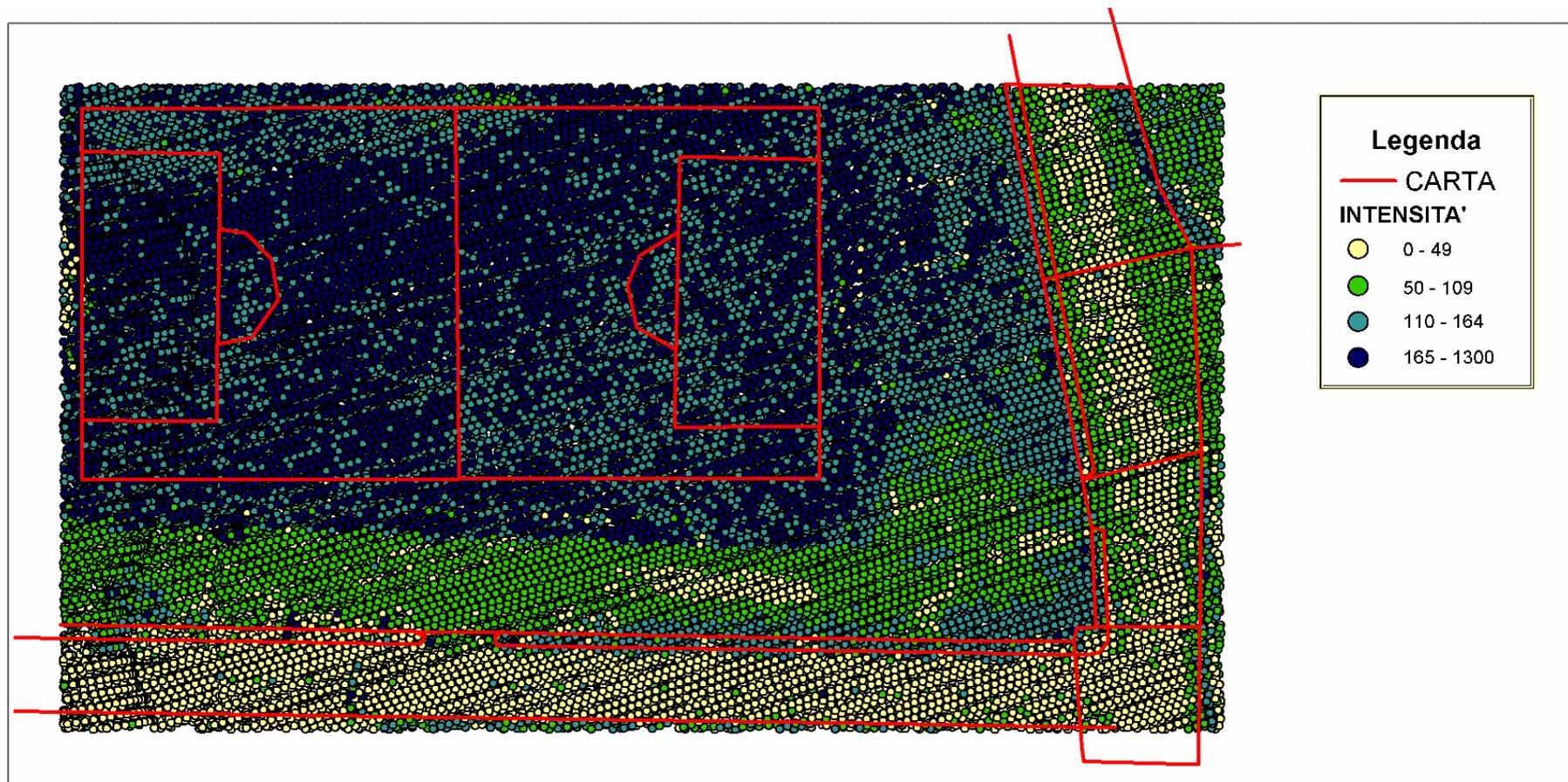


## Il DSM corrispondente

---



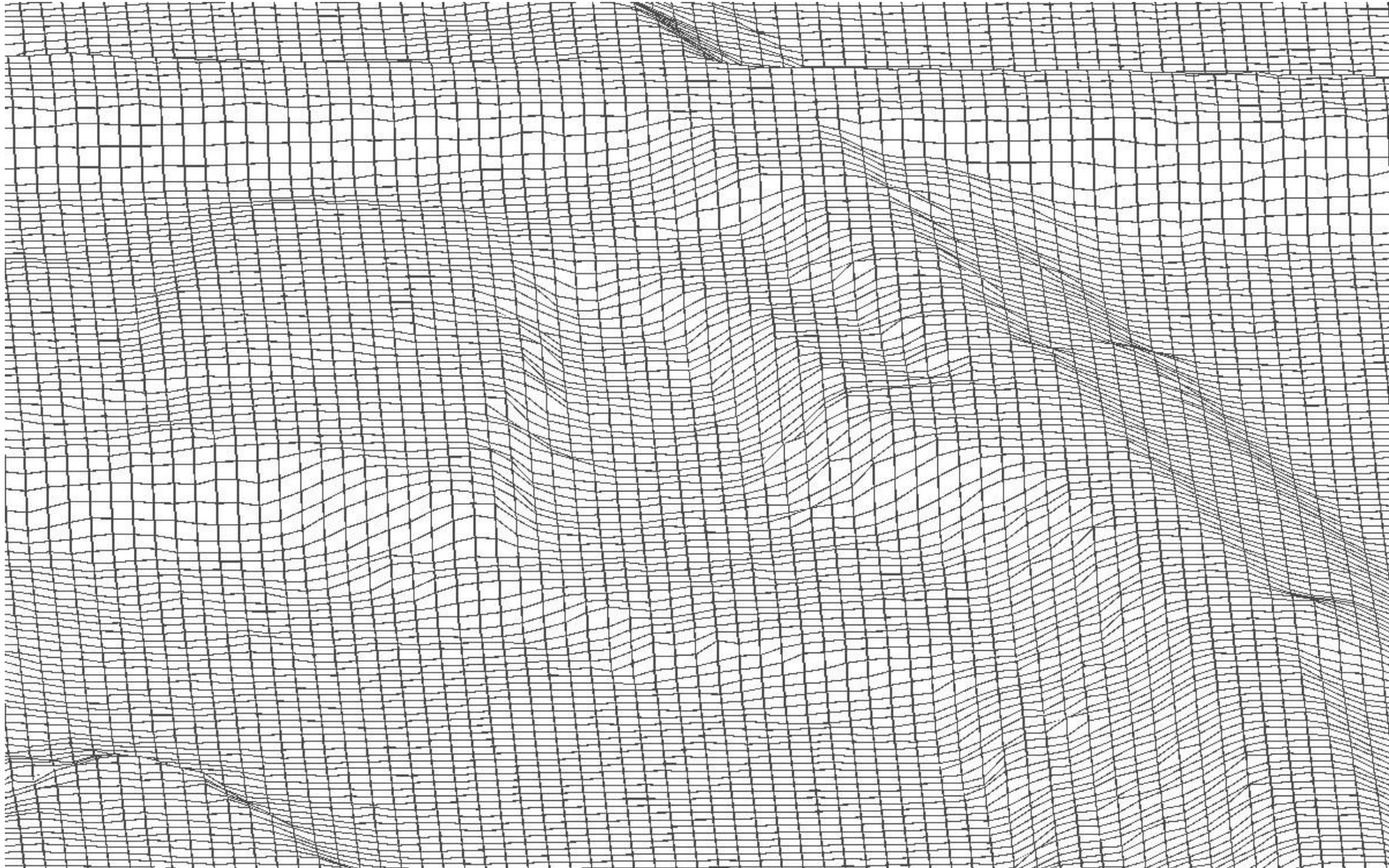
# L'immagine a infrarossi



# Esempi 1

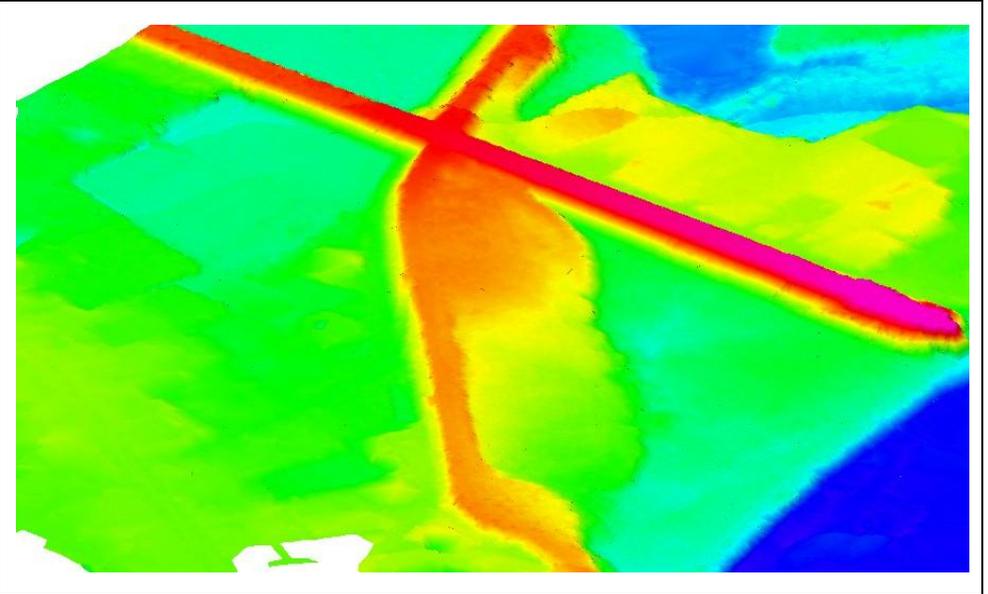
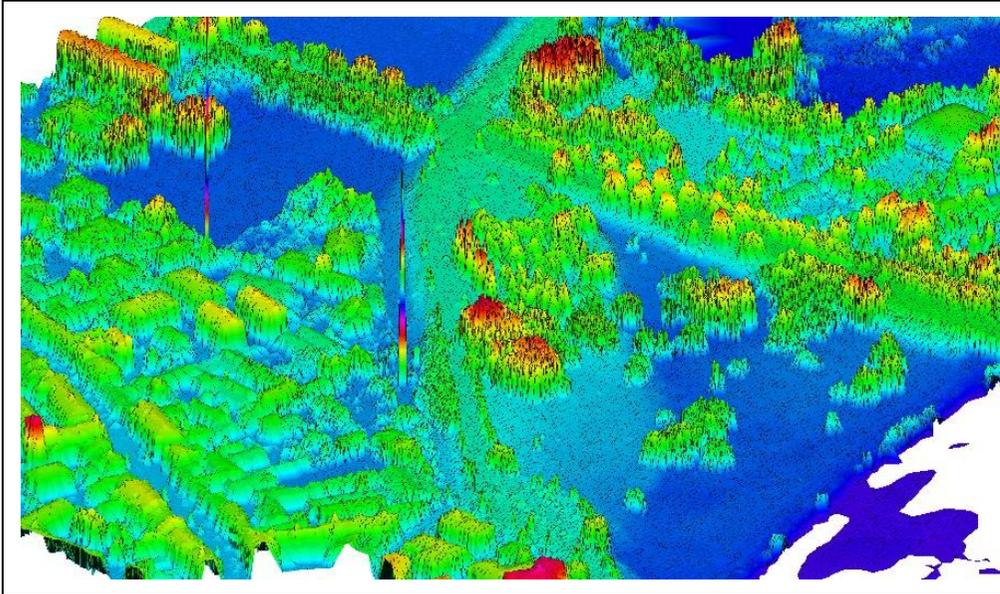
---

## Dati con struttura a griglia



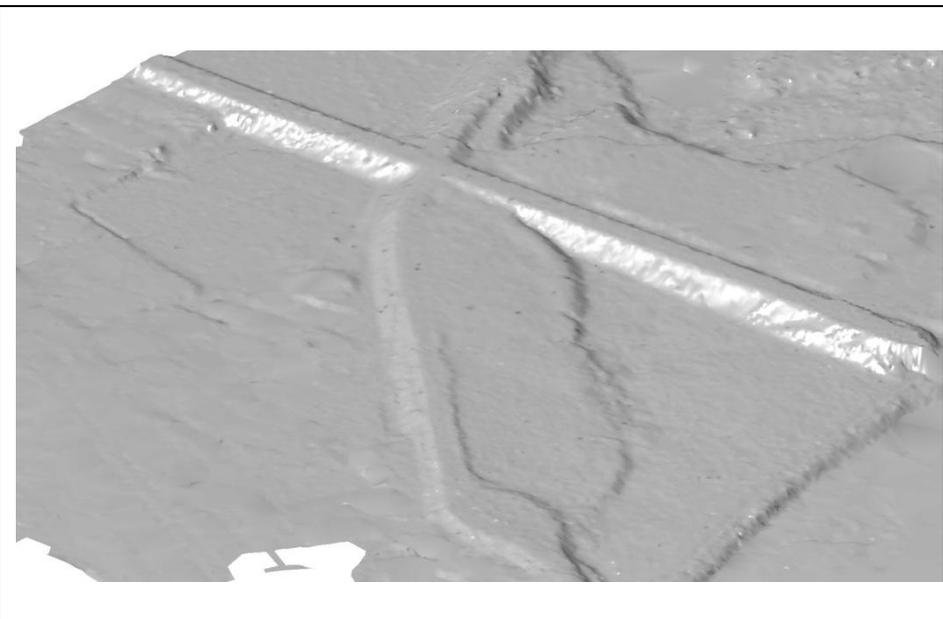
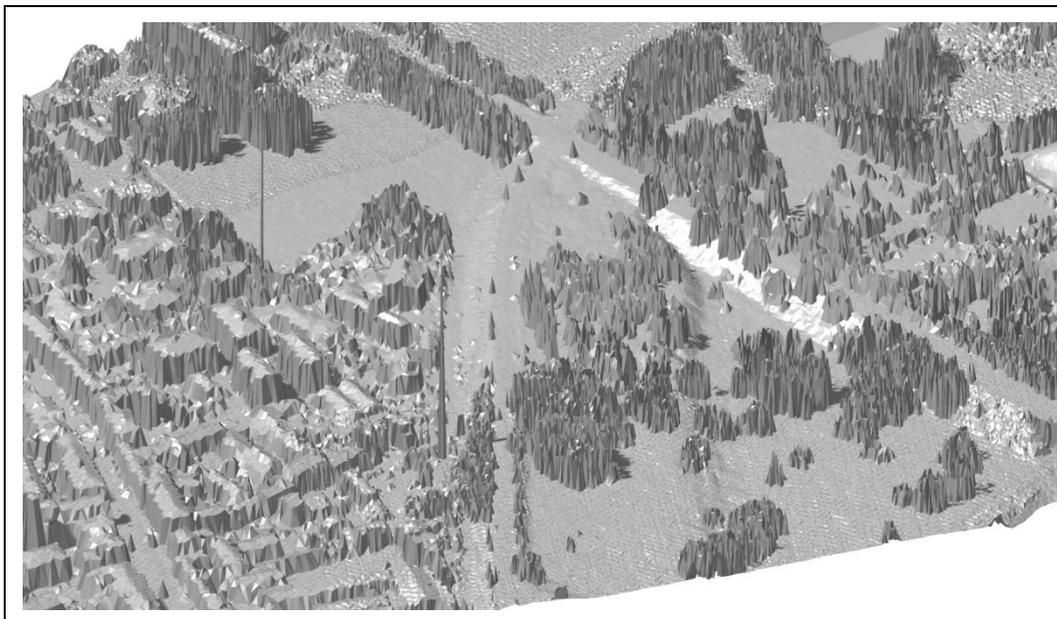
## Esempi 2 - filtraggio

---



## Esempi 3 - filtraggio

---



# Optech Pegasus

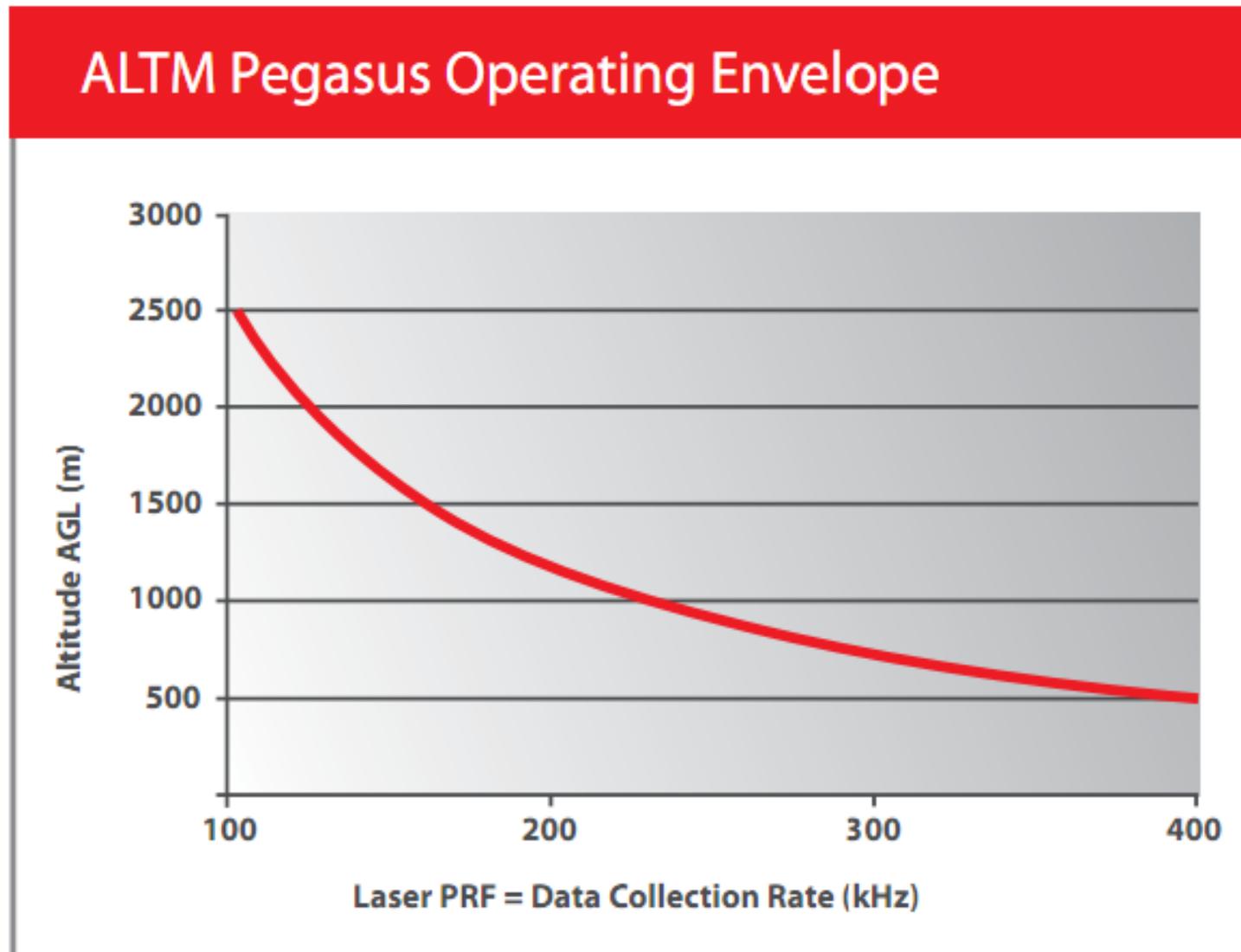
---



Optech ALTM Pegasus

## Optech Pegasus - 2

Fino a 400K punti/sec. Ma solo in certe condizioni



# Leica ALS60

---



# Toposys I



## Toposys I - 2

---

