



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Archeoastronomia  
Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 6

# L'Archeoastronomia Satellitare

# Impostazione Assiomatica dell'Archeoastronomia:

Le conoscenze astronomiche degli antichi sono codificate negli allineamenti diretti verso punti di sorgere e di tramontare degli astri visibili ad occhio nudo all'epoca in cui gli allineamenti furono materializzati

Non è detto che sia vero...

**Un allineamento astronomicamente significativo prevede l'esistenza di un target astronomico la cui posizione all'orizzonte naturale locale varia nei secoli e nei millenni a causa della precessione e della variazione di inclinazione dell'asse della Terra**

# Allineamento Archeoastronomico

Un allineamento astronomico è una semiretta orientata che parte da un punto di stazione, passa per il punto di collimazione e interseca l'orizzonte locale in un punto dove, in taluni periodi dell'anno sorge o tramonta un particolare astro

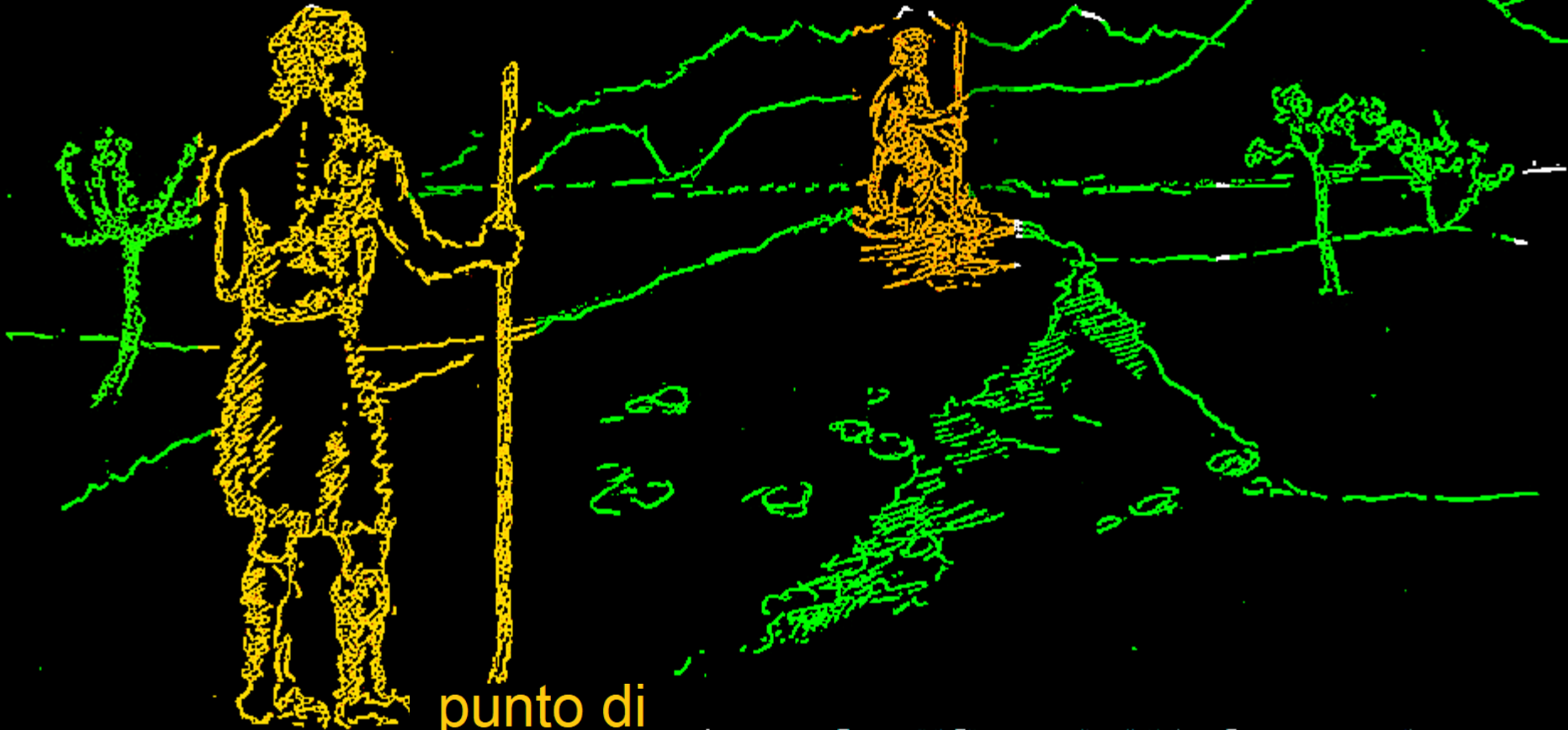
target  
astronomico

punto di  
collimazione



punto di  
stazione

Codifica dell'Informazione



Il rilievo archeoastronomico  
di un sito archeologico  
viene sempre eseguito nel  
sistema di coordinate altazimutali.

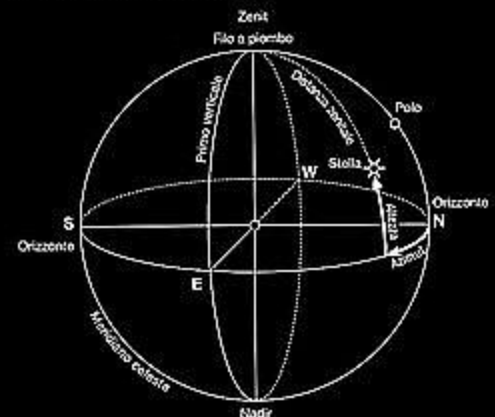
Si misurano:

Azimut (Az)

Altezze Angolari (ho)

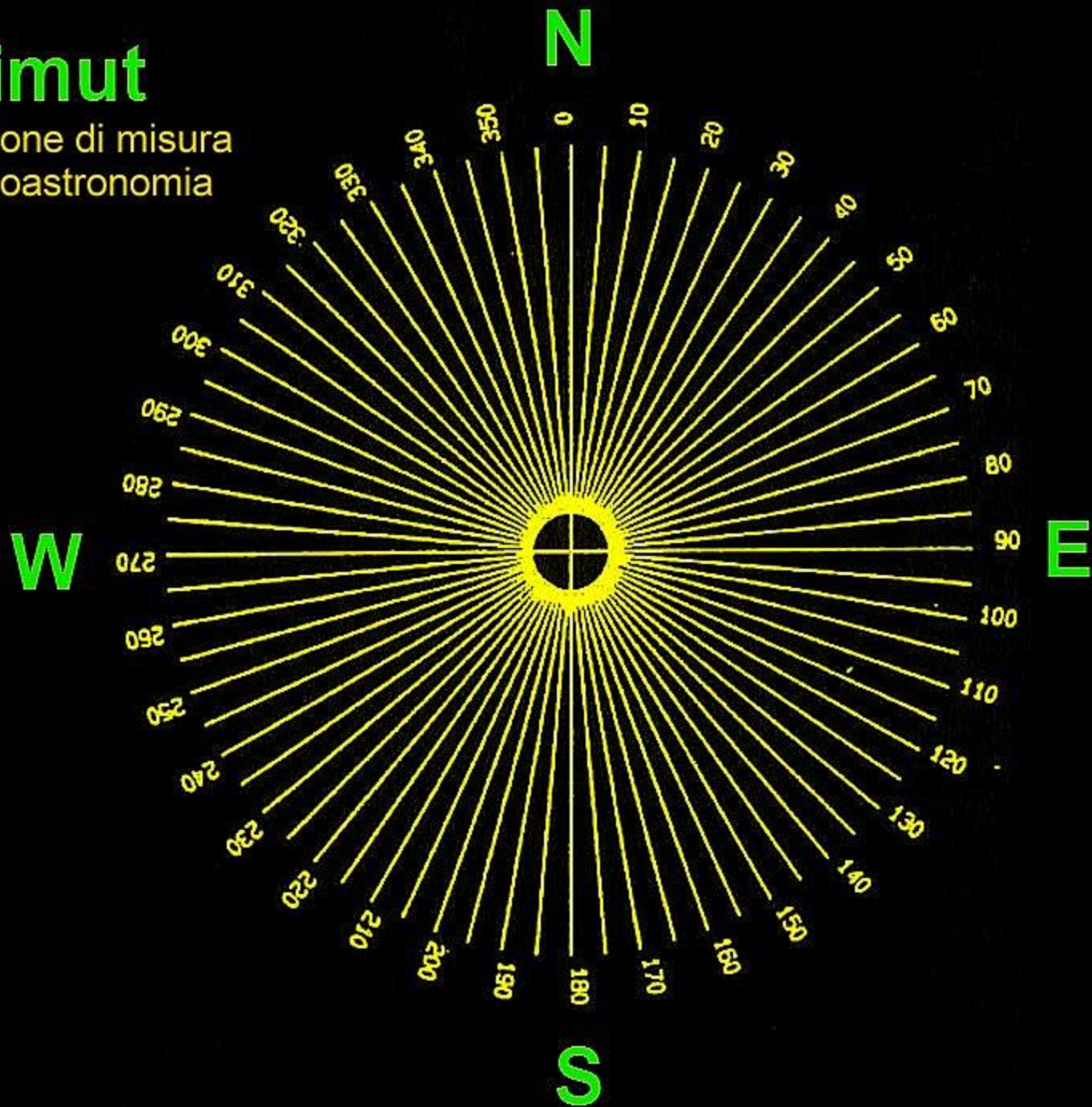
per ogni singolo allineamento

Coordinate Altazimutali



# Azimut

Convenzione di misura  
in Archeoastronomia



## **Azimut Geodetico e Azimut Astronomico**

**L'Azimut geometrico si misura su una proiezione stabilita da un certo Datum.**

**Se il Datum è il WGS84 allora l'Azimut geodetico corrisponde all'Azimut astronomico**

**Il Datum WGS84 (World Geodetic System 1984) è attualmente lo standard internazionale**

# Ellissoide WGS84



Semiassse maggiore

$$a = 6378137 \text{ m}$$

Semiassse minore

$$b = 6356752,314 \text{ m}$$

Raggio di curvatura polare  $c = \frac{a^2}{b} = 6399593,626 \text{ m}$

Schiacciamento  $f = \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298,257223563} = 3,352810665 \cdot 10^{-3}$

Eccentricità prima  $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = 8,181919084 \cdot 10^{-2}$

$$e^2 = 6,694379990 \cdot 10^{-3}$$

Eccentricità seconda  $e' = \sqrt{\frac{e^2}{1-e^2}} = 8,209443795 \cdot 10^{-2}$

$$(e')^2 = 6,739496742 \cdot 10^{-3}$$





# Rilievo Archeoastronomico

## Telerilevamento satellitare



GeoEye



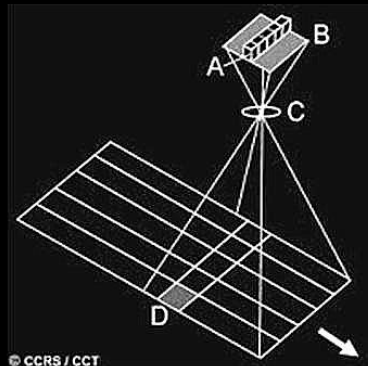
OrbView



QuickBird



Ikonos



© CCRS / CCT



# Tipico elemento archeoastronomico: allineamento

**Righello**

Linea    Percorso

Misura la distanza tra due punti sul suolo

Lunghezza:      401,10    Metri

Direzione:      49,54 gradi

Navigazione con il mouse    Salva    Cancella

**Definito univocamente dal  
suo Azimut di orientazione**

©2010 Google

# Sorgenti di immagini satellitari

**Google Earth**

**gratis....**

**Zoom Earth**

**PCN**

**Nasa World Wind**

**Bing Map**

**Earth Explorer**

**Yandex**

**ACME**

**NASA Satellite Pro**

Sorgente	Georef.	Georett.	Swath Residuo	Ortofoto	SRTM	Salvataggio immagine
Google Earth	si	si	talvolta	no	si	si (<>)
Zoom Earth	si	si	talvolta	no	no	no (<>)
PCN	si (*)	si (*)	no	si	no	no (<>)
NASA World Wind	non sempre		si	no	si	si
Bing Map	si	si	talvolta	no	no	no (<>)
Earth Explorer	si	si	talvolta	no	si (^)	no (<>)
Yandex	si	si	talvolta	no	no	no (<>)
ACME	si	si	talvolta	no	no	no (<>)
NASA Satellite Pro	si	si	no	si	no	no (<>)

#### Note

(\*) non sempre l'azimut misurato è quello astronomico perchè la georeferenziazione non è eseguita utilizzando il datum WGS84.

(^) Earth Explorer permette di accedere ai dati SRTM30 e Aster30 e permette di costruire le mappe del paleopaesaggio. EE utilizza GE come piattaforma.

(<>) dove il software non prevede il salvataggio dell'immagine si ottiene l'hardcopy del monitor, quindi la risoluzione è quella della scheda grafica del computer.

# Il rilievo degli allineamenti

Sorgente

Tecnica di misura dell'Azimut

Google Earth

Funzione "righello" built-in

Zoom Earth

Funzione "misurino" di GIMP sull'immagine salvata

PCN

NASA World Wind

Funzione "misurino" di GIMP sull'immagine salvata

Bing Map

Funzione "misurino" di GIMP sull'immagine salvata

Earth Explorer

{ si calcola utilizzando le coordinate geografiche degli estremi dell'allineamento

Yandex

Funzione "misurino" di GIMP sull'immagine salvata

ACME

Funzione "misurino" di GIMP sull'immagine salvata

NASA Satellite Pro

Funzione "misurino" di GIMP sull'immagine salvata

**in tutti i casi è possibile misurare le coordinate in pixels degli estremi degli allineamenti e valutare l'azimut astronomico di orientazione**

## Altre sorgenti di immagini satellitari

Corona High Resolution Space Phot. KH7/KH9 \$\$\$\$

Cosmos KVR1000 \$\$\$\$

Landsat

Spot

Aster

} gratis con GE

Quick Bird

Ikonos

} gratis con GE

SIR-A, SIR-B, SIR-C, X-SAR (immagini radar) \$\$\$\$

\$\$\$\$ = a pagamento



# Le immagini satellitari

$DN(r,c)$

$r = \text{riga}$

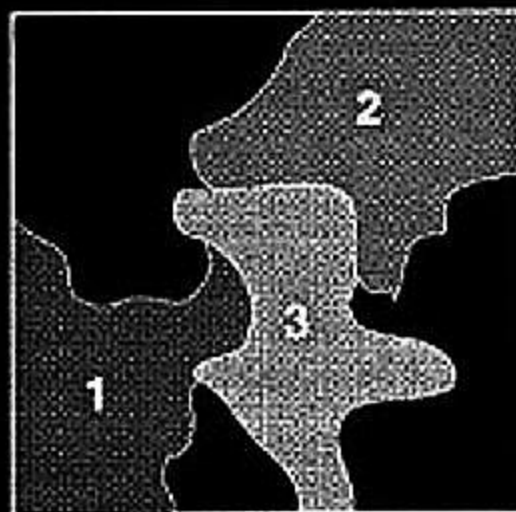
$c = \text{colonna}$

$r = 1, \dots, N$  ;  $c = 1, \dots, M$

DN = Digital Number

$$DN = 2^b$$

$b = \text{numero di bit utilizzati per codificare il livello di intensità di ciascun pixel}$



0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	2	2	2	2	2
0	0	0	2	2	2	2	2	2
0	0	0	3	3	3	2	2	0
1	0	0	1	3	3	2	0	0
1	1	1	1	3	3	0	0	0
1	1	1	3	3	3	3	3	0
1	1	1	0	3	3	0	0	0
1	1	1	0	0	3	0	0	0

$r$

$c$

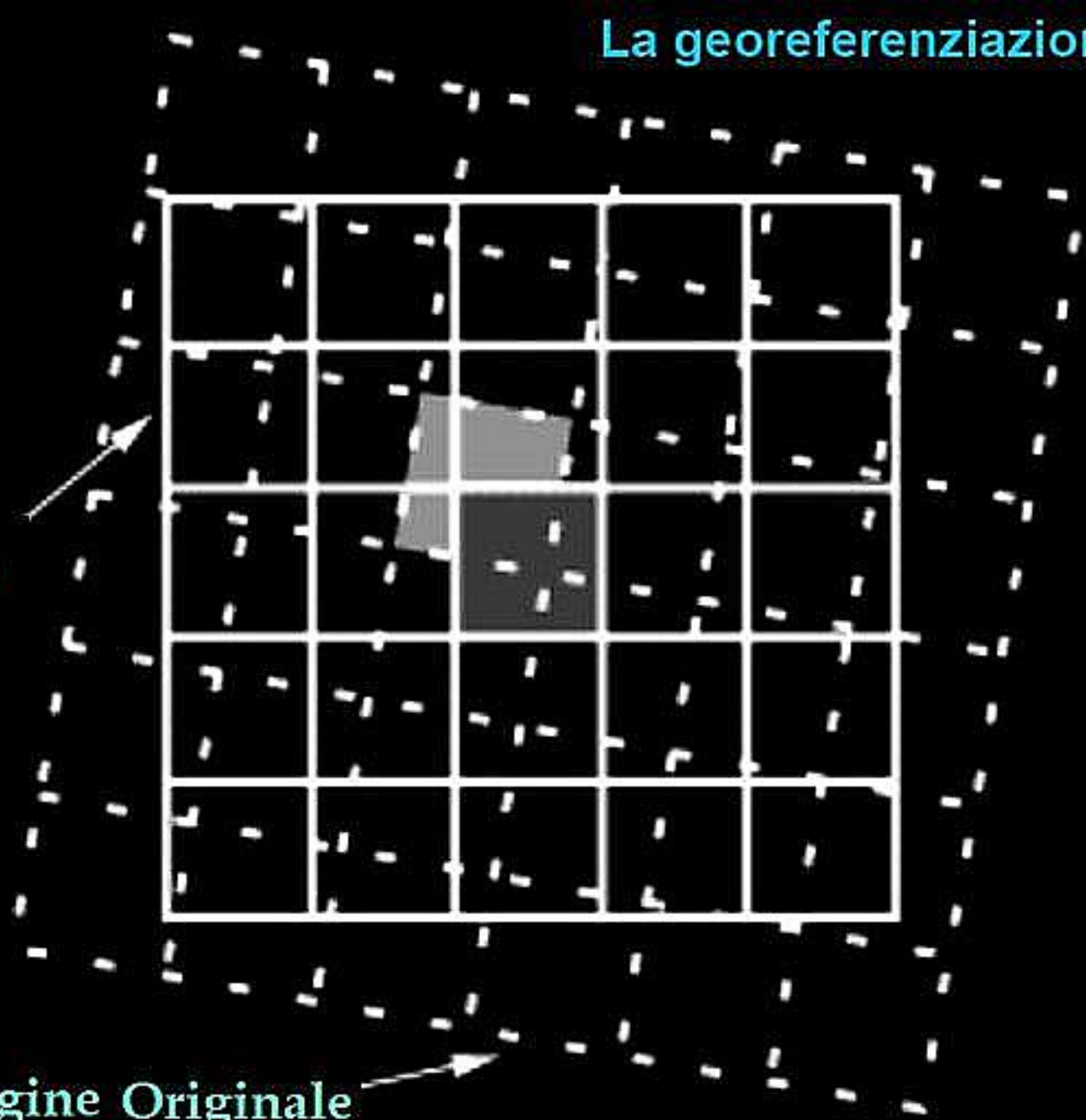
# Le fasi principali di un processo di Telerilevamento per l'Archeoastronomia



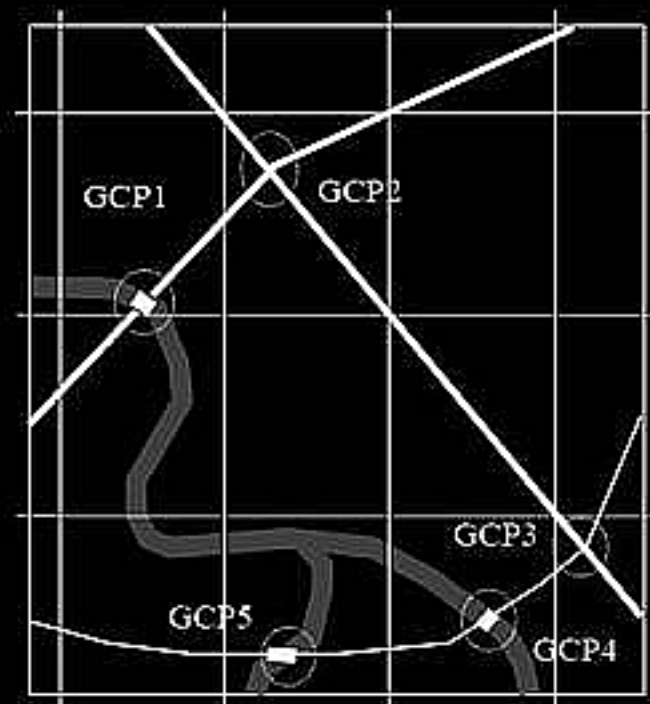
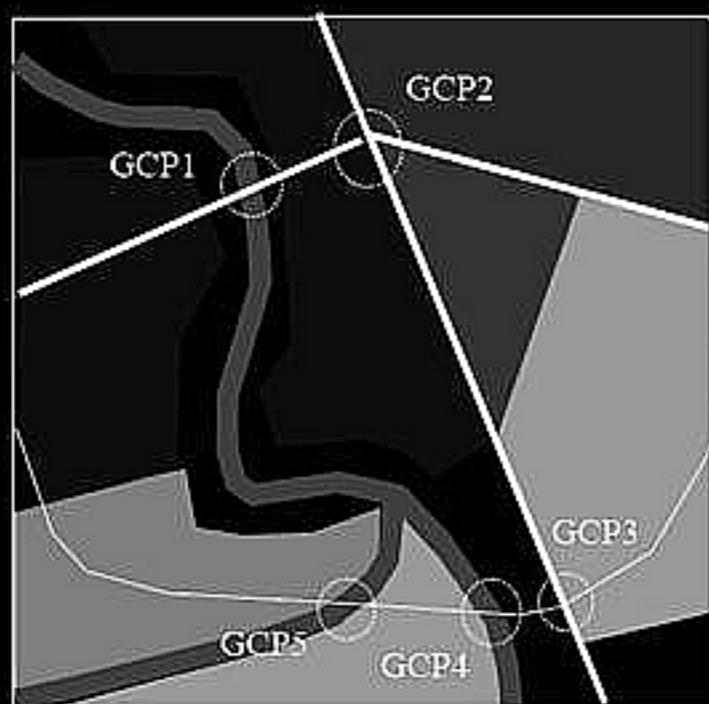
## La georeferenziazione

Immagine  
Corretta

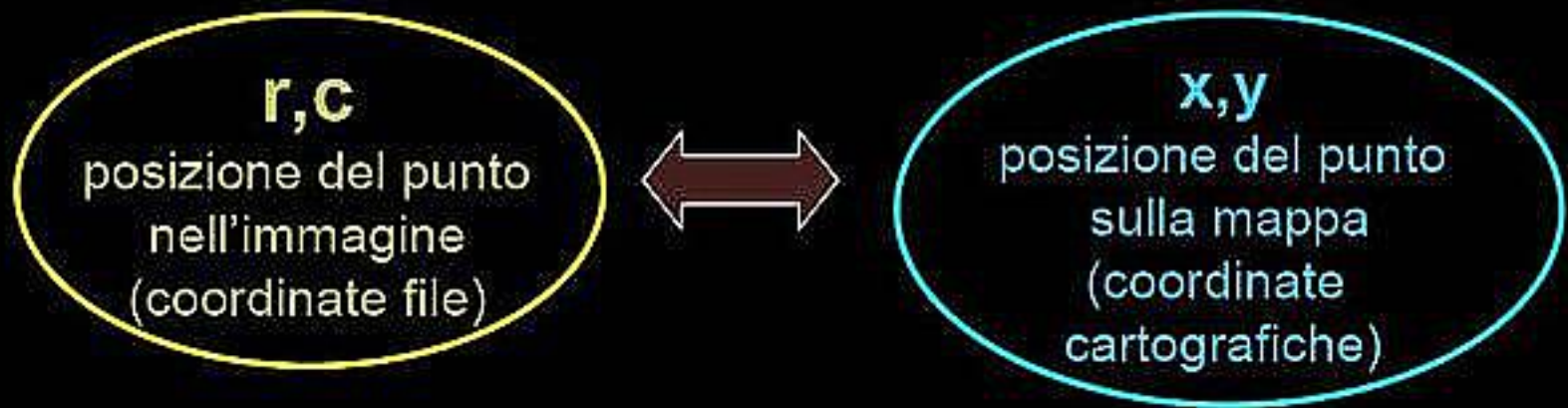
Immagine Originale



# La georeferenziazione



# La georeferenziazione



*Funzioni di  
mappatura:*

$$\begin{aligned} r &= f_1(x, y), \\ c &= f_2(x, y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= g_1(r, c) \\ y &= g_2(r, c) \end{aligned}$$

## La georeferenziazione

Per ottenere le funzioni di mappatura dirette si ipotizza che le relazioni tra le coordinate dei GCP nell'immagine e nella cartografia siano polinomiali:

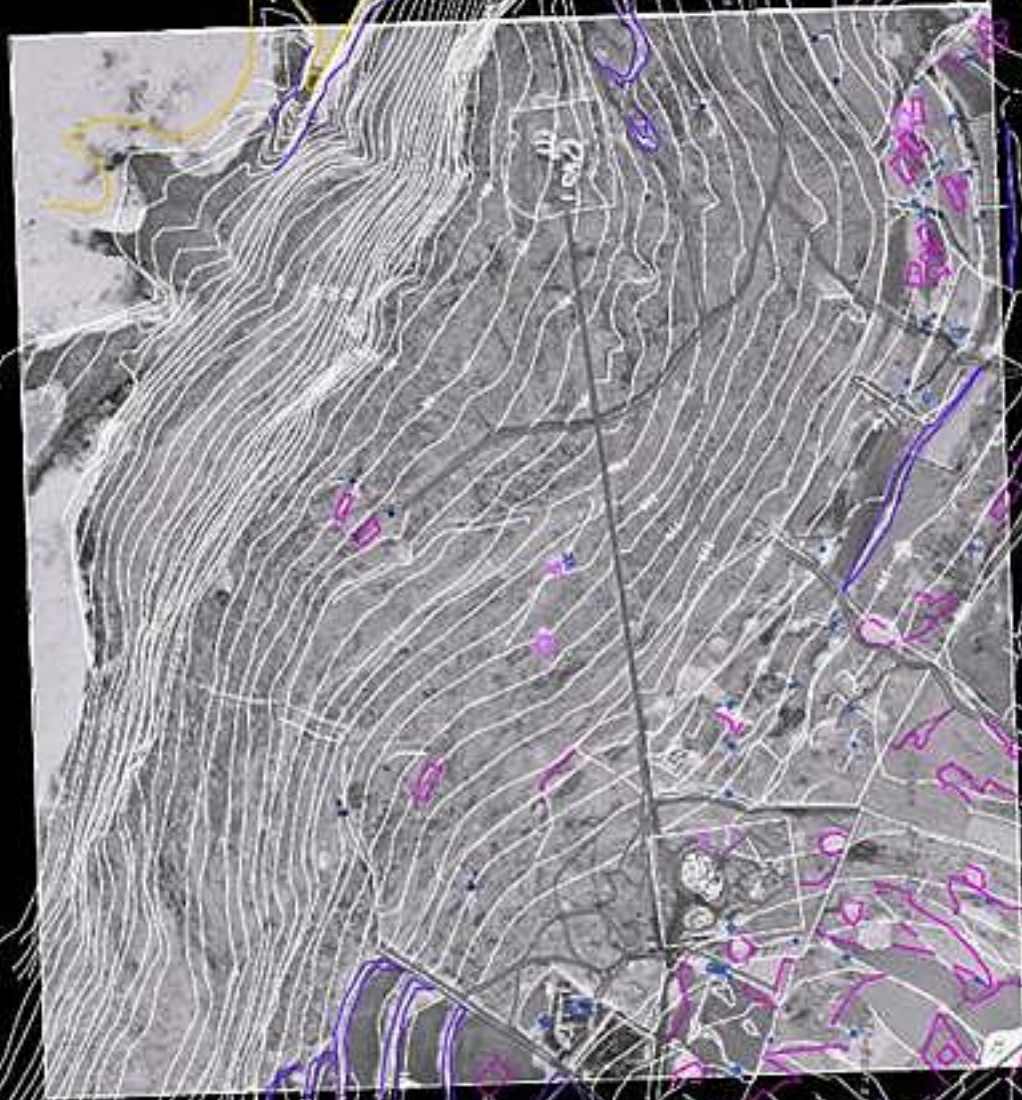
$$x = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} a_{jk} r^j c^k \qquad y = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{m-j} b_{jk} r^j c^k$$

dove:

- $r, c$  sono le coordinate immagine dei GCP (note);
- $x, y$  sono le coordinate cartografiche dei GCP (note);
- sono i coefficienti della trasformazione (incognite);
- $m$  è il grado della trasformazione (definito dall'analista).

I coefficienti della trasformazione sono valutati a partire dalla serie di punti di controllo identificati sull'immagine e sulla cartografia con il metodo dei *minimi quadrati*.

Malta



# Malta





# **importante!!!**

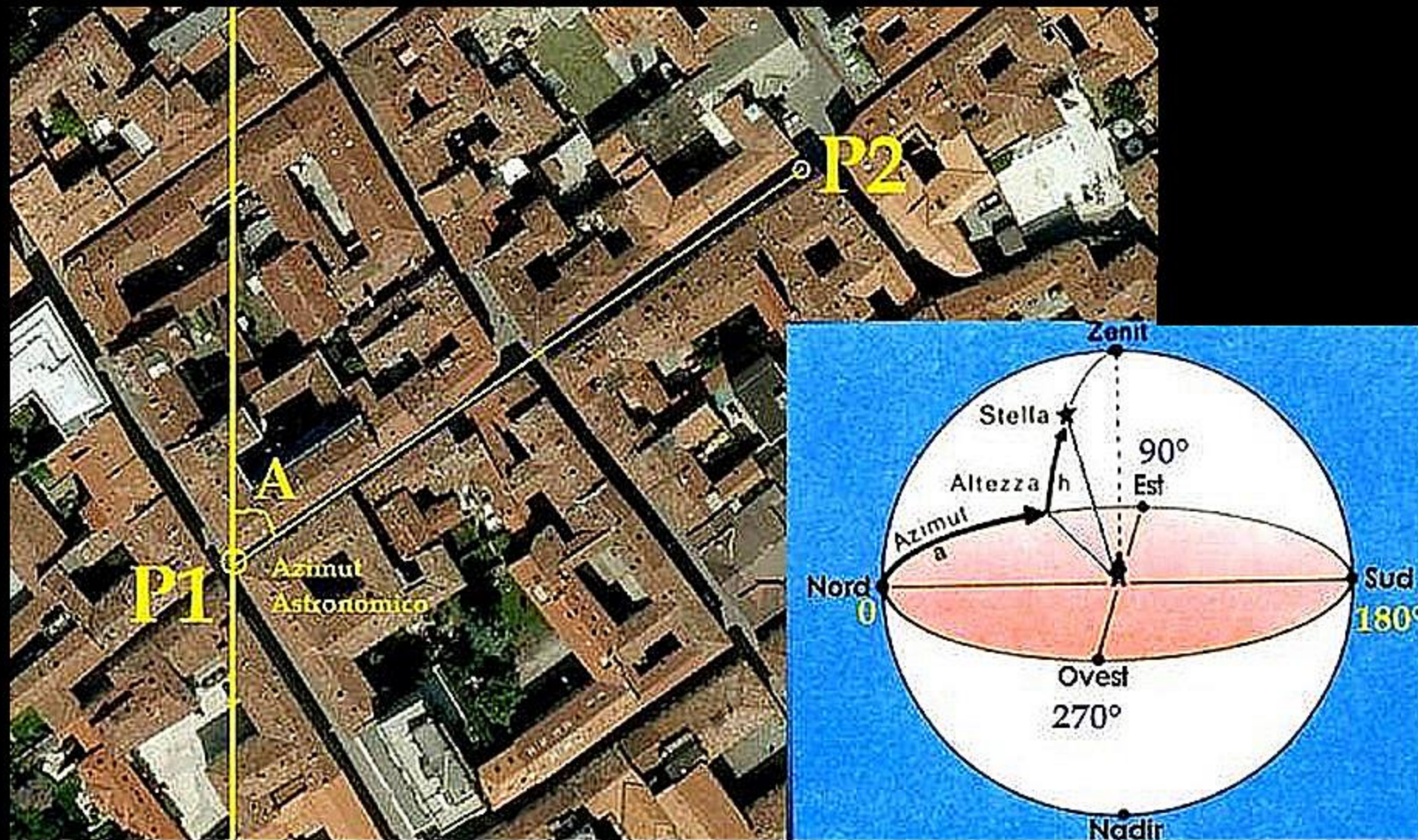
**Il requisito fondamentale per l'utilizzo delle immagini da satellite per il rilievo archeoastronomico dei siti archeologici è che qualsiasi trasformazione che si opera sull'immagine non distorba la sua geometria.**

**Altrimenti l'Azimut di orientazione viene misurato sbagliato...**

Meridiano astronomico locale

$N^*$

# Azimut Astronomico



## misura dell'Azimut Astronomico

Esistono svariate procedure per misurare l'azimut astronomico di orientazione di un allineamento oppure di un edificio e la procedura a cui tutti i metodi possono essere ricondotti è quello di rilevare le coordinate geografiche di due punti appartenenti alla linea di cui si vuole misurare l'orientazione, ed eseguire il calcolo dell'azimut astronomico utilizzando le loro coordinate. Qualora l'immagine sia stata correttamente georeferenziata, georettificata e correttamente rappresentata sul monitor del computer con i lati paralleli alle direzioni cardinali dell'ellissoide geocentrico WGS84 che sono molto prossime a quelle astronomiche, il valore dell'azimut viene calcolato, generalmente in maniera automatica dal software utilizzato, mediante la semplice relazione:

$$Az = atan(De/Dn)$$

In cui  $De$  è il numero di pixel di differenza tra i due estremi della linea tracciata dall'utente nella direzione est-ovest dell'immagine (*Easting*) e  $Dn$  quelli della differenza nella direzione nord-sud (*Northing*). Se l'immagine non è correttamente orientata l'azimut misurato sarà sbagliato della stessa entità dell'angolo di rotazione di essa. Ovviamente la scala metrica deve essere identica ed uniforme sia nella direzione X (longitudine geografica) che in quella Y (latitudine geografica).

La distanza  $d$  tra i due punti (lunghezza dell'allineamento) è data da:

$$d = R_e \cdot s^{\text{rad}}$$

dove  $s$  è espresso in radianti ed è calcolato con:

$$s = \arccos \left[ \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1) + \sin(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2) \right]$$

e  $R_e$  è il raggio della Terra.

In realtà è bene utilizzare il raggio locale dell'ellissoide WGS84.

# Regole pratiche per valutare l'errore sull'azimut di orientazione di una linea misurato sulle immagini riprese dai satelliti

**Righello** [X]

Linea   **Percorso**

Misura la distanza tra due punti sul suolo

Lunghezza:            351,69   Metri

Direzione:            41,83 gradi

Navigazione con il mouse   **Salva**   **Cancella**

## Stonehenge

Misura dell'azimut di orientazione dell'asse della struttura a "ferro di cavallo".



Misura dell'azimut  $Az$  di orientazione della linea A  $\rightarrow$  B, di lunghezza "d" sull'immagine.

# La misura dell'errore sugli Azimut di orientazione sull'immagine

## 3 possibilità

- ) **Valutazione Teorica**
- ) **Valutazione Sperimentale**
- ) **Valutazione Pratica**

## Errore dell'operatore

Dal punto di vista della valutazione dell'errore angolare  $\varepsilon(\text{oper})$  con cui è possibile determinare tale valore di azimuth è possibile mettere in evidenza che l'errore vale teoricamente:

$$\varepsilon(\text{oper}) = 114^{\circ},6 \times Px / d$$

in cui  $Px$  è la dimensione lineare di ciascun pixel che compone l'immagine su cui si esegue la misura delle coordinate geografiche. In realtà la situazione è più complessa in quanto non è detto che sia possibile valutare il pixel giusto che appartiene alla linea di cui va misurato l'azimut astronomico, quindi una valutazione più sicura dell'errore con cui è possibile misurare l'azimut astronomico di orientazione dell'allineamento è il seguente:

$$\varepsilon(\text{oper}) = 57^{\circ},3 \times p \times n / d$$

in cui  $p$  è la dimensione lineare di ciascuno dei due punti stabiliti sull'immagine satellitare utilizzata per rilevare le coordinate, i quali potrebbero anche coprire più del singolo pixel.

# Errore dell'operatore

## Funzione densità di probabilità (pdf)

Il valore ottenuto rappresenta quindi l'errore che può essere commesso durante la misura dell'azimut geodetico (astronomico) di orientazione  $A$ , di una direzione il cui azimut vero è  $A_0$ , su un'immagine satellitare, sulla quale sono state rilevate le coordinate geografiche utilizzate per calcolare l'azimut di orientazione. La funzione densità di probabilità associata all'errore sull'azimut è quindi la seguente distribuzione normale  $N(A_0, \sigma^2)$ :

$$N(A_0, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A - A_0)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\sigma = 180^\circ \times p \times n / (\pi \times d)$$



## Funzione densità di probabilità (pdf)

$$f(A) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{d}{180^\circ s n} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\pi d (A - A_0)}{180^\circ s n} \right)^2}$$

dove:

$s$  = spessore lineare della linea tracciata sull'immagine per materializzare l'allineamento di cui misurare l'azimut  $A_0$  di orientazione.

$n$  = denominatore della scala lineare dell'immagine.

$A$  = Azimut di orientazione misurato per l'allineamento.

$A_0$  = Azimut astronomico vero di orientazione dell'allineamento.

$d$  = lunghezza della linea tracciata sull'immagine, che può essere la distanza planimetrica tra i due punti di stazione che definiscono l'allineamento.

# Errore dell'operatore

Funzione cumulativa di densità di probabilità

$$F(A) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{d}{180^\circ p n} \int_{-A}^A e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\pi d (A - A_0)}{180^\circ p n} \right)^2} dA$$

dove:

$p$  = dimensione lineare dei due punti misurati sull'immagine che costituiscono gli estremi dell'allineamento

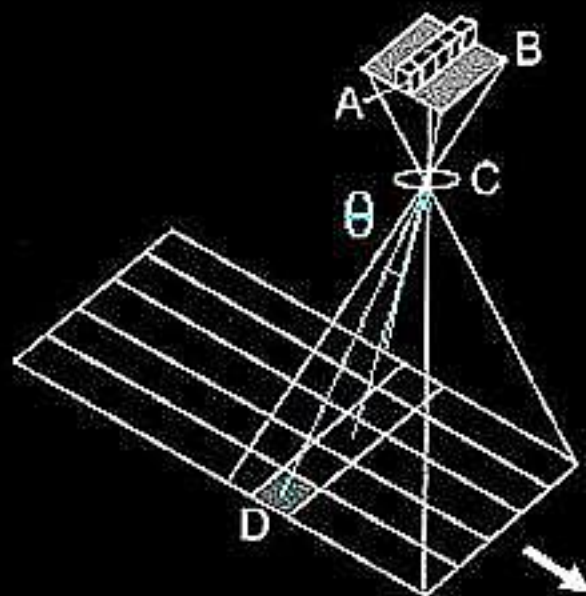
$n$  = denominatore della scala lineare dell'immagine.

$A$  = Azimut di orientazione misurato per l'allineamento.

$A_0$  = Azimut astronomico vero di orientazione dell'allineamento.

$d$  = distanza planimetrica tra i due punti di cui sono state misurate le coordinate geografiche sull'immagine.

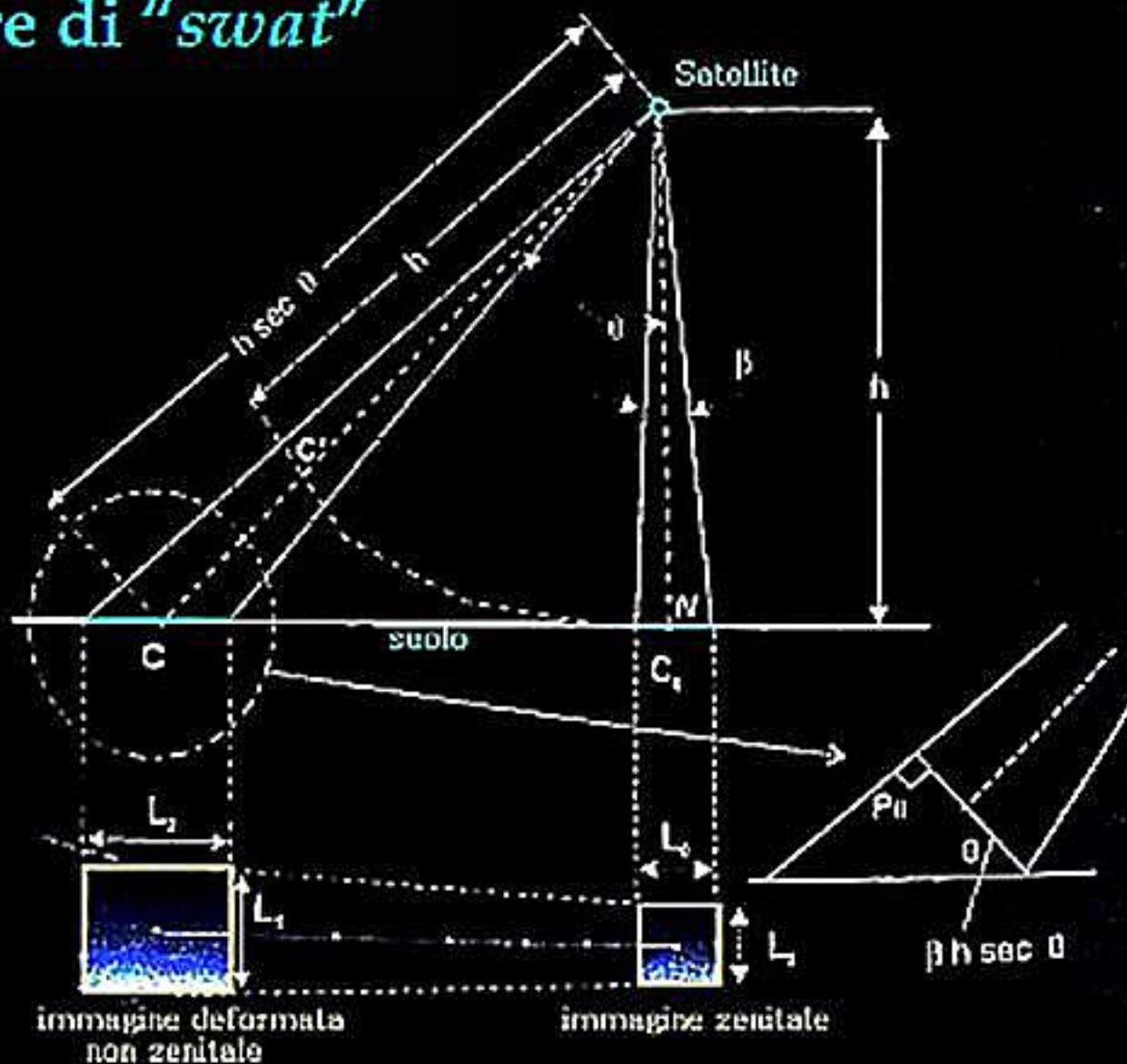
# Errore di "swat"



Angolo di "swat": A-B è l'array di sensori CCD della fotocamera di ripresa, C è il sistema ottico obiettivo, D rappresenta l'IFOV (Instantaneous Field of View) e  $\theta$  è l'angolo di deviazione dalla verticale, in gergo "swat".

L'errore, di "swat" oppure di "distorsione panoramica" cioè  $\alpha(\text{swat})$  dipende dall'angolo  $\theta$  con cui la fotocamera del satellite ha ripreso il sito archeologico che stiamo studiando rispetto alla direzione nadirale. Se la ripresa è eseguita dallo zenit allora  $\theta = 0$ , altrimenti il valore di tale angolo (detto "angolo di swat") è maggiore di 0 e può arrivare a seconda del satellite e delle condizioni di ripresa anche a valori dell'ordine di  $25^\circ$ .

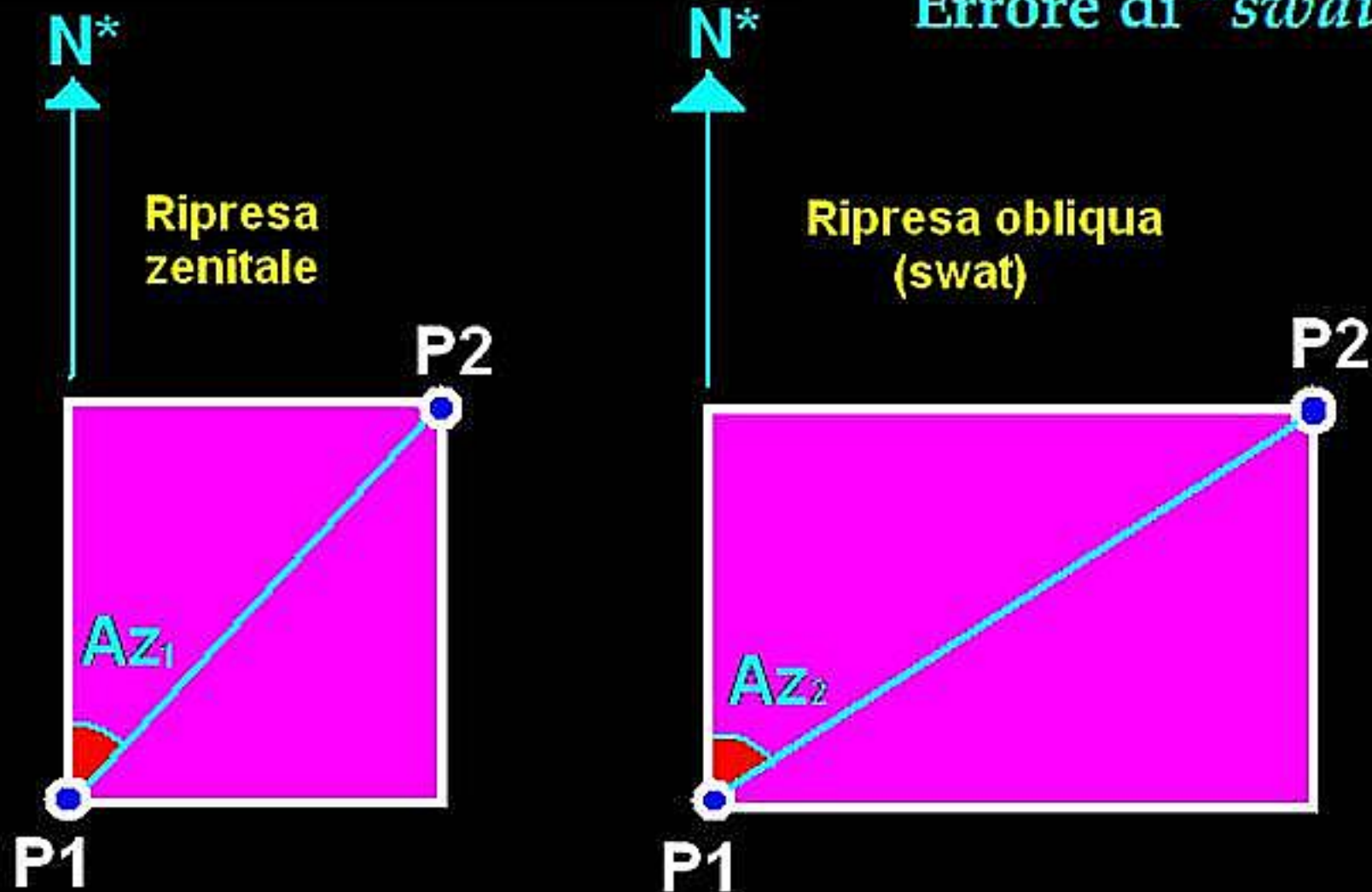
# Errore di "swat"



$$L_{\theta D} = L_0 \sec \theta \quad \text{ortogonale alla direzione di scansione (L1)}$$

$$L_{\theta L} = L_0 \sec^2 \theta \quad \text{parallelo alla direzione di scansione (L2)}$$

# Errore di "swat"



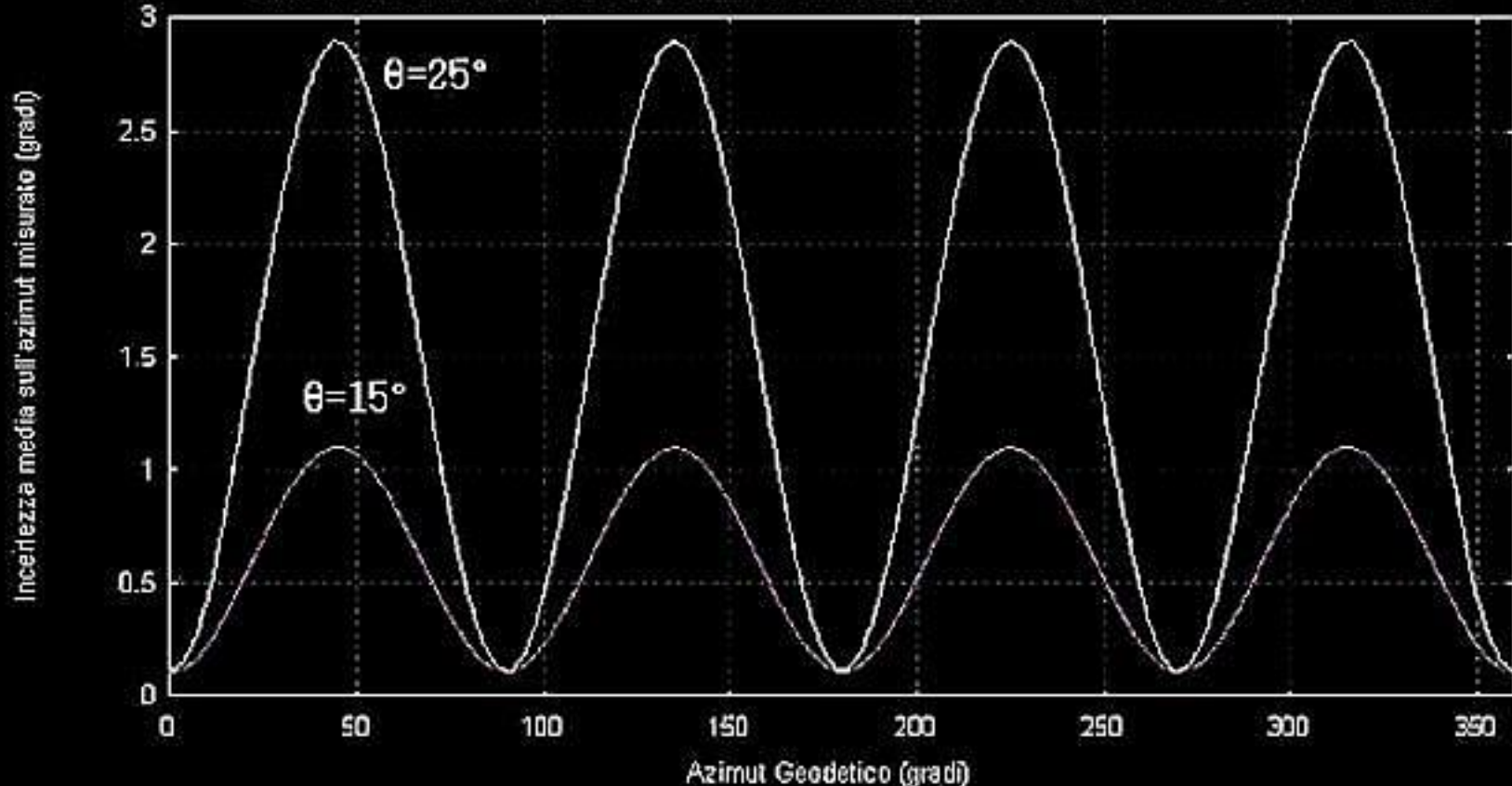
$$Az_1 < Az_2$$

## Errore di "swat"

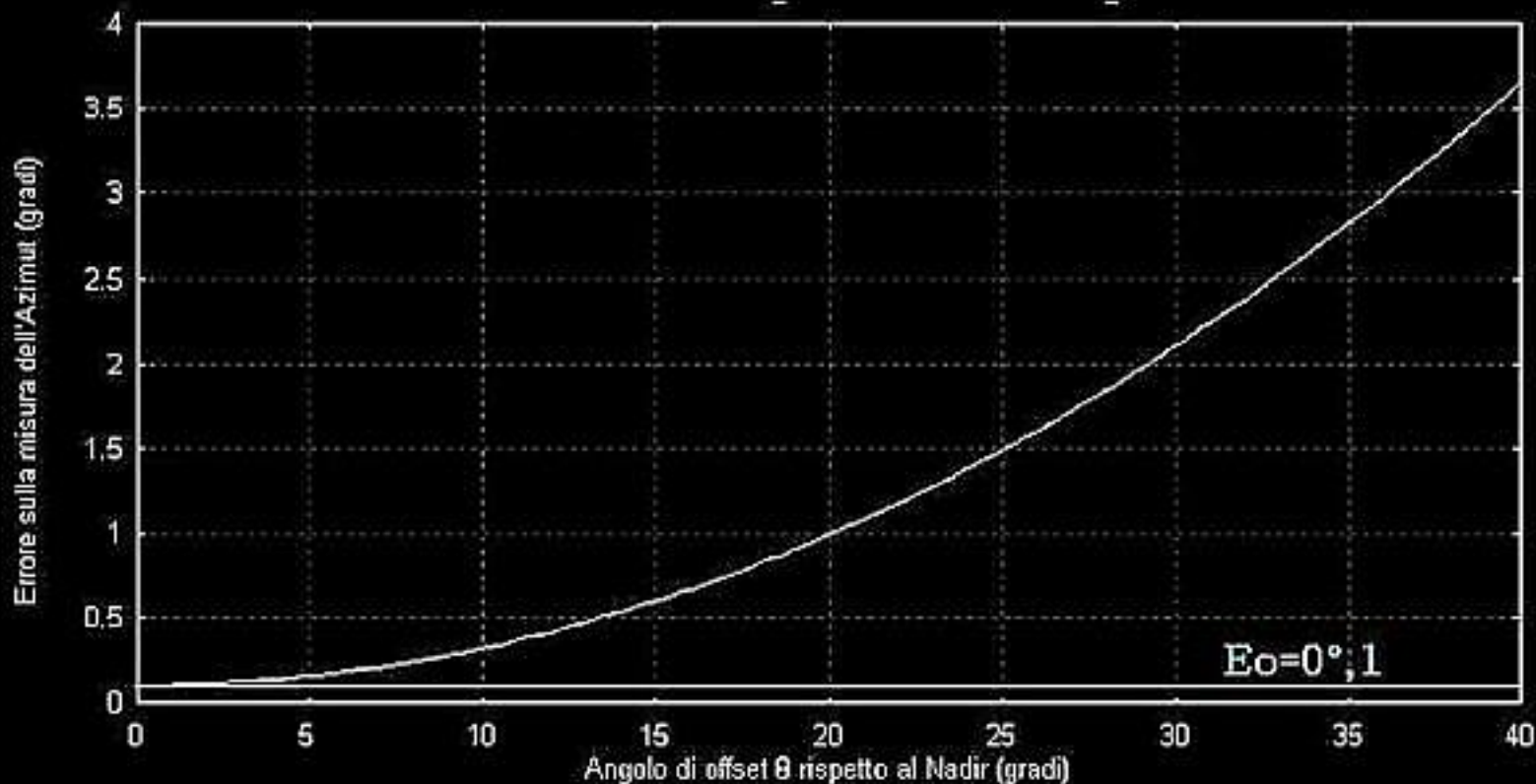
$$\xi(\text{swat}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\theta}{15^\circ} \right]^2 (1 - \cos(4 \cdot Az)) + \dots$$

Tale errore dipende sia dall'angolo di non nadiralità della ripresa del satellite, ma anche dall'azimut astronomico di orientazione della linea da misurare in quanto la deformazione degli elementi visibili sull'immagine dipende anche dalla loro posizione rispetto alla traiettoria percorsa dal satellite. La formula riportata assume che il satellite che riprende sia in orbita polare altrimenti l'azimut  $Az$  deve essere sostituito aumentato dell'inclinazione orbitale del satellite rispetto ai meridiani dell'ellissoide WGS84.

Andamento dell'errore sulla misura degli Azimut geodetici posto  $\epsilon_0=0^\circ,1$



Andamento dell'errore sulla misura dell'azimut geodetico di un allineamento per effetto dell'errore di "swat" nel caso di  $\theta=25^\circ$  e  $\theta=15^\circ$  in funzione dell'azimut dell'allineamento da misurare. Nella figura è stato aggiunto anche l'errore di rilievo dell'operatore assunto pari a  $0^\circ,1$ .



Dati relativi all'angolo  $\theta$  di offset nel caso di alcuni satelliti

	Eros A1	Ikonos	QuickBird	Spot 5
Massimo angolo al nadir	$0^\circ-45^\circ$	$0^\circ-26^\circ$	$0^\circ-25^\circ$	$0^\circ-31^\circ$
Medio angolo al nadir	$0^\circ-15^\circ$	$0^\circ-10^\circ$	$0^\circ-15^\circ$	$0^\circ-15^\circ$

Andamento dell'errore sulla misura dell'azimut geodetico di un allineamento per effetto dello "swat" in funzione di  $\theta$  e trascurando la variazione dovuta all'azimut dell'allineamento. Nella figura è stato aggiunto anche l'errore di rilievo dell'operatore assunto pari a  $0^\circ, 1$ .



# Errore di Georeferenziazione

Prima di poter utilizzare l'immagine ripresa dal satellite è necessario applicare una serie di correzioni geometriche (georettificazione) che consistono in una procedura di correzione effettuata sui dati di una immagine o per eliminare gli errori di geometria prodottisi nella fase di ripresa a causa dell'assetto della piattaforma, del tipo di sensore, della morfologia della scena, o comunque per variare le sue caratteristiche geometriche. Viene applicata al fine di migliorare la coerenza geometrica di una immagine nel caso che debba essere utilizzata a scopi cartografici oppure debba essere messa a registro con altri dati (multitemporale). A questo proposito risulta utile spendere alcune parole per chiarire la problematica in funzione delle esigenze dell'utilizzo delle immagini dal punto di vista archeoastronomico.

## La georeferenziazione

Immagine  
Corretta

Immagine Originale



**L'errore di georeferenziazione e georettificazione dipende dal metodo utilizzato per georeferenziare e georettificare l'immagine e dall'algoritmo di interpolazione della immagine georeferenziata e georettificata**

## Distribuzione di probabilità dell'errore di georeferenziazione

A questo punto che dire dell'errore di georeferenziazione  $\epsilon(\text{georef})$  sugli azimut astronomici misurati sulle immagini? Prima di tutto è che è difficilissimo da valutare caso per caso, ma statisticamente possiamo affermare che la sua entità è dell'ordine da  $\pm 1^\circ$  ai  $\pm 2^\circ$  se la georeferenziazione è stata fatta mediamente bene. L'esperienza ha mostrato che l'errore di georeferenziazione segue abbastanza bene la seguente funzione densità di probabilità:

$$f(A) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-2(A-A_0)^2}$$

in cui  $A$  è l'azimut astronomico misurato e  $A_0$  è quello vero dell'allineamento.

**Per l'Archeoastronomia  
l'errore di georeferenziazione  
deve essere inferiore a 1°**

**Le immagini di LANDSAT non sono  
molto buone d questo punto di vista**

Attualmente le immagini fornite da Digital Globe e ottenute dai satelliti:



Spot 4



GeoEye A



QuickBird



Ikonos 2



ASTER

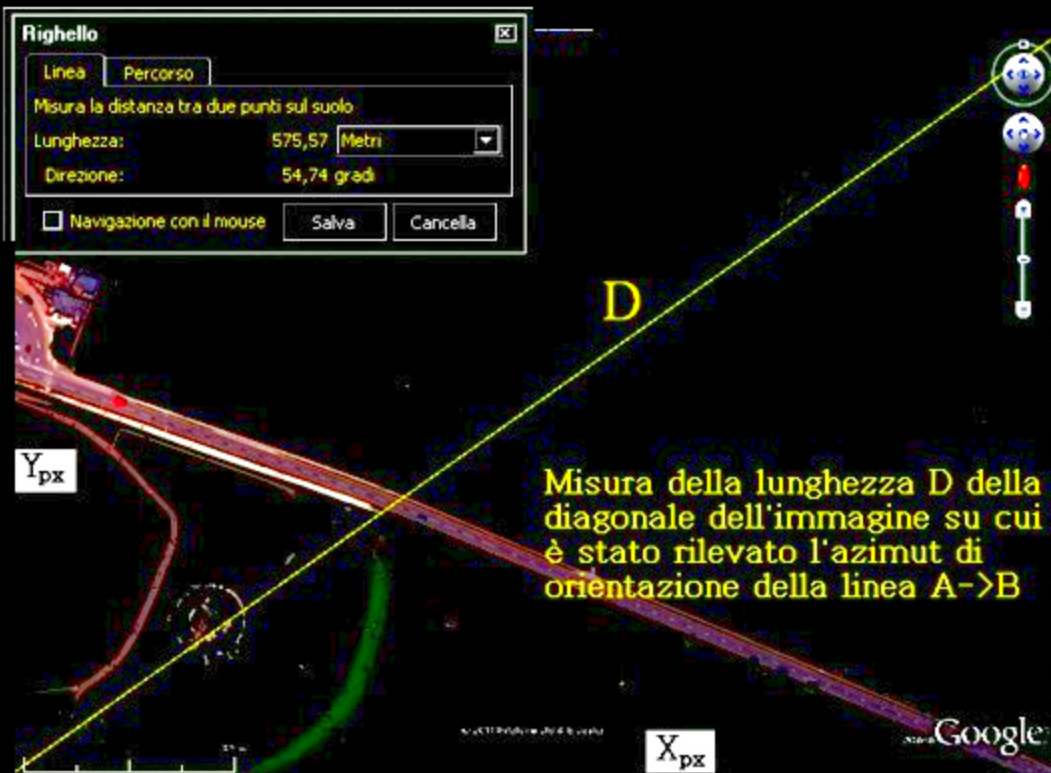
Sono georeferenziate molto bene:  $e(Az) < 0,5$   
...ottime per l'Archeoastronomia

# Metodo pratico per valutare l'errore complessivo sulla misura dell'azimut astronomico degli allineamenti sulle immagini satellitari

$$\varepsilon(Az) = B \frac{D}{d} \quad (\text{gradi})$$

**B(...)** è una funzione di molte variabili

Misura della diagonale dell'immagine

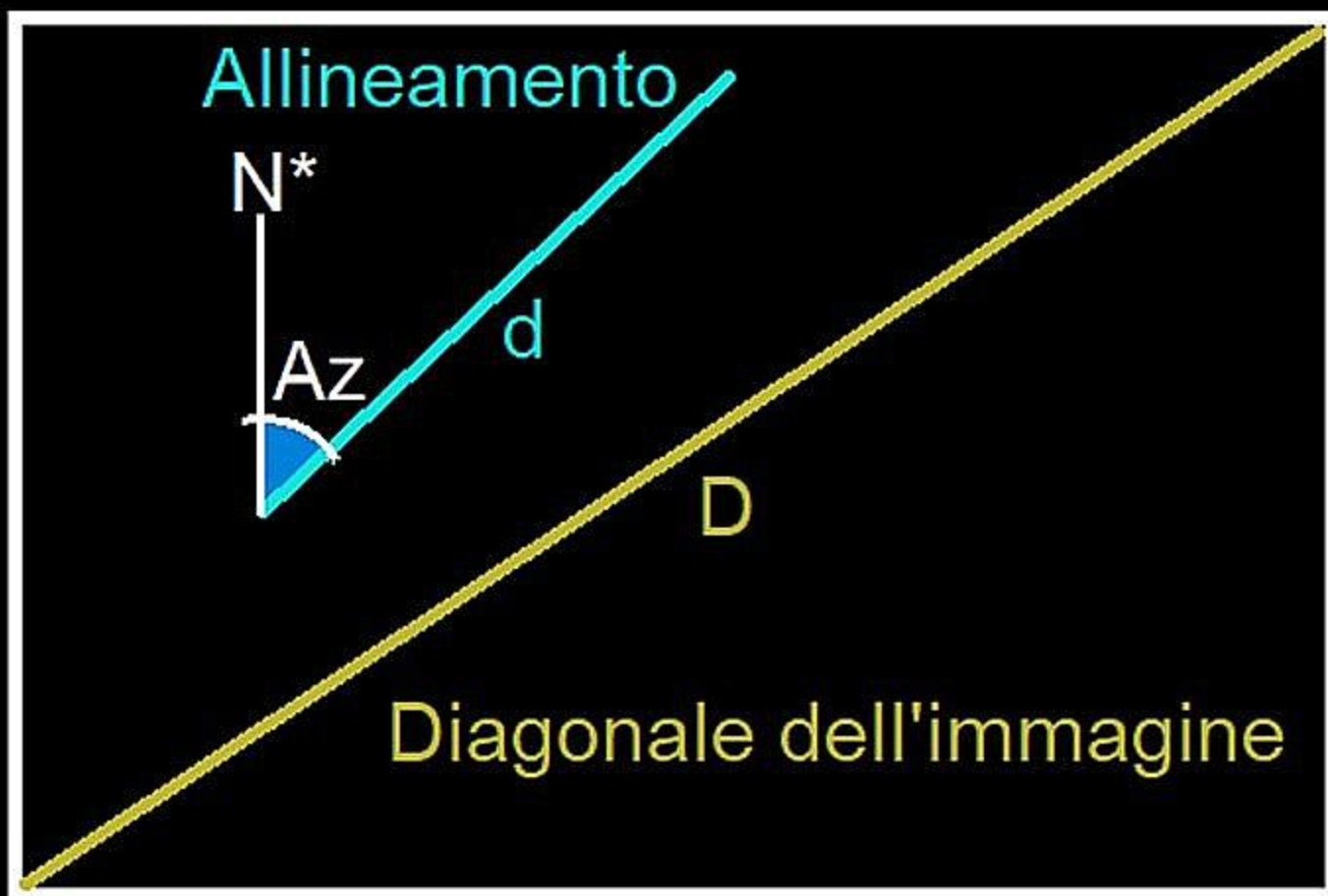


Una buona stima dell'errore  $\varepsilon(Az)$  sull'azimut di orientazione della linea A->B, in gradi, dovuto all'operatore che esegue la misura può essere statisticamente ottenuta mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon(Az) = \frac{360^\circ \cdot Q_{px}}{\pi \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{X_{px}^2 + Y_{px}^2}} \cdot \frac{D}{d} \quad (\text{gradi})$$

in cui D è la lunghezza della diagonale dell'immagine e "d" è la lunghezza della linea di cui è stato misurato l'azimut geodetico di orientazione Az,  $Q_{px}$  è la dimensione in pixels del quadrato che forma l'immagine dei punti estremi della linea che si traccia sulla immagine, quindi l'incertezza sulla determinazione di ciascuno di tali punti,  $X_{px}$  e  $Y_{px}$  sono le dimensioni in pixels dell'immagine visualizzata sul monitor del computer. Le quantità D e "d" possono essere espresse in qualsiasi unità di misura, purché siano le stesse per le due lunghezze sulla stessa immagine.





$$\varepsilon(Az) = 0,1 \frac{D}{d}$$

(gradi)

**B** dipende dalle caratteristiche di rappresentazione dell'immagine sul monitor del computer dove l'Azimut astronomico dell'allineamento viene misurato:

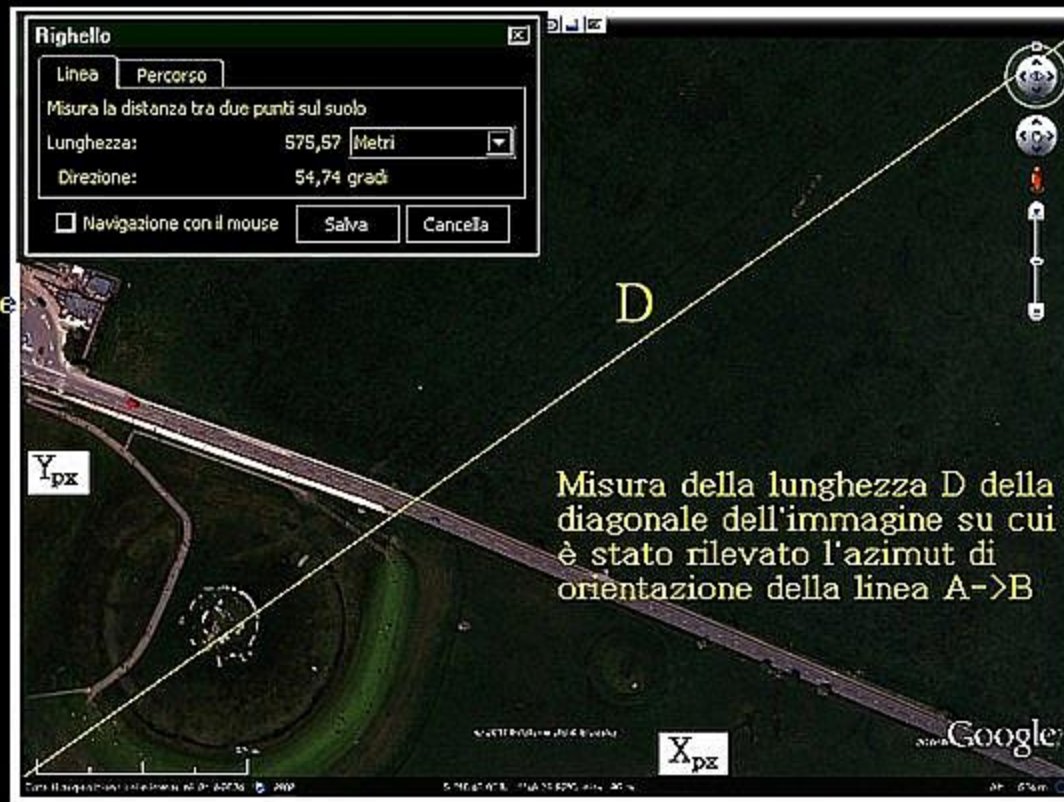
$$B = \frac{360^\circ \cdot Q_{px}}{\pi \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{X_{px}^2 + Y_{px}^2}} \quad (\text{gradi})$$

$Q_{px}$  = dimensione del pixel iniziale e terminale della linea che misura l'allineamento, oppure il suo spessore.

$X_{px}$ ,  $Y_{px}$  = dimensioni, in pixel, dell'immagine rappresentata sul monitor del computer

Alla fine **B** dipende dalla scheda grafica del computer. Maggiore è la risoluzione, minore sarà **B** e gli Azimut degli allineamenti saranno misurabili più accuratamente.

Misura della diagonale dell'immagine



Misura della lunghezza D della diagonale dell'immagine su cui è stato rilevato l'azimut di orientazione della linea A->B

Una buona stima dell'errore  $\varepsilon(Az)$  sull'azimut di orientazione della linea A->B, in gradi, dovuto all'operatore che esegue la misura può essere statisticamente ottenuta mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon(Az) = \frac{360^\circ \cdot Q_{px}}{\pi \sqrt{\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{X_{px}^2 + Y_{px}^2}} \cdot \frac{D}{d} \quad (\text{gradi})$$

in cui D è la lunghezza della diagonale dell'immagine e "d" è la lunghezza della linea di cui è stato misurato l'azimut geodetico di orientazione Az,  $Q_{px}$  è la dimensione in pixels del quadrato che forma l'immagine dei punti estremi della linea che si traccia sulla immagine, quindi l'incertezza sulla determinazione di ciascuno di tali punti,  $X_{px}$  e  $Y_{px}$  sono le dimensioni in pixels dell'immagine visualizzata sul monitor del computer. Le quantità D e "d" possono essere espresse in qualsiasi unità di misura, purché siano le stesse per le due lunghezze sulla stessa immagine.

**Righello**

Linea    Percorso

Misura la distanza tra due punti sul suolo

Lunghezza:        57,31    Metri

Direzione:        3,84    gradi

Navigazione con il mouse    Salva    Cancella



**Righello**

Linea    Percorso

Misura la distanza tra due punti sul suolo

Lunghezza:        198,13    Metri

Direzione:        234,05    gradi

Navigazione con il mouse    Salva    Cancella



In questo esempio:

$$\varepsilon(Az) = 0^\circ,1 \frac{198,13}{57,31} = 0^\circ,35$$

quindi:

$$Az = 3^\circ,8 \pm 0^\circ,4$$

Una buona stima dell'errore  $\varepsilon(Az)$  sull'azimut di orientazione della linea A->B, in gradi, dovuto all'operatore che esegue la misura può essere statisticamente ottenuta mediante la seguente relazione:

$$\varepsilon(Az) = \frac{1}{10} \frac{D}{d} \left[ 1 + \frac{3}{2} |\ln(I/I_*)| + \dots \right] \quad (\text{gradi})$$

# Esempio

## Stonehenge

Misura dell'azimut di orientazione dello asse della struttura a "ferro di cavallo".

$$Az = 41^{\circ},8 \pm 0^{\circ},5$$



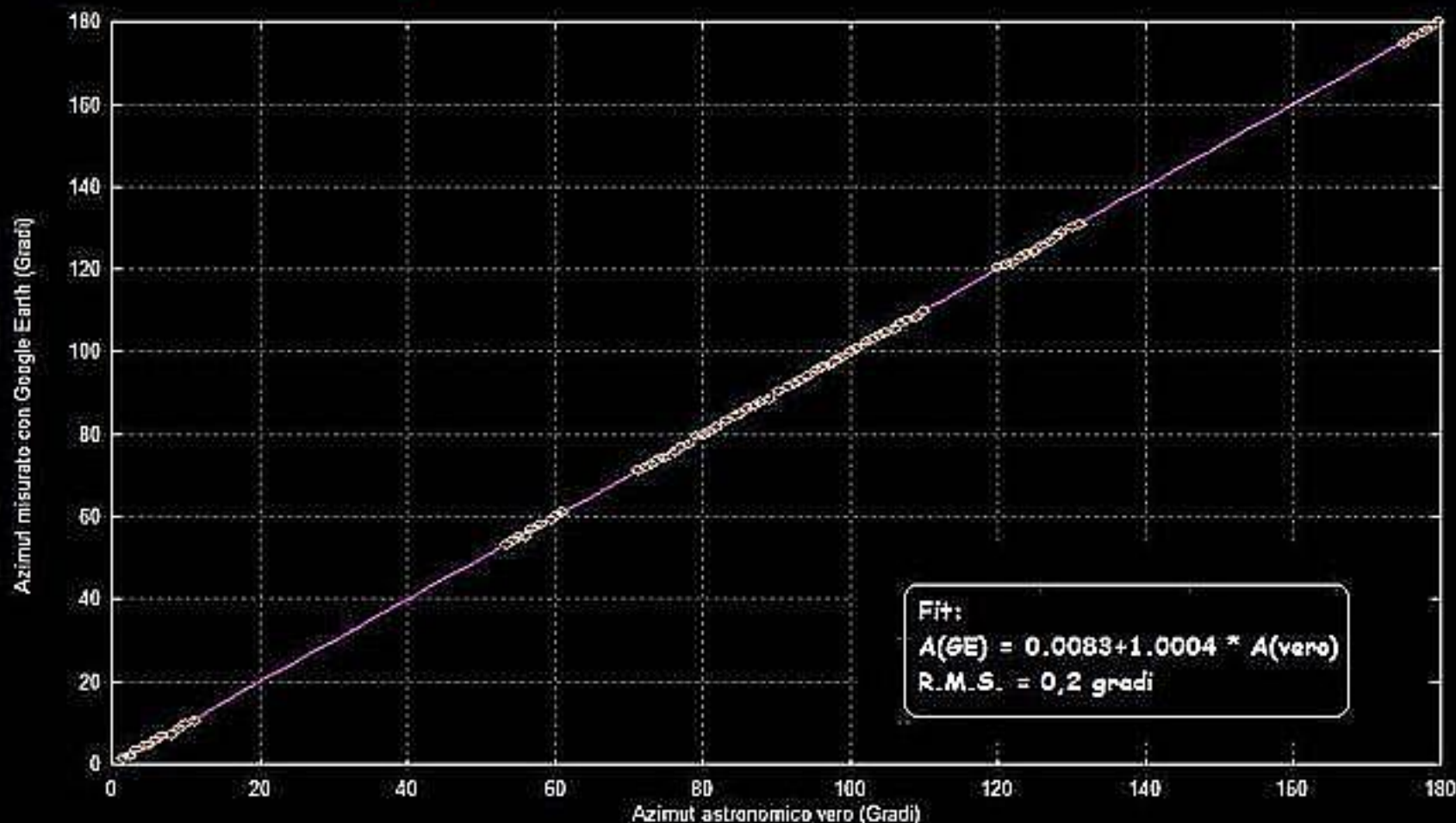
$$Pr(Az) = 2 \cdot 0^{\circ},5 / 360^{\circ} = 0,0028$$

la probabilità che quell'allineamento sia casuale e' pari allo 0,28%, quindi con un livello di probabilità 99,72% tale allineamento non e' casuale.

**B può assumere valori differenti a seconda del metodo utilizzato per misurare l'Azimut astronomico di orientazione sulla stessa immagine.**

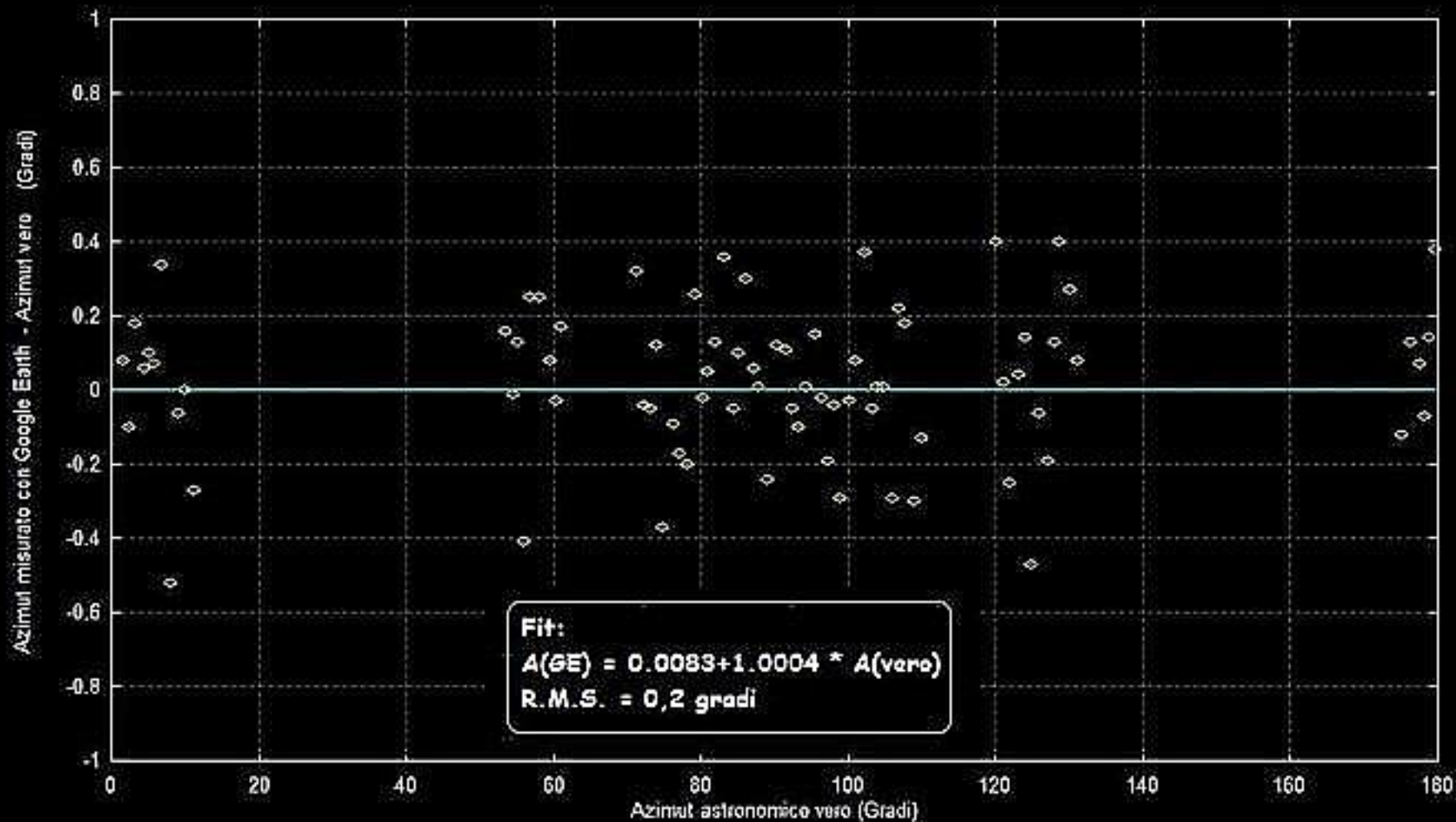
**$B = 0^{\circ},10 - 0^{\circ},15$  va bene per la funzione "righello" di Google Earth**

## Verifica sperimentale dell'errore sull'Azimut



**Confronto tra l'azimut astronomico misurato nei siti e quello rilevato sulle immagini di Google Earth con la funzione "righello"**

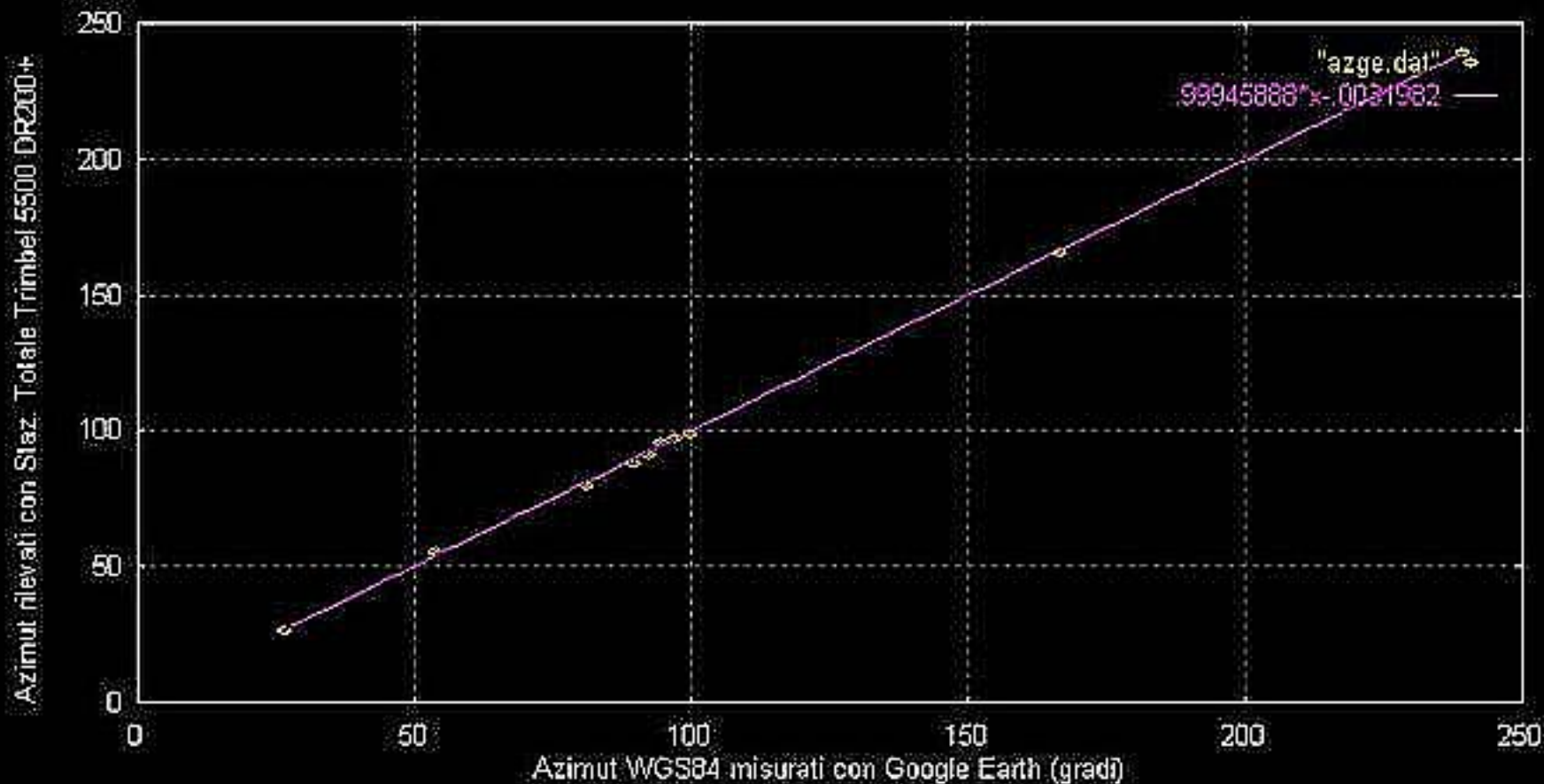
# Verifica sperimentale dell'errore sull'Azimut



**Confronto tra l'azimut astronomico misurato nei siti e quello rilevato sulle immagini di Google Earth con la funzione "righello"**



# Orientazione astronomica chiese di Randazzo (CT)



# Orientazione astronomica chiese di Randazzo (CT)

\*\*\* LSQFIT: Least Square Data Fitting \*\*\*

\*\*\*\*\*

$$Y(x) := A(0) + A(1) x + A(2) x^2 + \dots$$

COEFFICIENTS OF THE FITTED POLYNOMIAL:

	Parameter	Uncertainty
A( 0)=	-1.000573000	.390293300
A( 1)=	1.004168000	.003084519

Chi-squared = .599995E+01

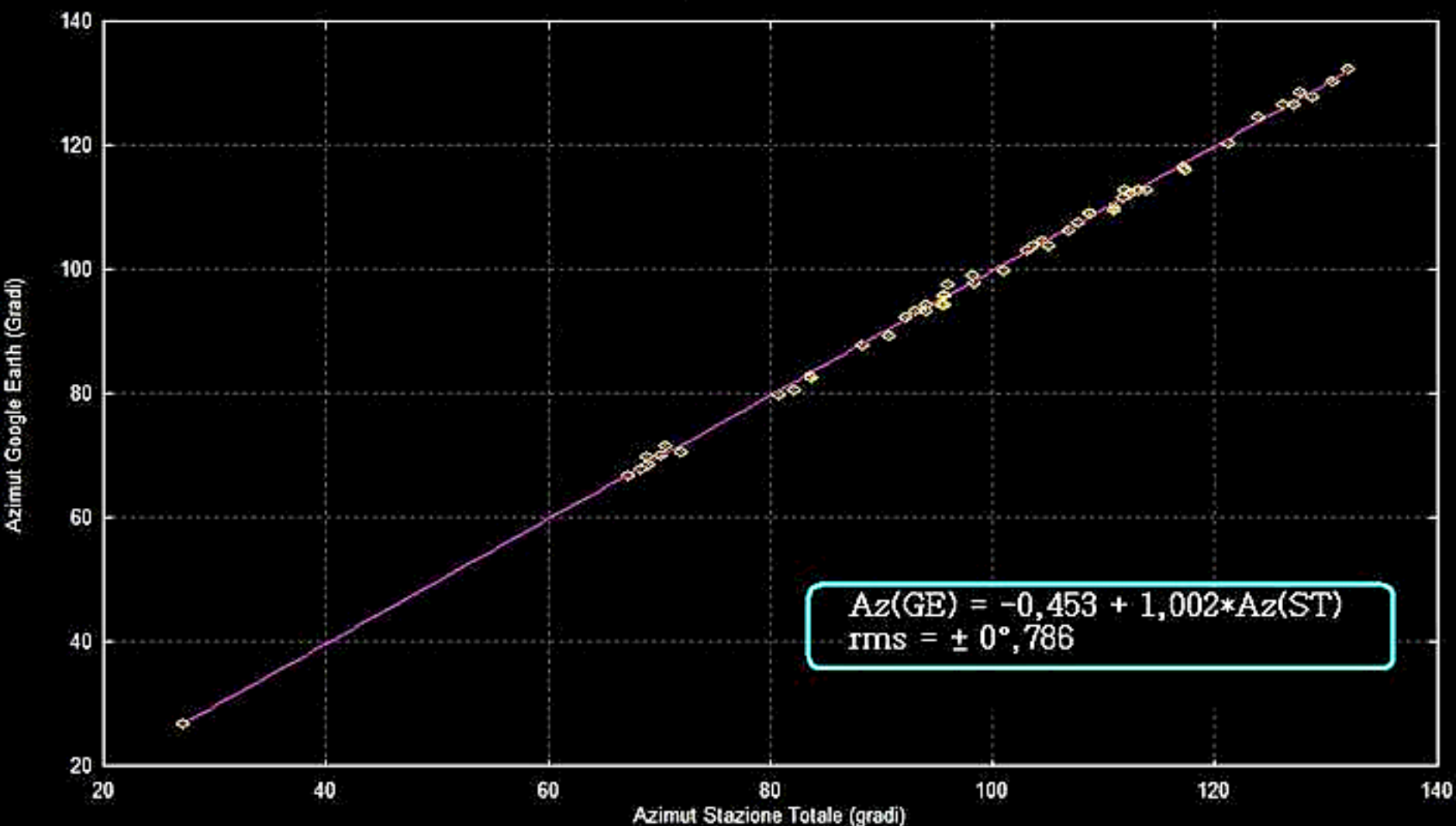
Full covariance matrix

.15E+00	-.11E-02
-.11E-02	.95E-05

x(i)	Y(x)	Ycalc	residual
81.0400000	79.9486000	80.3771800	-4.285812E-001
97.0300000	97.1386000	96.4338300	7.047729E-001
166.5600000	166.1428000	166.2536000	-1.108093E-001
239.0900000	239.3653000	239.0859000	2.793884E-001
89.4300000	88.2160000	88.8021500	-5.861511E-001
92.3500000	91.4319000	91.7343200	-3.024216E-001
26.6800000	26.4189000	25.7906200	6.282749E-001
99.7900000	99.0208000	99.2053300	-1.845322E-001

Number of processed points :	8
Sum of the residuals :	-5.912781E-005
Sum of the squared residuals:	1.6345370
Residual Mean Square (RMS) :	4.832238E-001

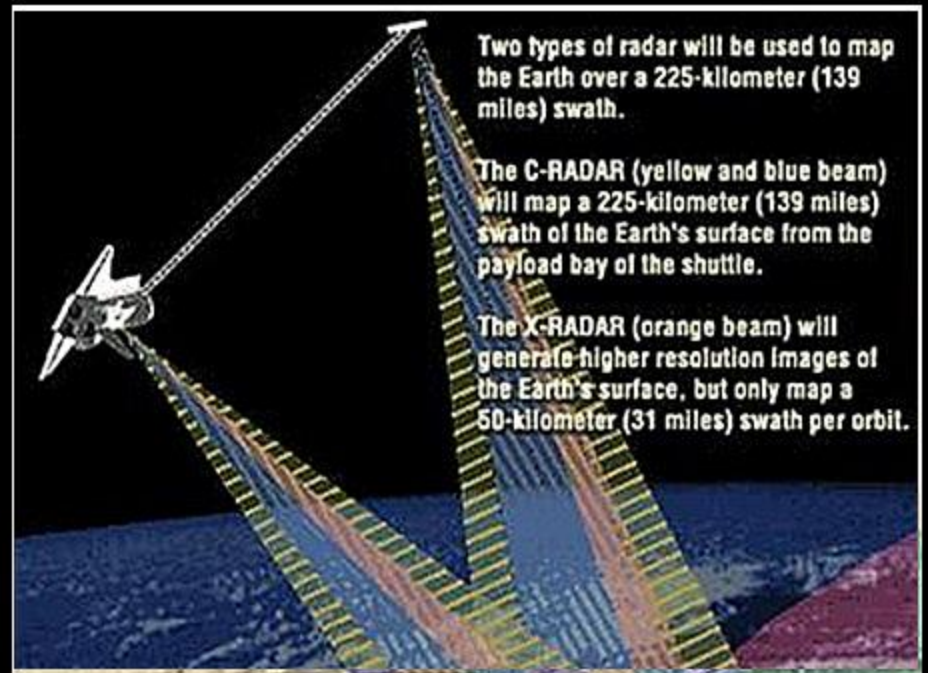
# Chiese della Via Francigena (orientazione della navata)



**L'analisi archeoastronomica di un  
sito archeologico non può  
prescindere dalla conoscenza  
dettagliata del profilo dell'orizzonte  
naturale locale lungo le direzioni  
degli allineamenti**

# SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)

Nel Febbraio 2000 lo Space Shuttle Endeavour ottenne in 11 giorni la mappatura radar completa in alta risoluzione della superficie terrestre ad intervalli di 90 metri per ogni punto del pianeta



**SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)**

# **Bande Radar**

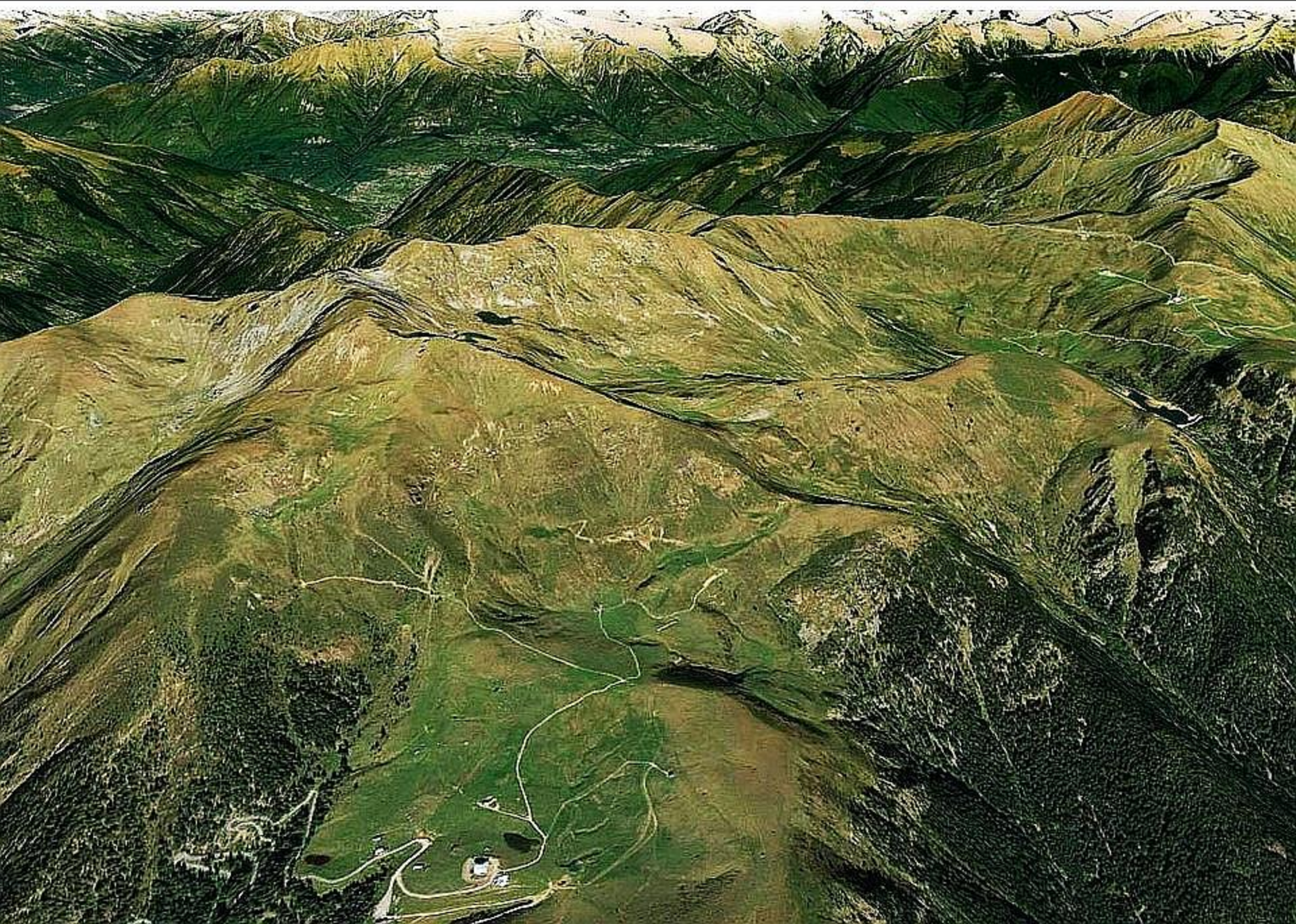
**Lo Shuttle operò in 2 bande Radar**

**La banda C produsse la mappatura radar ad una campionatura di 90 metri.**

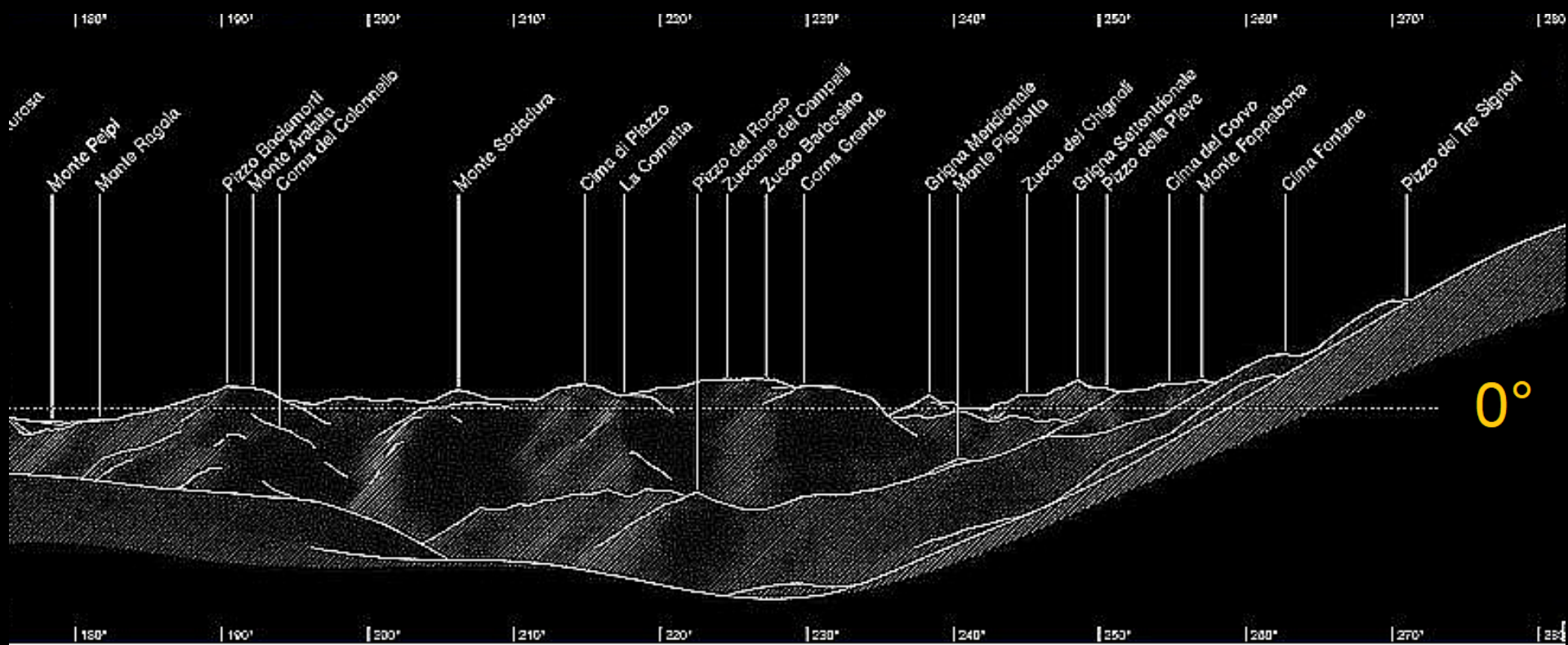
**La banda X produsse una campionatura più fitta (30 metri) di alcune celle della banda C**

**i dati DEM a 90 metri sono scaricabili gratuitamente da internet**

# Piani del Monte Avaro - Modello digitale 3D



# Sintesi SRTM del profilo dell'orizzonte naturale locale visibile da un sito archeologico



Azimut (gradi)



Per  
Approfondire...

Adriano Gaspani

# Archeoastronomia Satellitare

Tecniche moderne per il rilievo e lo  
studio dei siti archeologici di rilevanza  
astronomica.



Collana Manualistica

# Indice

Introduzione.....	pag. 9
L'Archeoastronomia.....	pag. 12
La metodologia.....	pag. 18
<b>Parte I - Tecniche tradizionali.....</b>	<b>pag. 22</b>
La Topografia.....	pag. 22
Il campo topografico.....	pag. 23
Storia della topografia.....	pag. 25
Alcuni strumenti topografici.....	pag. 26
Coniometri.....	pag. 26
La Stazione totale.....	pag. 27
Gli orientamenti delle griglie di scavo negli scavi archeologici.....	pag. 28
Azimut e Altezza.....	pag. 31
Le misure di Azimut e di Altezza angolare Apparente.....	pag. 35
Il rilievo del profilo dell'orizzonte naturale locale.....	pag. 40
Gli strumenti di misura dell'Archeoastronomia.....	pag. 42
I Longimetri.....	pag. 42
Il Teodolite ottico-meccanico reinteratore (T.O.M.R.).....	pag. 43
Condizioni di esattezza del Teodolite.....	pag. 47
Tipi di teodolite.....	pag. 49
La Collimazione.....	pag. 51
Letture al cerchio orizzontale e misure di angoli azimutali.....	pag. 52
La regola di Bessel.....	pag. 52
Misura di un angolo azimutale fra due direzioni.....	pag. 53
Rilevazioni.....	pag. 53
Misura degli angoli azimutali per giro di orizzonte.....	pag. 54
Metodo a strati.....	pag. 54
Metodo per angoli semplici.....	pag. 54
Metodo delle combinazioni binarie.....	pag. 55
Metodo delle direzioni isolate.....	pag. 55
Letture al cerchio verticale.....	pag. 55
Angolo zenitale.....	pag. 56
Misurazione delle distanze con il metodo Stadimetrico.....	pag. 57
La rilevazione degli allineamenti astronomici.....	pag. 60
<b>Parte II - Tecniche satellitari GPS.....</b>	<b>pag. 68</b>
I sistemi di riferimento geodetici.....	pag. 68
Il Rigonfiamento equatoriale.....	pag. 70
Il Geoido.....	pag. 75

L'Ellissoide.....	pag. 77
Ellissoide di riferimento.....	pag. 82
Proprietà dell'ellissoide.....	pag. 82
Ellisse definita dalla sezione trasversa.....	pag. 84
Ellissoide triassiale.....	pag. 85
Coordinate geografiche ellittiche.....	pag. 85
Ellissoidi usati per la definizione dei punti sulla Terra.....	pag. 89
Ellissoidi di riferimento per altri corpi celesti.....	pag. 92
<b>La Sfera Locale.....</b>	<b>pag. 93</b>
Il sistema di riferimento nazionale italiano.....	pag. 94
Il sistema di riferimento europeo.....	pag. 95
Il sistema di riferimento globale terrestre.....	pag. 96
Il sistema di riferimento geografico WGS84.....	pag. 96
Il Sistema Convenzionale Terrestre WGS84.....	pag. 98
Deviazione della verticale.....	pag. 100
Corrispondenza del sistema WCS84 con la Sfera Celeste.....	pag. 103
L'Ellissoide WGS84.....	pag. 105
Il modello EGM96 per il Geoido.....	pag. 107
Le coordinate UTM.....	pag. 110
La quadratura del sistema UTM.....	pag. 114
La misura degli azimut astronomici nel reticolato UTM.....	pag. 116
La trasformazione delle coordinate WGS84 nel sistema UTM e viceversa.....	pag. 117
Le formule di trasformazione.....	pag. 119
Le formule di Molodenskij.....	pag. 119
Le formule di Gauss.....	pag. 123
Il sistema GPS.....	pag. 125
La tecnologia del GPS.....	pag. 131
La "Selective Availability" (SA).....	pag. 142
Il "Point Positioning" con misure di codice.....	pag. 143
La misura delle quote altimetriche.....	pag. 146
Il sistema GLONASS.....	pag. 149
Le applicazioni nel campo dell'Archeoastronomia.....	pag. 151
Procedure operative per l'esecuzione di operazioni geo-topografiche GPS ad uso archeoastronomico.....	pag. 156
Programmazione del rilevamento.....	pag. 163
La scelta dei punti di stazione.....	pag. 163
La configurazione della costellazione dei satelliti.....	pag. 165
Perdita di segnale a causa delle ostruzioni.....	pag. 172
Trasporto del punto di stazione.....	pag. 178
Determinazione di una base GPS mediante due ricevitori simultanei.....	pag. 180
Stato di "satete" dei satelliti.....	pag. 181
Tempi di acquisizione.....	pag. 182
Esecuzione del rilevamento.....	pag. 184

Messa in stazione del ricevitore.....	pag. 184
Posizione del centro di fase dell'antenna.....	pag. 186
Inizio e termine della sessione di misura.....	pag. 189
Condizioni meteorologiche.....	pag. 191
Fine della sessione di misura.....	pag. 192
Accuratezza ottenibile con il protocollo C/A.....	pag. 193
L'errore di posizionamento.....	pag. 193
La posizione media e i limiti di confidenza per la posizione vera.....	pag. 203
Miglioramento dell'accuratezza di rappresentazione del posizionamento planimetrico di un ricevitore satellitare GPS.....	pag. 207
Metodo "non pesato".....	pag. 208
Metodo "pesato".....	pag. 209
L'ellisse d'errore.....	pag. 212
Incertezza sull'azimut geodetico di una base GPS.....	pag. 213
La rilevazione degli allineamenti presenti in un sito archeologico.....	pag. 216
La rilevazione diretta delle orientazioni.....	pag. 216
L'orientazione delle griglie di scavo.....	pag. 219
Il GPS in combinazione con altri strumenti di rilevazione.....	pag. 222
Procedure pratiche di rilevamento GPS dei siti archeoastronomici	
Rilevamento degli allineamenti utilizzando una singola base GPS.....	pag. 224
Rilevamento utilizzando simultaneamente più basi GPS.....	pag. 228
Rilevamento "ex line".....	pag. 230
Rilevamento degli allineamenti utilizzando una singola base GPS e la bussola topografica.....	pag. 235
<b>Parte III - Tecniche di telerilevamento per lo studio archeoastronomico dei siti archeologici.....</b>	<b>pag. 244</b>
Telerilevamento e Satelliti.....	pag. 244
Un po' di storia.....	pag. 245
Utilizzo delle immagini satellitari.....	pag. 249
Tipologie di telerilevamento.....	pag. 251
Risoluzioni e dati.....	pag. 252
I satelliti ottici.....	pag. 255
Principali vantaggi delle immagini satellitari.....	pag. 256
Risoluzione e precisione.....	pag. 257
Elaborazione dei dati.....	pag. 259
Vantaggi della ripresa satellitari.....	pag. 260
Svantaggi della ripresa satellitare.....	pag. 262
Campi di applicazione.....	pag. 263
L'informazione contenuta nelle immagini riprese da satellite.....	pag. 263
La correzione degli errori.....	pag. 271
Elaborazione delle misure, interpretazione e classificazione.....	pag. 275
Le piattaforme.....	pag. 278
Alcuni satelliti a confronto.....	pag. 279
Valutazione delle potenzialità delle immagini	

da satellite ad alta risoluzione per le applicazioni archeoastronomiche .....	pag. 282
<b>La misura degli azimut astronomici di orientazione</b> .....	pag. 287
Misura dell'azimut astronomico utilizzando le coordinate geografiche di due punti rilevati sulle immagini .....	pag. 291
<b>Sorgenti di errore nella misura degli azimut geodetici di orientazione sulle immagini satellitari</b> .....	pag. 293
L'errore dell'operatore .....	pag. 296
<b>Errore di "snuffi"</b> .....	pag. 301
<b>Trattamento delle immagini prima dell'utilizzo per il rilievo degli azimut astronomici di orientazione</b> .....	pag. 306
La georeferenziazione .....	pag. 309
L'errore di georeferenziazione .....	pag. 314
Il ricampionamento (Resampling) .....	pag. 315
L'effetto della topografia: Tortorettificazione Parametrica .....	pag. 319
La valutazione statistica dell'errore nella Georeferenziazione .....	pag. 321
La definizione del Sistema di Riferimento Cartografico (CRS) .....	pag. 323
<b>Google Earth</b> .....	pag. 325
Le immagini di Google Earth .....	pag. 327
Errori di Google Earth .....	pag. 328
Google Earth Plus .....	pag. 329
Google Earth Pro .....	pag. 330
<b>Bing Maps</b> .....	pag. 330
<b>Altri software</b> .....	pag. 331
La Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) .....	pag. 332
La ricostruzione del profilo dell'orizzonte naturale locale con Google Earth .....	pag. 333
La misura degli azimut astronomici mediante la funzione "righello" di Google Earth .....	pag. 335
Lo zoom dell'immagine .....	pag. 340
Approccio sperimentale .....	pag. 343
<b>Affidabilità degli allineamenti astronomici misurati sulle immagini satellitari</b> .....	pag. 351
Test di verifica di un'ipotesi statistica .....	pag. 352
L'ambito deterministico .....	pag. 353
L'ambito statistico .....	pag. 354
L'ambito archeoastronomico .....	pag. 358
La distribuzione Normale .....	pag. 359
Criterio statistico di Schaefer per un singolo allineamento .....	pag. 366
Livello di incertezza critico per accettare o meno un allineamento .....	pag. 369

Caso generale .....	pag. 371
Caso di N allineamenti indipendenti .....	pag. 374

<b>La probabilità di orientazione casuale nel caso degli allineamenti misurati sulle immagini satellitari</b> .....	pag. 376
---	----------

<b>La valutazione dei risultati dell'analisi Archeoastronomica</b> .....	pag. 380
Il criterio Archeologico .....	pag. 380
Il criterio etnografico .....	pag. 381

<b>Misura dell'azimut astronomico di orientazione delle chiese medioevali sulle immagini satellitari</b> .....	pag. 382
--	----------

<b>Un interessante esempio: le chiese di Randazzo</b> .....	pag. 386
---	----------

<b>Conclusioni</b> .....	pag. 393
--------------------------	----------

<b>Bibliografia</b> .....	pag. 394
---------------------------	----------