

# Arheologie aeriană cu UAV

---

În mod tradițional, arheologia aeriană folosește o multitudine de platforme aeropurtate, cu pilot sau comandate de la sol, pentru achiziția a imaginilor – avioane, elicoptere, baloane sau zmeie, în timp ce altă categorie înrudită de aplicații de interes arheologic sunt cele de teledetecție bazată pe misiuni satelitare.

În ultimii 5 ani asistăm, însă, la un adevărat progres tehnologic în tot ceea ce înseamnă fotografie digitală, senzori foto de mare rezoluție și cu gamă dinamică mare, dar și a algoritmilor de prelucrare fotogrametrică a imaginilor și de obținere a scenelor tridimensionale (pe principiul **SfM** – Structure from Motion), direcția fiind către sporirea accesibilității și automatizare. Dacă coroborăm aceste tendințe cu dezvoltarea incredibilă a platformelor multi-rotor radiocomandate de la sol (susținută, în special, de apariția unei categorii de acumulatori Litiu-Polimer, capabili să ofere foarte multă energie într-un interval scurt), putem spune că asistăm, de fapt, la o revoluție metodologică și conceptuală, nu doar în arheologia aeriană, dar în arheologie în general. Se schimbă, practic, atitudinea și posibilitățile unui arheolog obișnuit (colectiv de arheologi) față de teritoriu, autonomia și flexibilitatea lui crescând exponențial.

Fotografia aeriană din dronă de tip multi-rotor, achiziționată la orice moment din zi sau an, de ori de câte ori este nevoie, într-o varietate de medii, de la cel interior, la pădure, câmp sau mediu urban, va deveni, dacă nu cumva acest lucru s-a și întâmplat, cea mai importantă, flexibilă, rapidă și cu rezultate semnificative, metodă de documentare a unui sit sau monument arheologic, în special ca parte din fluxul de lucru prin care se pot obține, fără mari eforturi sau pregătire specializată, ortofotografii și modele digitale ale terenului sau structurilor arheologice fotografiate.

În particular, datorită obiectivului acestui proiect de a documenta prin teledetecție de joasă altitudine un teritoriu de tip coridor, de mari dimensiuni, experiența de zbor se concretizează și în câteva elemente de bună practică, în care se pune accent pe eficiență: costuri reduse, rapiditate, repetabilitate, automatizare.

## Achiziția fotografiilor

**A. Stabilirea strategiei de achiziție a datelor s-a făcut respectând principiul eficienței, luându-se în considerare următorii factori:**

- autonomie maximă, dar în afara oricărui pericol, de zbor a UAV-ului, calculat pentru greutatea soluției foto aleasă (combinație cameră fot + lentilă - utilă în situația dată)
- distanța maximă acoperită de control radio, în condițiile de relief specifice, între stație și UAV
- puncte de acces în teren (se preferă ca punctul de decolare să fie în mijlocul zonei de acoperit, pentru a se putea executa misiuni radial în jurul punctului și mări, astfel, suprafața fotografiată)
- forma și mărimea suprafeței de teren de acoperit

În proiectul *Limes Transalutanus* misiunile au avut în vedere acoperirea unor obiective liniare (sectoare de drum/val) sau delimitate în suprafață de tipul unor forturi, în condițiile în care UAV-ul

folosit a zburat în etapa a doua de proiectare, în medie, 15 minute. Misiunile liniare simple (traseul dus întors la distanță între liniile parcurse de 200 m) puteau să acopere 1.5 km x 450 m.

## B. Tipuri de misiuni

- misiune programată
- cu navigator (al doilea operator)
- operare liberă

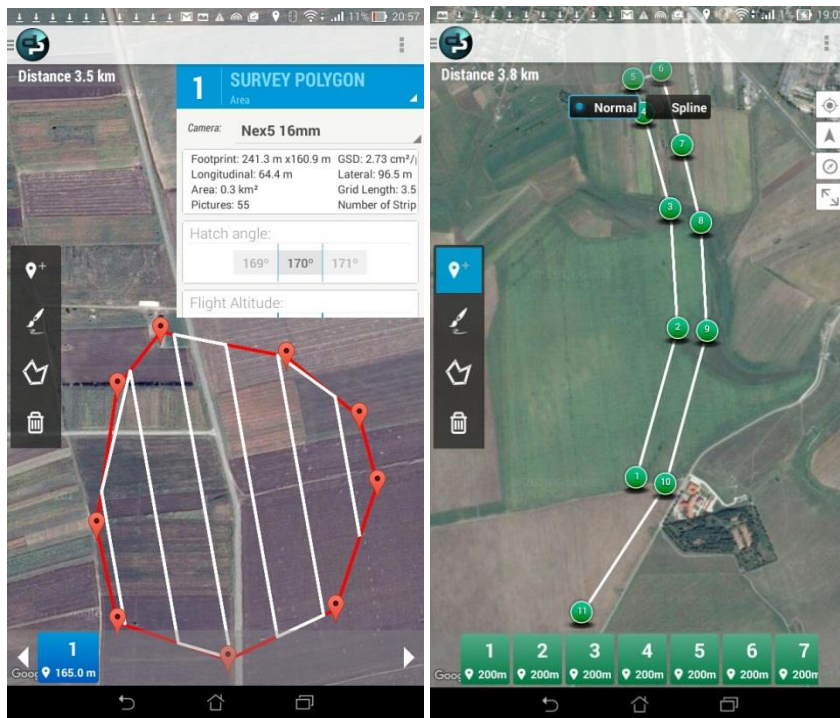


Fig. 1. Exemple de misiuni programate: multi-path (stânga) și liniară simplă (dreapta)



Fig. 2. Misiune cu navigator. Acesta verifică pe o tabletă conectată prin antenă cu UAV parametrii de zbor și deplasarea pe hartă.

## B. Metode de parcurgere a terenului

- liniar simplu (o pereche traseu dus - traseu întors, formată, deci, din două linii paralele, distanțate la 200 m, parcurse la dus cu fața, la întors cu spatele; fotografie cu declanșare automată cu grad de acoperire în lungul traseului de 80% și lateral de 60%)
- liniar multi-path (suprafața de acoperit este împărțită în trasee paralele, cel puțin 4)
- cerc pentru fotografie oblică

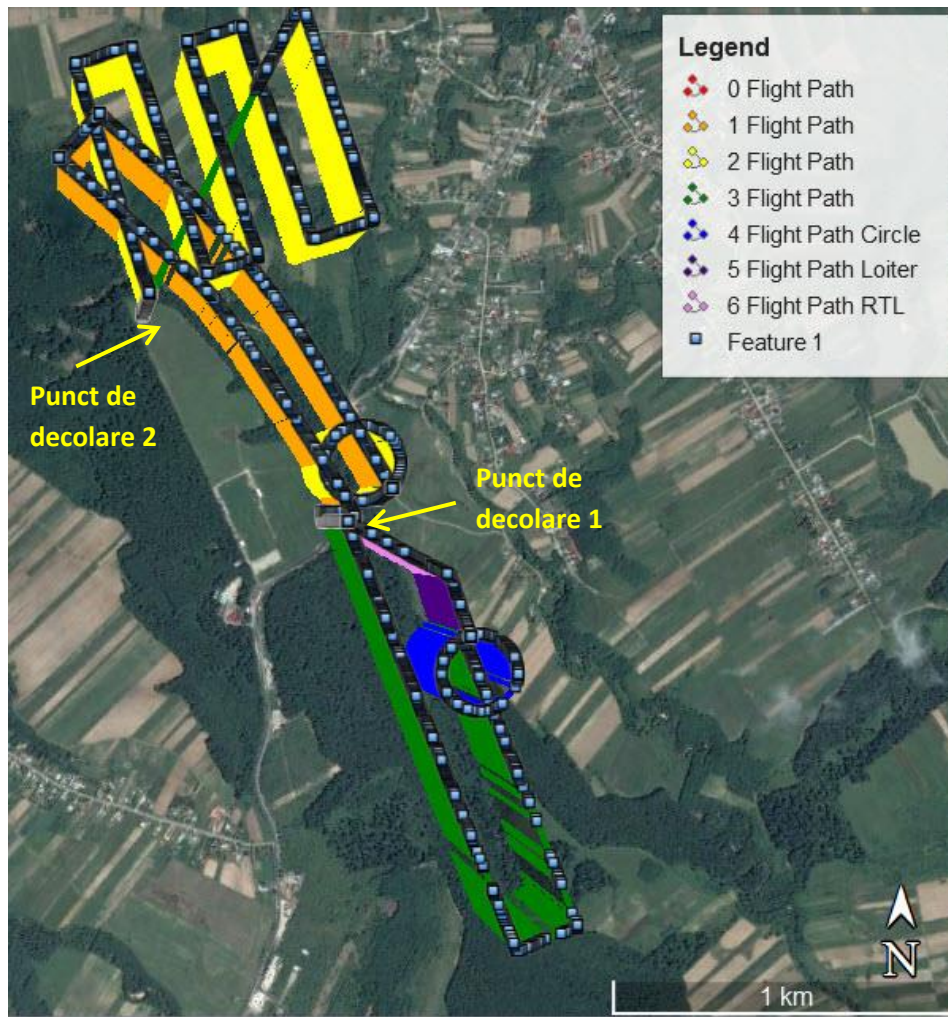


Fig. 3. Exemplu de acoperire a terenului prin executarea a 3 misiuni; două liniare simple combinate cu cerc de oblice (verde și portocaliu), realizate din punctul de decolare 1 și liniar multiplu (galben) realizată din punctul de decolare 2.

## Produsele arheologiei aeriene cu UAV

### I. Primare:

#### A. fotografii oblice (cu unghi de fotografiere între 3° și 90°)

- Dacă nu se vede orizontul (low oblique)



**Aplicații:** se folosesc, alături de un nucleu de imagini verticale, la îmbunătățirea determinării automate a geometriei interne a camerei și lentilei în aplicațiile software ce implementează principiul SfM, contribuind la un calcul mai corect al modelelor digitale de teren

- Dacă se vede orizontul (high oblique)

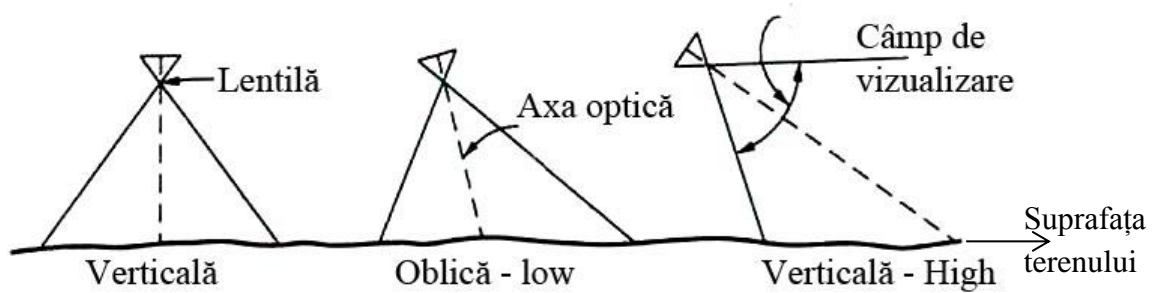


**Aplicații:** suprafața de teren acoperit fiind mai mare decât la alte categorii de fotografii, sunt utile la detecția de anomalii de interes arheologic, oferă perspectivă asupra terenului, pun în conexiune mai multe structuri arheologice

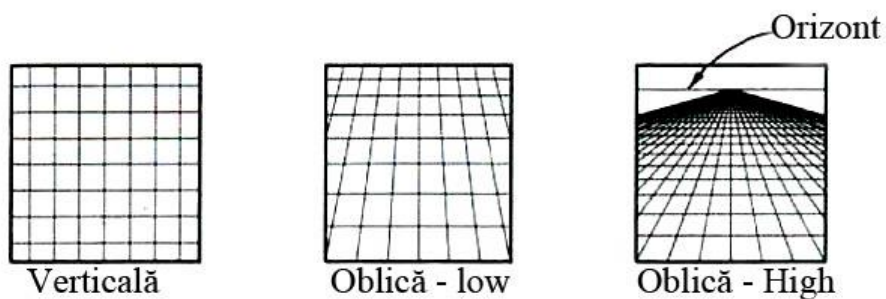
B. verticale pe sol (unghi de fotografiere  $0^\circ$  – true vertical și  $3^\circ$  – slightly tilted)



**Avantajele** fotografiei verticale: scara constantă, distorsiuni minime, detalii maxime



Orientarea camerei pentru diferite tipuri de fotografii



Un grid surprins în diferite tipuri de fotografii

Fig. 4. Categoriile de fotografii aeriene

## Ce echipamente foto am folosit noi

### Categoria Mirrorless

**Camera:** Sony-NEX-5T

**Senzor:** 24mm x 18mm, 16 Mpx

**Greutate:** 276 g

+

Cel mai bun!

**Obiectiv 1 :** zoom Sony: 24 mm (echiv. FF)

**Obiectiv 2:** fix Sigma 28.5 mm (echiv. FF)

**Greutate :** 116 g

**Greutate:** 140 g

### Categoria Compacte

**Camera:** Canon PowerShot SX260HS

**Obiectiv integrat:** zoom: 25 mm (echiv. FF)

**Senzor:** 6.17mm x 4.55 mm, 12 Mpx

**Greutate :** 231 g

**Camera:** FC300S

**Obiectiv :** fix 20 mm (echiv. FF),

**Senzor:** 6.17mm x 4.55 mm), 12 Mpx

**Greutate :** 100 g

*Alegerea soluției foto se bazează pe combinația: dimensiune senzor - rezoluție - lentilă (putere de separare, distorsiuni, diafragmă) - greutate ansamblu. Pentru rezultate optime sunt de preferat lentilele fixe, wide, necorectate electronic, care permit un calcul mai corect, automat, al geometriei interne – un element important în calcularea ulterioară, corectă, a modelelor digitale de teren.*

## II. Secundare (obținute prin prelucrări fotogrammetrice)

### A. mozaic de fotografii verticale (ortofotografie)

Se obține doar din fotografii verticale, pe principii fotogrammetrice. Pentru rezultate corecte sunt necesare minim 3 imagini suprapuse, rezultate excelente fiind atinse în intervalul 5-9 fotografii sau mai mult.

În proiectul *Limes Transalutanus* la o misiune obișnuită rezultă o ortofotografie de 1.5 km x 450 m, adică în jur de 57 ha, la rezoluția de 5 cm/pixel, realizată, în medie, din 90 de fotografii achiziționate în intervalul de altitudine 200 - 300 m, cu grad de suprapunere în lungul traseului de 80% și lateral de 60 %.

La prelucrarea datelor, nu este obligatoriu ca utilizarea unui număr mare de fotografii să însemne o calitate mai bună a produsului final; trebuie căutată valoarea critică minimă la care sunt atinse rezultate consistente și un grad de suprapunere (overlapping) optim; mai multe fotografii înseamnă timp de așteptare la postprocesare mai mari și încărcarea memoriei PC-ului.

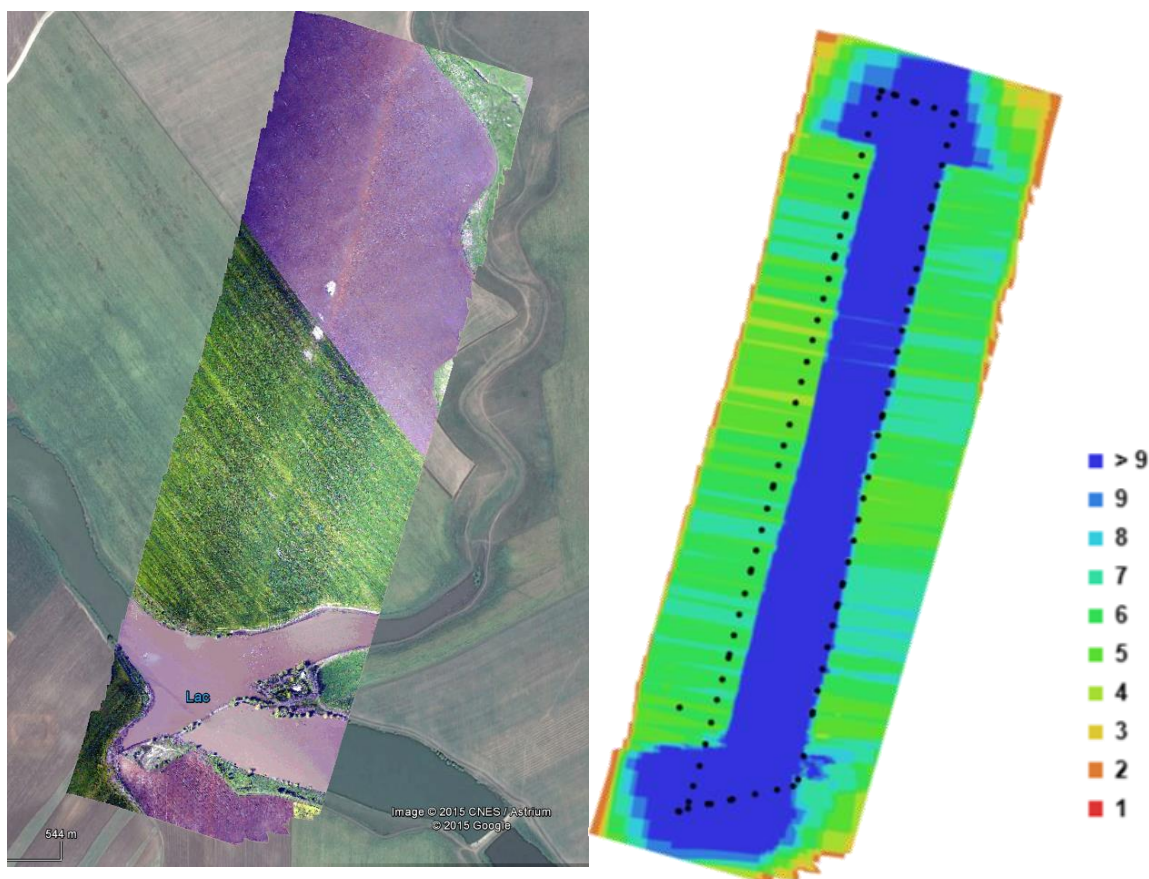
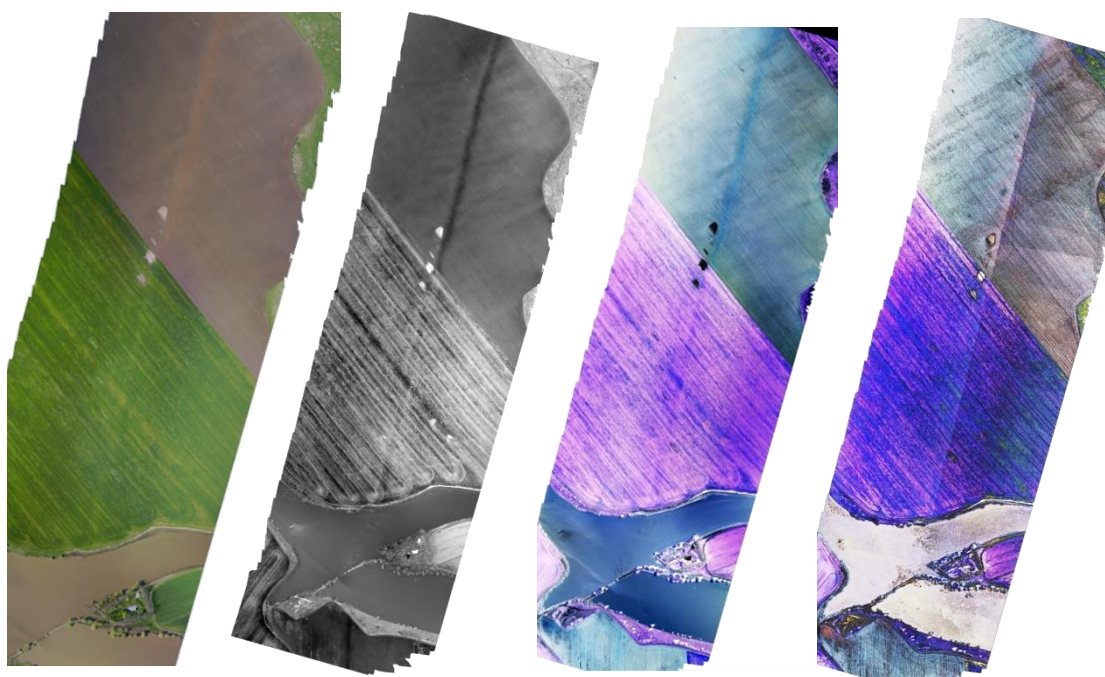


Fig. 5 Ortofotografie realizată din 97 de imagini verticale achiziționate de la altitudinea de 300 m, rezoluție 5 cm/pixel. Exemplu – la nord de Valea Mocanului, lângă Roșiorii de Vede, jud. Teleorman. În dreapta – gradul de suprapunere între fotografiile folosite la realizarea mozaicului. În zonele insuficient acoperite apar distorsiuni. Acestea vor fi decupate.

## Prelucrare imagine

Pentru a pune în evidență în mod suplimentar sau mai clar anomaliile arheologice, uneori, s-a apelat la prelucrarea ortofotografiilor prin aplicarea unor filtre simple.



Normal

HDR  
Curves  
Black&White Selectiv  
pe canale de culoare

HDR  
Curves  
Invert

HDR  
Curves  
Invert  
Fiind Edges

Filtrul Invert colors este potrivit pentru a evidenția anomaliile atunci când terenul este acoperit uniform cu vegetație, iar algoritmul Fiind Edges identifică contururile liniare.

### B. model digital al terenului (DTM)

Folosind principiul *Structure from Motion* mai multe aplicații software disponibile acum comercial sau ca *open source* sunt capabile să extragă (folosind principiul triangulației) dintr-un număr de fotografii aeriene (sau chiar de la sol), realizate din poziții diferite, ale aceleiași scene statice, un nor de puncte (*point cloud*) cu coordonate tridimensionale ce poate fi prelucrat ca un *mesh* – o suprafață continuă, devenind ulterior - model digital al terenului – DTM (Digital Elevation Model)

Modelele digitale ale terenului obținute din imagini aeriene sunt de tip DSM (*Digital Surface Model*), adică descriu suprafața pământului cu tot cu vegetație, clădiri sau drumuri.



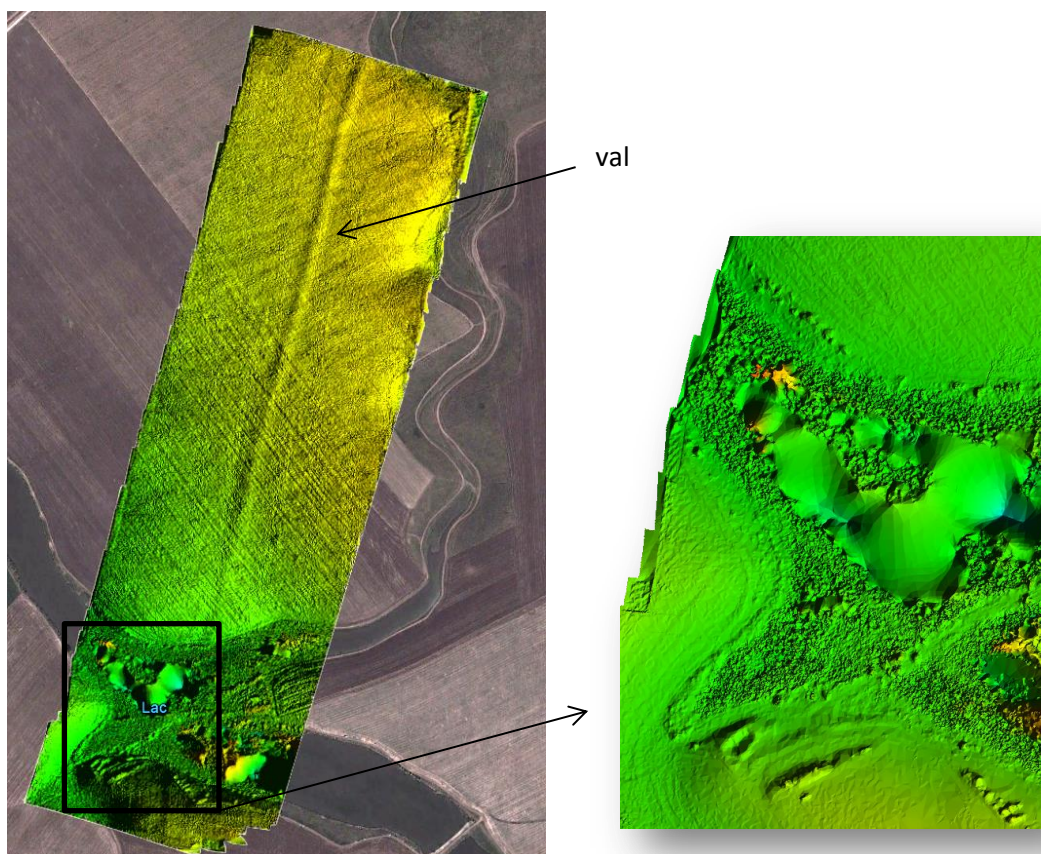


Fig. 6. Model digital al terenului de tip DSM (cu vegetație) obținut din fotografiile aeriene verticale (97) și oblice de tip low (5) - exemplu la nord de Valea Mocanului, Roșiorii de Vede, jud. Teleorman. În detaliul din partea dreapta se pot observa erorile în model generate de prezența luciului de apă (reflectorizant, uniform, lucios).

Exemplu de utilitate al unui model digital al terenului

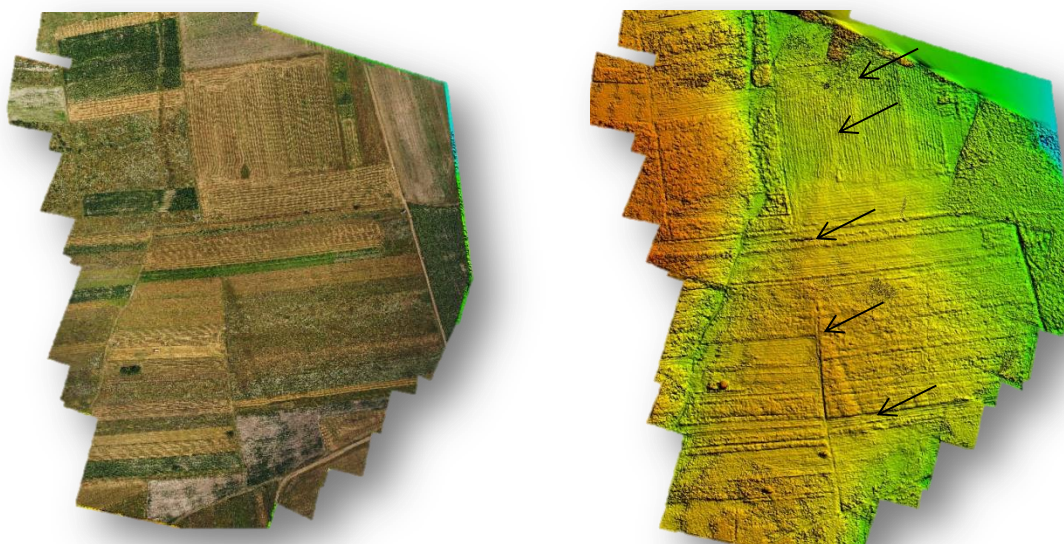


Fig. 7. Stânga - ortofotografie, dreapta - model digital al terenului. Al doilea produs oferă avantajul, în anumite situații, de a vizualiza superior anomaliiile arheologice, în cazul nostru - cotel valului făcut la sud de Pitești, punct Poiana Roșie, invizibil pe ortofotografie.

## Principiul Structure from Motion

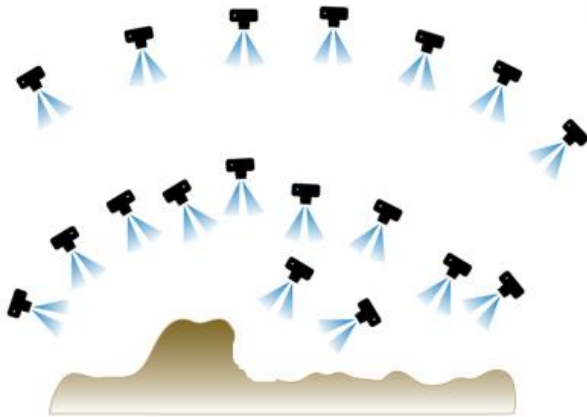


Fig. 8. Fotografiere din unghiuri diferite și de la distanțe diferite a suprafață de teren

multe unghiuri/poziții (surprinzând obiectul/terenul de la diferite distanțe, mai apropiate sau mai depărtate) cu atât rezultatele finale sunt mai corecte. În cazul aplicațiilor de arheologie aeriană, imaginile oblice, de tip *low* (în care nu se vede orizontul) au exact acest rol de a îmbunătăți etapa de *stabilire automată* a parametrilor optici ai camerei. Tot de aceea, utilizarea unei lentile cu performanțe slabe sau excesiv corectată electronic (de software-ul camerei) va conduce la obținerea unui model optic fals.

Termenul de *Structure from Motion* derivă din domeniul mai larg - *computer vision* cu aplicații industriale, în special, legat de identificarea și urmărirea de puncte în secvențe de imagini achiziționate din diferite poziții.

Tehnicile de tip *MVS (Multi View Stereo)* intensifică norul de puncte și elimină erorile creând modele tridimensionale de mare rezoluție, net superioare celor obținute prin metodele anterior cunoscute de tip *stereomatching*.

Dezvoltarea sistemelor de procesare a datelor, inclusiv fără cost, permit, practic, ca datele să poată fi achiziționate cu orice cameră oricât de ieftină cu rezultate rezonabile. Acest lucru este, în mod evident, o evoluție față de aplicațiile software de tip fotogrammetric disponibile anterior pentru care calibrarea camerei foto și utilizarea reperelor erau condiții inițiale esențiale.

Principiul SfM se bazează pe dezvoltări de tip fotogrammetric cu principala diferență că determinarea geometriei interne a camerei și a lentilei, dar și a poziției și orientării lor în spațiu (geometrie externă), conform cărora se operează și corecțiile distorsiunilor imaginilor, se face automat prin identificarea de puncte comune în seturi de fotografii, fără să mai fie nevoie să se utilizeze repere/puncte de control vizual plasate pe suprafața obiectului studiului. Condiția de a avea un grad mare de suprapunere între fotografiile ce descriu un obiect sau o scenă dă și numele procedurii – *structură obținută de un senzor aflat în mișcare*. Cu cât se folosesc imagini din mai

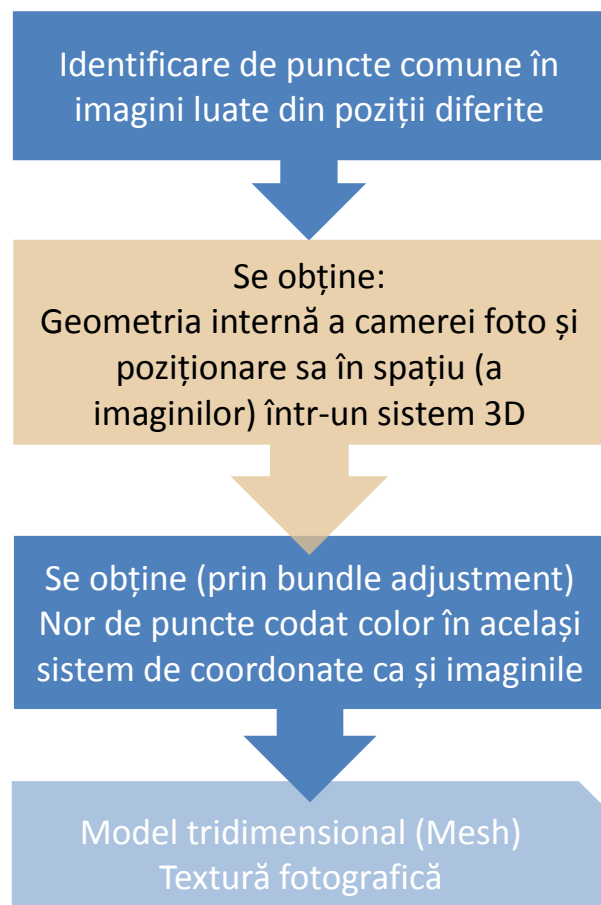
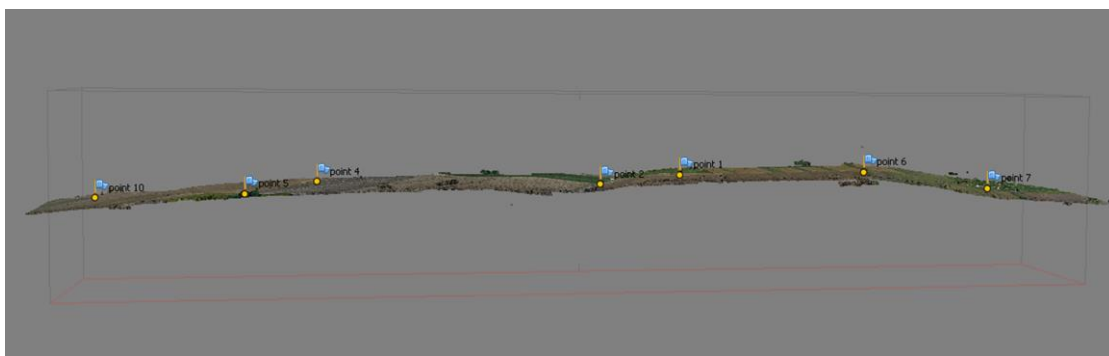
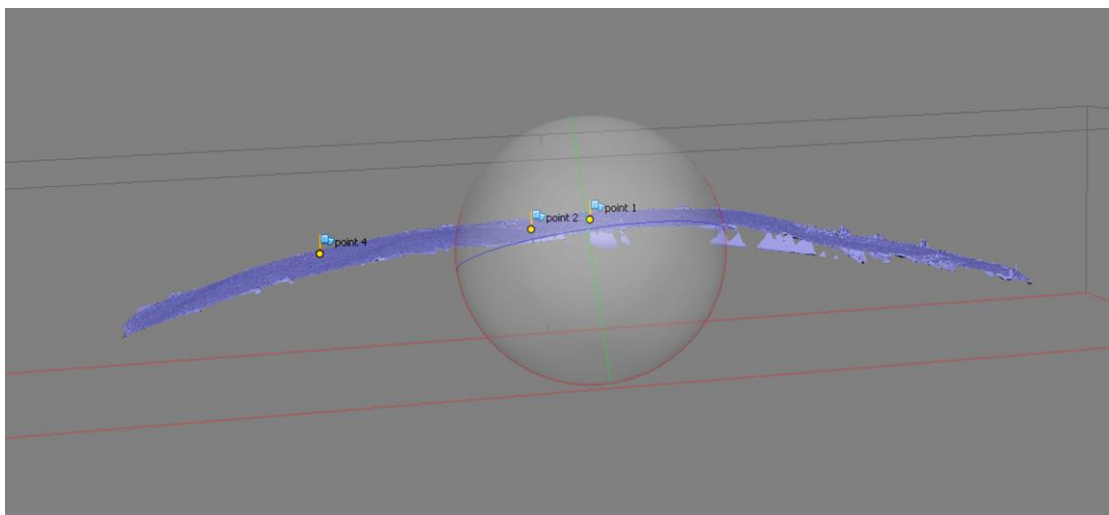


Fig. 9. Etape SfM

## Efectul Dom

Datorită calculării greșite a geometriei interne a camerei și lentilei, din diferite motive (utilizarea unor lentile prea mult corectate electronic, prea puține fotografii oblice folosite, fotografiile neclare cu prea puține detalii) se produce efectul curbării marginilor modelului de teren. Acest efect este mai pronunțat, mai ales în cazul suprafețelor alungite, înguste, cu care avem de-a face în proiectul *Limes Transalutanus* și este o caracteristică a prelucrărilor din aplicația AgiSoft PhotoScan. Această curbura poate fi corectată prin adăugarea de imagini oblice de tip *low* sau prin multiplicarea punctelor de referință spațială (dacă se folosește referențierea manuală)



Suprafață de 2.8 km lungime x 440 m lățime, exemplu de referențiere în doar 3 puncte (sus) și 8 puncte (jos).

## Referențierea spațială

Deoarece aplicațiile de tip SfM funcționează fără calibrare prealabilă sau repere în teren ortofotografiile și modelele obținute sunt corecte geometric ca relații între puncte (fiind obținute pe principii fotogrammetrice), dar într-un sistem arbitrar de coordonate. Pentru introducerea lor în lumea reală, în sisteme de coordonate geografice sau proiectate, acestea trec printr-un proces de **scalare, tranzlație și rotație** (deci referențierea nu modifică geometria internă a modelului!)

Acest lucru se poate întâmpla fie prin stabilirea manuală a unor puncte de referință în imagini (algoritm funcționează deja cu trei, dar ar trebui pentru rezultate mai bune să fie minim 5, distribuite uniform pe toată suprafața de referențiat) ale căror coordonate sunt cunoscute din alte surse (determinate în teren, identificate din ale materiale georeferențiate cum ar fi ortofotografiile ANCP sau chiar Google Earth), fie prin utilizarea imaginilor sincronizate temporal cu GPS-ul dronei.

Măsurătorile din teren, deși au fost încercate în fazele inițiale ale proiectului, s-au dovedit prea ineficiente comparate cu scara suprafețelor de acoperit și dificultatea accesului pe teren (majoritatea câmpuri cultivate, uniforme, fotografiate adesea toamna sau primăvara după arătură).

Rezultate rezonabile în intervalul 8-1 m eroare (diferență între valorile calculate fotogrammetric pentru punct și referința folosită) au fost obținute folosind referențierea automată cu GPS-ul dronei sau referințe la ortofotografiile ANCP (pentru x, y) și Harta militară 1/25000 din anii 1970 sau Google Earth pentru z. Nu ne-a interesat la acest moment să avem date pe Z unitare (pe același model de Pământ), această uniformizare pe elevație va fi o etapă ulterioară a prelucrării. Utilizarea referențierii cu GPS dronă scurtează timpii dedicați etapei de stabilire a apunctelor comune în fotografii.



Fig. 10. Reprezentarea erorilor în punctele de achiziție a imaginilor (dimensiunea elipselor reflectă diferențele pe x,y) și culoarea - cele pe Z, în cazul unei referențieri spațiale automate folosind GPS-ul dronei

### Erori pe elevație

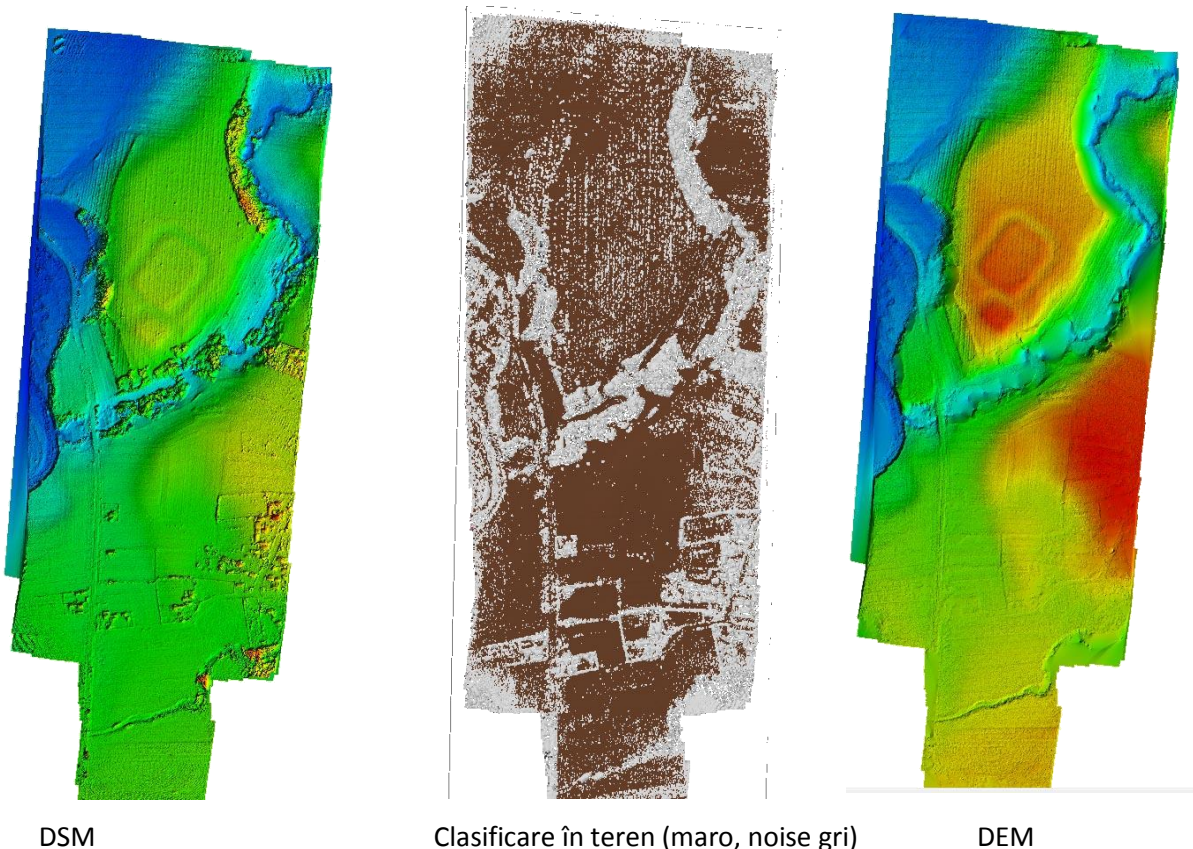
- 2.50715 m
- 2.00572 m
- 1.50429 m
- 1.00286 m
- 0.501431 m
- 0 m
- -0.501431 m
- -1.00286 m
- -1.50429 m
- -2.00572 m
- -2.50715 m

În cazul referențierii automate cu GPS-ul dronei calitatea datelor nu depinde decât de configurația satelitară la momentul respectiv. Deoarece referențierea se face prin tranzlație, rotație și scalare, erorile de referențiere nu se manifestă punctual, ci se reflectă la nivelul întregului model. Orice nou punct adăugat în calcul va modifica orientarea în 3D a întregului model, dar nu relațiile geometrice între punctele sale.

## Eliminare vegetației

Principalul inconvenient pentru studiile de interes arheologic ce presupun detecția de anomalii arheologice și documentarea lor spațială pe baza modelelor digitale ale terenului este vegetația. Aceasta este surprinsă în modelele de tip DSM, spre deosebire de rezultatele obținute cu LiDAR în care vegetația este filtrată.

Unele rezultate se pot obține, totuși, și fără LiDAR, prin clasificarea punctelor din norul de puncte în categorii și utilizarea pentru realizarea mesh-ului doar a acelor categorii care sunt considerate ca reprezentând terenul. Selectarea manuală a punctelor și editarea lor este destul de anevoioasă. AgiSoft oferă posibilitatea unei clasificări automate în funcție de diferența de pantă între două puncte din model în cadrul unei celule (a cărei latură este o variabilă ce poate fi definită) și diferența maximă de înălțime între acestea. O dezvoltare viitoare care să țină cont și de culoarea pixelilor ar fi, de asemenea, utilă.





a.

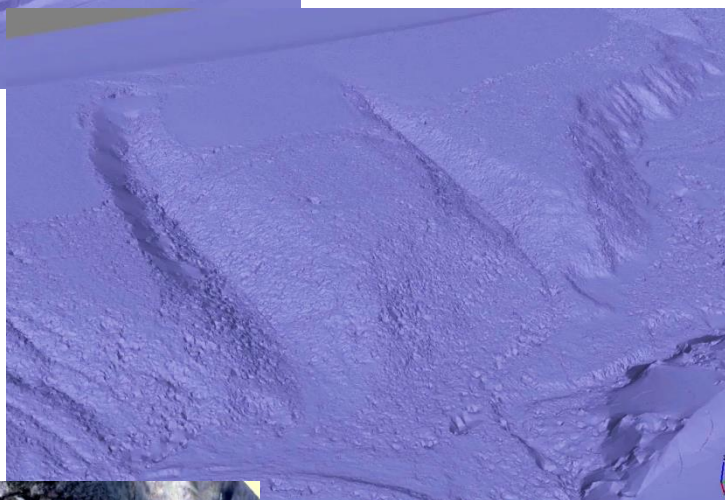
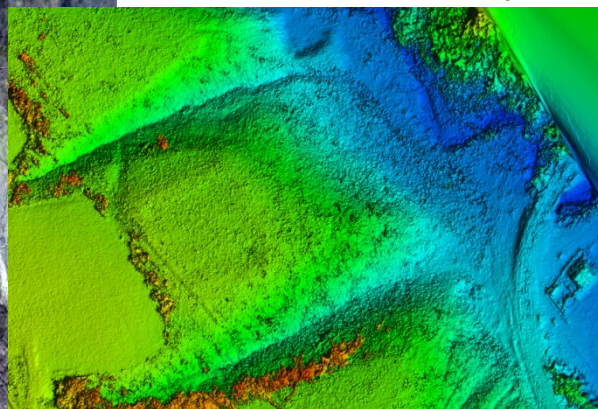


Fig. 12. Exemplu de filtrare a unei păduri de foioase fotografiată primăvara devreme. a-b vedere din lateral a modelului de teren, cu vegetație (a), fără vegetație (b); (c) – imagine aeriană a fortului, vedere verticală; (d) – model cu pădure și case, vedere verticală; (e) – model fără vegetație, vedere verticală). Exemplu – fortul Albota, lângă Pitești

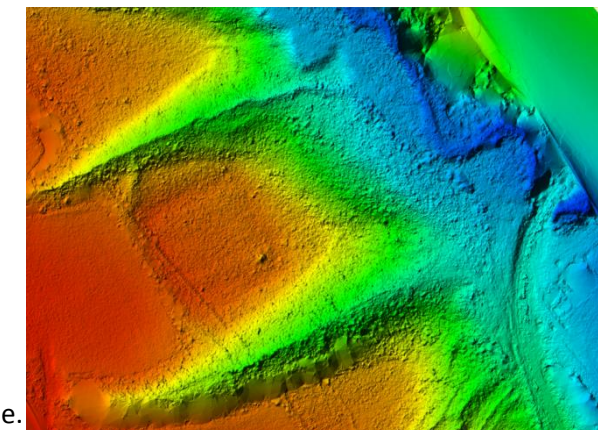


b.



c.

d.



e.

TerraSurveyor, Autodesk Recap 360 și GlobalMapper sunt alte aplicații care clasifică automat puncte din norul de puncte.