

Teledetecție și arheologie aeriană la medie și joasă altitudine pe *Limes Transalutanus*. Contribuții la dezvoltarea unei tehnologii inovative de patrimonializare

Dan Ștefan¹

Rezumat

Abordarea științifică a problemelor istorice și cultural-arheologice ridicate în jurul segmentului din granița Imperiului Roman în Dacia, denumit în mediul academic *Limes Transalutanus*, a fost încă de la bun început condiționată de dezvoltarea unei tehnologii inovative capabile să genereze, să gestioneze și să integreze numeroase seturi de date într-o manieră graduală, de la cadrul general până la elemente de mare detaliu, în vederea evidențierii principalelor opțiuni interpretative. În același timp, evoluția tehnologică urmărită poate fi privită și distinct, ca un scop în sine, și, în acest caz, problematica istorică generală și provocările de natură arheologică specifice cercetărilor de-a lungul *Limes Transalutanus* constituie studiul de caz ideal și prilejul cel mai fertil pentru testarea eficienței noii tehnologii. Este de așteptat ca aplicarea în viitor a tehnologiei inovative de patrimonializare propuse să aducă beneficii semnificative în cazul cercetării marilor situri arheologice liniare (fortificații, drumuri), dar și în cazul proiectelor de cercetare arheologică preventivă de tip coridor.

În prezentul articol este argumentată necesitatea definirii unui cadru tehnologic nou pentru studiul *Limes Transalutanus* și sunt definite principalele componente ale acestei tehnologii. În continuare, este prezentată în detaliu una dintre aceste componente tehnologice: explorarea aeriană de medie și de joasă altitudine realizată cu ajutorul aeronavelor fără pilot la bord (UAV, drone). Operaționalizarea acestei componente a constituit o provocare majoră pentru autori, elementele tehnice esențiale, cu caracteristici potrivite scopului propus, nefiind disponibile comercial pentru achiziție. Din acest motiv, au fost proiectate, construite și testate de către autori mai multe sisteme de zbor și vehicule aeriene fără pilot la bord. În plus, au fost experimentate strategii particulare de achiziție a datelor de teledetecție și metode de prelucrare și georeferențiere a acestor date. Calitatea soluțiilor tehnice proiectate și implementate a permis documentarea a peste 2600 ha, respectiv peste 50 km liniari, din sectorul sudic (cuprins între Dunăre și râul Argeș) al *Limes Transalutanus*. Cu ajutorul imaginilor aeriene perpendiculare și oblice înregistrate la altitudini cuprinse între 100 și 300 m, cât și a produselor derivate, ortofotografii și modele digitale de teren, au fost identificate elemente structurale noi, necunoscute, ale sistemului defensiv roman. În numeroase alte cazuri, investigațiile aeriene au contribuit la o mai bună caracterizare spațială a componentelor și siturilor arheologice asociate *limes*-ului roman, cunoscute din cercetări anterioare. Pe lângă informațiile relevante pentru cercetarea arheologică, experiența acumulată a permis dezvoltarea unor soluții noi, care pot fi, la rândul lor, considerate tehnologii noi: platforme și sisteme de navigație aeriană, protocoale de achiziție a imaginilor aeriene, procedee de prelucrare a datelor, abordări specializate pentru integrarea rezultatelor de teledetecție cu datele geofizice și înregistrările arheologice. Dezvoltarea acestei componente tehnologice constituie, în sine, un avans în domeniul arheologiei aeriene, definind, de fapt subdomenii noi: teledetecție de medie și mică altitudine și, asociat, arheologie aeriană de medie și mică altitudine.

Cuvinte cheie: tehnologie inovativă de patrimonializare, explorare aeriană, arheologie aeriană, teledetecție, fotogrammetrie, UAV, model digital de elevație a terenului, structuri arheologice liniare, proiecte de cercetare arheologică de tip coridor

¹ În ordine: Vector Studio SRL București (danstefan00@gmail.com).

Un parteneriat arheologie-tehnologie

Proiectul de cercetare, finanțat prin PNCDI II în cadrul programului Parteneriate, „Tehnologie interdisciplinară de investigare a patrimoniului arheologic. Studiu de caz: tronsonul premontan al *Limes Transalutanus*”, a fost propus și implementat acceptând provocarea unei probleme științifice definită în termeni istorici și cultural-arheologici, a cărei cercetare urma să fie realizată odată cu elaborarea unei tehnologii inovative de cercetare interdisciplinară a patrimoniului arheologic în scopul definirii de practici noi de patrimonializare. Definirea și dezvoltarea componentelor tehnologice ale proiectului a fost realizată prin identificarea celor mai eficiente abordări, metode și echipamente necesare și suficiente pentru realizarea unei evaluări detaliate a potențialului arheologic al unor mari suprafețe de teren organizate liniar de-a lungul unor coridoare. Această particulară optimizare a tehnologiei de investigare favorizează cercetarea și patrimonializarea marilor situri liniare, așa cum este studiul de caz discutat, sectorul premontan al *Limes Transalutanus*, dar și, în egală măsură, marile proiecte de cercetare arheologică preventivă realizate cu prilejul construcției de noi rețele rutiere (autostrăzi, linii de centură) sau de utilități (conducte de gaze și orice alte rețele subterane).

Anterior demarării proiectului, pe sectorul premontan al *Limes Transalutanus* era cunoscut² un singur turn de veghe, se bănuia existența doar a unei singure așezări civile, la *Movila Tătaru*, în timp ce traseul graniței romane era doar într-o mică măsură identificat prin cercetări de teren mai vechi, ori cu ajutorul imaginilor din satelit și ortofotografiilor ANCPI³. De asemenea, din cele 13 forturi cunoscute în acest sector, niciunul nu beneficia de o ridicare topografică. În aceste condiții, chiar din momentul elaborării, strategia de cercetare a fost orientată către o rapidă rezolvare a nevoilor acute de documentare spațială. Este cunoscut, și general acceptat, principiul potrivit căruia patrimoniul arheologic nu poate fi pe deplin înțeles și nici nu poate fi protejat fără o cunoaștere precisă a limitelor sale spațiale. Acest principiu este cu atât mai evident pentru întreg ansamblul de componente ce definesc situl arheologic *Limes Transalutanus*, din moment ce relația cu mediul ambiant trebuie să fi fost principalul factor în rezolvarea concretă a problemelor de arhitectură militară. În plus, prin amplasarea actuală a componentelor sitului liniar, în mijlocul celei mai importante zone agricole a țării, pericolul de dispariție fizică și imediată al acestora este cât se poate de real.

Având în vedere dimensiunile mari ale teritoriului de investigat⁴ raportat la resursele financiare și de timp limitate ale proiectului, combinația aleasă de metode de cercetare a urmărit detalierea progresivă a rezoluției datelor spațiale pentru a lămuri nu doar zonele albe (în care traseul graniței romane, de exemplu, nu era cunoscut⁵), dar și pentru a orienta cercetarea de teren ulterioară, mai laborioasă, în puncte cheie, pe principiul eficienței. Tradițional, în astfel de cazuri, ciclul de investigare are ca punct de pornire procesul de integrare a documentației spațiale existente (în cazul nostru materiale și documente istorice și cartografice, precum și rapoarte mai vechi de cercetare) și corelarea acestor rezultate într-un sistem GIS ce folosește drept fundament spațial imagini din satelit și ortofotografii ANCPI. Procesul continuă cu studii de arheologie aeriană din aeronavă (atunci când aceasta tehnologie este disponibilă) și, în final, adaugă un nivel de detaliu prin cercetări sistematice de suprafață și, eventual, investigații geofizice, ridicări topografice de detaliu și sondaje pedologice. Odată finalizate investigațiile cu caracter non-invaziv, cercetările urmează a fi completate prin sondaje și săpături arheologice cu caracter limitat, dar precis poziționate, realizate în scopul definirii secvențelor stratigrafice și a cadrului cronologic. Alte abordări complementare, așa cum sunt arheologia peisajului⁶, studiile de ceramică sau analiza toponimelor, sunt uneori utilizate în scopul reconstrucției peisajului și a dinamicii temporale a acestuia. Veriga slabă a fluxului de lucru tradițional este posibilitatea redusă de integrare a datelor spațiale regionale (materiale cartografice de arhivă, imagini din sateliti,

² Despre stadiul cunoștințelor în domeniu anterior proiectului a se vedea Teodor 2013.

³ ANCPI – Agenția Națională de Cadastru și Publicitate Imobiliară pune la dispoziția publicului ortofotografii ale teritoriului național la o rezoluție de 50 cm/pixel.

⁴ Un culoar de 150 km lungime și în jur de 450 m lățime, lărgit în zonele cu forturi sau turnuri; chiar și mai mare dacă se iau în considerare traseele drumurilor secundare (nota autorilor). Lățimea de 450 m nu este cea a amenajărilor romane, ci a culoarului acoperit de dronă într-o misiune. Unele forturi se află și la doi kilometri de linia graniței (Săpata, Albota, probabil și Izbășești, nota editorului).

⁵ Între Izbășești și Albota, în lungul a 23 km în câmp deschis, nu era atestat niciun sector din această graniță.

⁶ Concept folosit aici într-un înțeles limitativ, în sensul reconstrucției mediului ambiant. Am dedicat definirii arheologiei peisajului un subcapitol al introducerii la acest volum (nota editorului).

ortofotoplanuri ANCP) cu datele spațiale de mare detaliu (planuri situație, planuri de săpătură, hărți geofizice).

Elementul de noutate al tehnologiei dezvoltate în cadrul proiectului este încercarea de a rezolva această lipsă a unui nivel de rezoluție intermediar prin utilizarea următoarelor metode de investigație:

- explorarea aeriană de medie și de joasă altitudine realizată cu ajutorul platformelor de zbor multirotor radiocomandate de la sol (denumite aeronave fără pilot la bord, desemnate adeseori și prin acronimul UAV – *Unmanned Aerial Vehicles* sau numite, mai simplu, drone);
- prelucrarea complexă a imaginilor cu ajutorul unor tehnici avansate din domeniul fotogrammetriei, în scopul obținerii de produse cu mare valoare adăugată pentru cercetarea arheologică: ortofotografii și, respectiv, modele digitale ale terenului de foarte mare rezoluție;
- utilizarea extensivă a celor mai eficiente tehnici de investigare geofizică, așa cum sunt, de exemplu, metoda măsurării susceptibilității magnetice a solului, la suprafață, în scopul detectării și delimitării eficiente a siturilor arheologice sau a diferitelor sectoare funcționale ale acestora.

În continuare, va fi descrisă în detaliu dezvoltarea și testarea primei componente tehnologice din lista de mai sus: explorarea aeriană de medie și de joasă altitudine realizată cu ajutorul aeronavelor fără pilot la bord. Celelalte două componente tehnologice dezvoltate în cadrul proiectului urmează a fi descrise în cadrul unor studii separate.

Arheologie aeriană de medie și mică altitudine

Prin explorare aeriană înțelegem atât detectarea de situri prin identificarea anomaliilor cromatice ori de contrast în vegetație și sol, surprinse în imagini aeriene, dar și documentarea siturilor (și, din nou, *detectarea*) prin extragerea topografiei de detaliu, pe principii fotogrammetrice, din seturi de imagini suprapuse. Suprafața totală foarte mare a zonelor de interes arheologic ce necesitau documentare spațială, cât și resursele disponibile limitate în cadrul proiectului *Limes Transalutanus*, au exclus de la început posibilitatea de a folosi tehnologia LiDAR sau orice alte tehnologii de telemetrie laser pentru obținerea modelelor de teren. În mod evident, măsurătorile topografice realizate cu instrumente geodezice tradiționale, stație totală și/sau receptoare GPS, au fost luate în calcul doar pentru obiective punctuale, bine precizate și activități de detaliu. Combinația dintre portabilitatea și flexibilitatea platformelor multirotor și dezvoltările recente în domeniul fotogrammetric care asigură obținerea modelelor tridimensionale din ce în ce mai automatizat, fără necesitatea calibrării camerelor, a îndeplinit cerințele noastre de eficiență, costuri reduse și relevanță, furnizând produse – ortofotografii și modele digitale de teren cu rezoluții impresionante (5-25 cm/pixel). Acest aspect este important nu doar pentru că depășește calitatea produselor disponibile în acest moment (nivelul ortofotografiilor ANCP, de exemplu), ci, în primul rând, pentru că este asigurată pe suprafețe oricât de mari și în orice moment din calendarul de lucru al proiectului. În fapt, această disponibilitate temporală s-a dovedit, de departe, cel mai important avantaj al tehnologiei, în condițiile impredictibilității finanțării, ori a dependenței organizării activităților de teren de contexte instituționale, meteorologice sau agricole. Posibilitatea de a putea planifica misiuni aeriene, practic oricând, din orice punct de stație, în orice moment din zi sau an (excluzând vremea ploioasă), de a repeta misiunile și de a ajusta în timp real și în mod facil traseul, altitudinea, unghiul, ținta, au făcut ca dronele să reprezinte principalul instrument de abordare complexă a unui peisaj arheologic în cadrul proiectului *Limes Transalutanus*, prin raportul favorabil între calitatea și cantitatea informațiilor oferite și resursele/costurile implicate. Dacă avantajele utilizării UAV în documentarea siturilor arheologice punctuale sunt deja destul de clar acceptate pe plan internațional, experimentul nostru, desfășurat la scara unui vast peisaj, pretabil mai degrabă unui survol cu avion⁷, a dovedit că tehnologia UAV poate fi considerată destul de robustă pentru a fi folosită în proiecte de mari dimensiuni. Unele adaptări ale platformelor de zbor, în sensul asigurării capacității de zbor pe distanțe lungi și atingerii unei plaje variabile de altitudine au fost, evident, necesare.

Veriga de legătură între datele spațiale regionale, cu rezoluție mică, și datele spațiale locale, specifice sitului, asigurată prin explorare aeriană și teledetectie cu ajutorul sistemelor UAV, conduce, de fapt, la definirea

⁷ În proiect s-a desfășurat și un survol în aeronavă (vezi *Frontiera văzută de sus*, în acest volum).

unor (sub)domenii tehnologice și de cercetare noi: teledeteție la medie și mică altitudine și, asociat, arheologiei aeriană la medie și mică altitudine⁸.

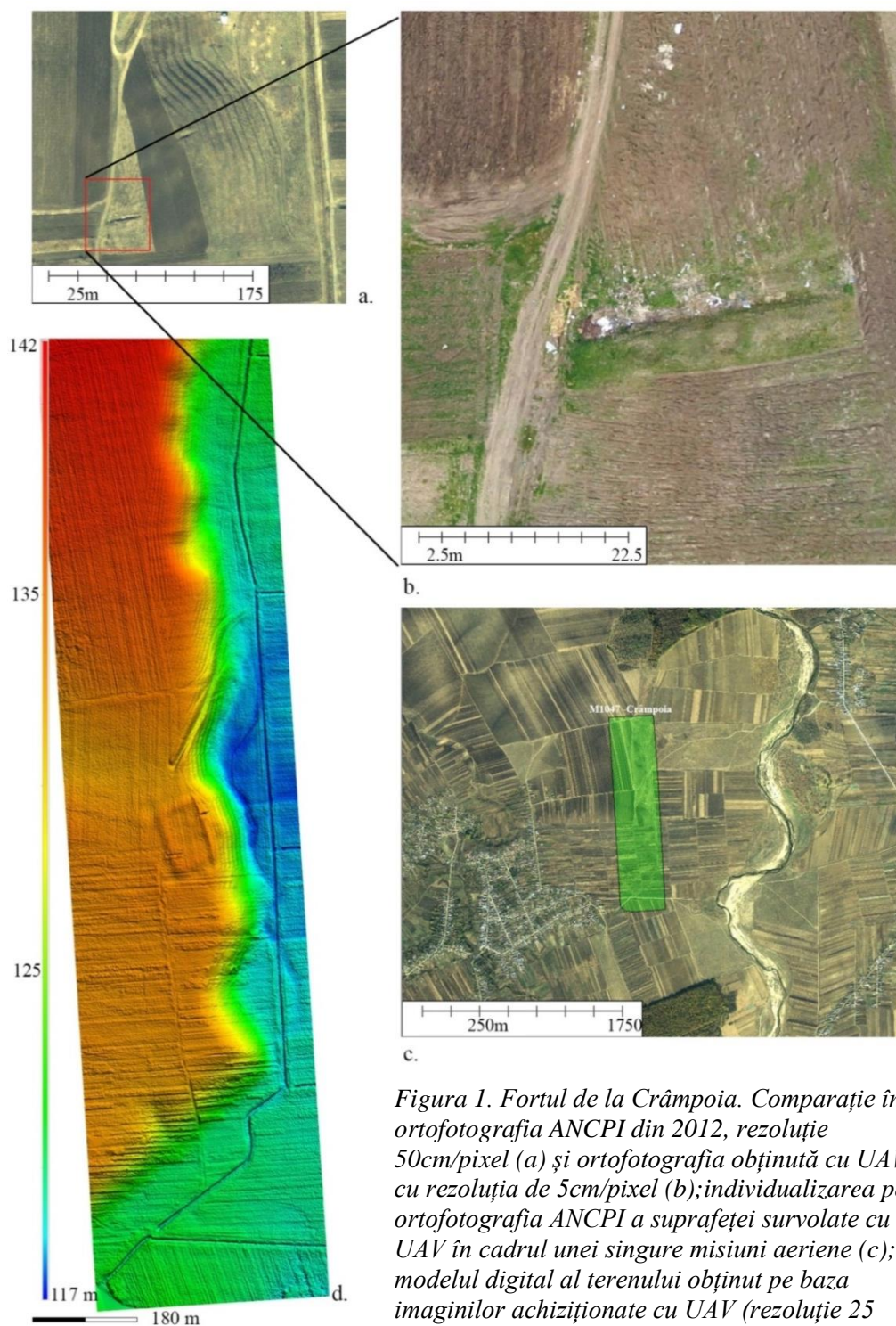


Figura 1. Fortul de la Crâmpoia. Comparație între ortofotografia ANCPA din 2012, rezoluție 50cm/pixel (a) și ortofotografia obținută cu UAV cu rezoluția de 5cm/pixel (b); individualizarea pe ortofotografia ANCPA a suprafeței survolate cu UAV în cadrul unei singure misiuni aeriene (c); modelul digital al terenului obținut pe baza imaginilor achiziționate cu UAV (rezoluție 25 cm/pixel – d).

⁸ Clasificarea altitudinilor este realizată în baza unor criterii care pot să difere de la un proiect la altul. În cazul prezentului proiect, altitudini mari sunt cele peste 600 m, respectiv misiuni de arheologie aeriană tradițională, cu aeronavă cu pilot la bord; altitudini medii – 200÷600 m, misiuni UAV, în general fotografiile oblice pentru detectarea unor structuri necunoscute, posibil de la distanță mai mare; altitudini mici – sub 200 m, misiuni UAV, fotografiile oblice și perpendiculare, documentare sit sau structuri imediat adiacente, ortofotografii și modele digitale de mare detaliu. Pentru proiecte arheologice orientate către situri punctuale (așezări, necropole, locuri de cult etc.) și microzona asociată, domeniile de altitudini medii și mici ar putea fi mai coborâte.

Ce sunt dronele?

Prin drone, denumite și UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), se desemnează atât aeronavele care zboară fără pilot (UAS - *Unmanned Aircraft Systems*) cât și sistemele de zbor pilotate de la distanță (RPAS - *Remotely piloted aircraft systems*) care pot fi considerate o subcategorie a anterioarei⁹. Un astfel de sistem de zbor se referă la întreg ansamblul format dintr-un cadru rigid (platformă de bază), sistem de propulsie, modul de comandă a zborului, sistem de navigație, sistem de alimentare cu energie, module de semnalizare și telemetrie, sistem de absorbție a vibrațiilor și stabilizare dinamică a camerelor foto/video sau altor tipuri de senzori etc. Dronele pot fi împărțite în categorii în funcție de diferite considerente. După tipul general constructiv acestea pot fi cu aripă fixă, cu aripă mobilă, cu motoare rotative, mixte ori de tip aeronavă. Alte criterii utilizate sunt sursa de energie (petrol, baterii, solar), domeniul de aplicații (civil, militar, experimental) sau distanța pe care o pot parcurge fără realimentare (scurtă, medie, mare). Dronele cu elice propulsate de motoare rotative (4, 6, 8 sau chiar 12) sunt preferate în sectorul comercial datorită fiabilității și flexibilității lor, raportate la un cost de producție rezonabil. Astfel de echipamente, denumite generic multicoptere, sunt folosite, tot mai frecvent, și în arheologie.

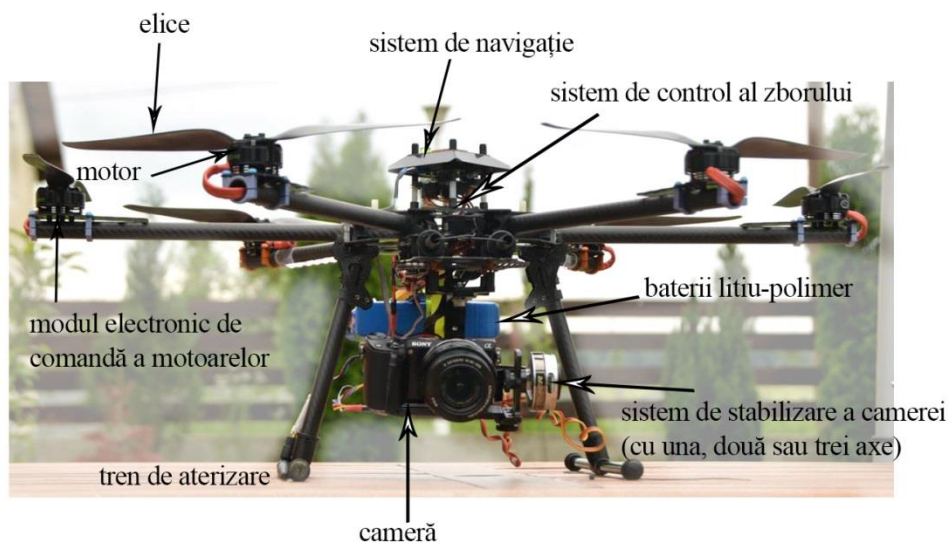


Figura 2. Părțile componente ale unei aeronave fără pilot la bord (aici de tip hexacopter)

Numărul de motoare este ales în baza unui raționament determinat de mai mulți factori. Un număr mai ridicat de motoare este indicat pentru sarcini utile mai mari, dar complexitatea și costurile cresc. Un alt factor important este redundanța¹⁰. Astfel, un sistem quadcopter (sistem de propulsie compus din 4 motoare și 4 elice) nu poate funcționa în cazul opririi unui motor sau ruperii uneia dintre elice. Un sistem hexacopter are capacitatea, prin design-ul său, de a rămâne în aer în cazul unei defecțiuni la un element de propulsie (motor sau elice), cu condiția ca greutatea totală să nu depășească sarcina maximă admisă pentru numărul de elemente de propulsie rămase. Cu toate acestea, pilotarea unui hexacopter defect este foarte dificilă, acesta rotindu-se rapid în jurul axului vertical după oprirea unuia dintre motoare¹¹. Un nivel de redundanță mult mai bun este posibil pentru sistemele octocopter, la care este posibilă continuarea (aproape) normală a misiunii aeriene în cazul opririi unuia sau chiar a două dintre elementele de propulsie (motoare și/sau elice). Considerentele mai sus expuse par a favoriza sistemele multicopter cu un număr mai mare de elemente de propulsie, mai sigure și capabile a transporta sarcini utile mai mari. Cu toate acestea, trebuie avută în vedere

⁹ Actualul cadru legislativ din România denumește această categorie „aeronave motorizate fără pilot la bord” și precizează trei clase, în funcție de masa maximă la decolare, respectiv sub 15 kg, 15-150 kg și peste 150 kg.

¹⁰ Cuvântul este angajat aici (și mai departe, în articol) cu înțelesul său ingineresc. Deoarece dicționarele online nu oferă o acoperire mulțumitoare, mă văd obligat să precizez că „redundanța” unui sistem se referă la capacitatea lui funcțională în situația căderii unuia dintre subsisteme. În cazul dronelor, „redundanța” se poate exprima în ipoteza: dacă cutare subsistem cedează, ce se întâmplă cu aparatul de zbor? (nota editorului)

¹¹ Pilotarea este totuși posibilă, chiar și în aceste condiții, cu ajutorul unui sistem automat de control al navigației.

eficiența energetică mai redusă a sistemelor hexacopter și octocopter, în comparație cu sistemele quadcopter. Acesta este un factor critic, ce diminuează considerabil capacitatea de acoperire a unei suprafețe de teren în misiunile de arheologie aeriană. În plus, este dovedit că o proiectare riguroasă, o execuție precisă și un control minuțios al aeronavei radiocomandate înaintea fiecărei misiuni aeriene poate să elimine pericolul defectării elementelor de propulsie în aer. În timpul experimentelor realizate în cadrul proiectului descris, autorii au trecut progresiv de la testarea, în fazele inițiale de implementare a proiectului, a sistemelor octocopter și hexacopter, trecându-se apoi la utilizarea, aproape exclusivă, a unor platforme quadcopter, care corespund mult mai bine nevoilor concrete ale acestui proiect de cercetare.

Revoluție metodologică în arheologie

Multiplicarea exponențială a aplicațiilor UAV în arheologia internațională¹² este doar una dintre consecințele dezvoltării în ultimul deceniu a industriei aeronavelor fără pilot, industrie ce a ajuns la nivelul anului 2014 la o cifră de afaceri, la nivel global, de peste 660 milioane de dolari, estimându-se ca până în 2020 această cifră de afaceri să crească până la 5,59 miliarde de dolari¹³. Dronele nu reprezintă un fenomen nou, dar dezvoltarea lor în piața civilă este foarte recentă. Anul 2013 a mai fost numit și anul dronelor¹⁴. Motivul acestei importante dezvoltări este, în primul rând de, natură tehnică. Elaborarea unei tehnologii de stocare eficientă a energiei electrice și, mai ales, de descărcare la foarte mare intensitate a curentului prin baterii de tip LiPo (*lithium polymer* sau, mai corect *lithium-ion polymer battery*), miniaturizarea senzorilor (giroscop și accelerometru tri-axial, barometru, compas electronic, receptor GPS, teletre optice și laser etc.) și a sistemelor de calcul bazate pe microprocesoare de mare putere sunt cei doi factori care au contribuit la transformarea dronelor cu propulsie electrică, în special a celor de tip multirotor, într-o tehnologie de masă. Principalele aplicații ale acestei tehnologii sunt înregistrate în domeniul agriculturii de precizie, sectorul topo-cadastral, turism, industriile media și advertising. Nu mai puțin important, dronele sunt din ce în ce mai mult utilizate și ca un mijloc de divertisment. O problemă fundamentală care influențează semnificativ ritmul de dezvoltare al sistemelor UAV este acela al politicilor guvernamentale¹⁵ ce reglementează utilizarea dronelor în sectorul comercial.

În arheologie este de așteptat ca sistemele UAV să aducă beneficii semnificative și schimbări metodologice profunde. Practic, prin utilizarea dronelor, asistăm la democratizarea unui întreg domeniu de cercetare: arheologia aeriană, condiționată, în trecut, de accesul arheologilor la aeronave cu pilot, la care adăugăm puterea și avantajele puse la dispoziție de noile tehnologii asociate: teledetecția¹⁶ și fotogrammetria. Acest proces de democratizare a aplicațiilor aeriene în arheologie are ca punct de pornire accesibilitatea și costurile reduse ale echipamentelor. În plus, operarea aeronavelor fără pilot necesită un nivel de pregătire și de testare a abilităților tehnice și de navigare la un nivel simplificat față de aeronavele cu pilot chiar dacă, firește, complexitatea domeniului, pentru aplicațiile profesionale în special, constituie o provocare pentru colectivul arheologic de cercetare. Arheologia aeriană de medie și mică altitudine realizată cu ajutorul sistemelor UAV

¹² Fernández-Hernandez 2015; Fernández-Lozano 2016; Mozas-Calvache et alii 2014. Proiecte în curs pot fi observate, de exemplu, în programul unor conferințe internaționale dedicate: TOPOI Berlin 2014

(<https://community.topoi.org/web/uav-2014/programm>). Vezi și *From Aerostats to Drones: aerial imagery in Archaeology*, Rome, feb. 2016, Univ. Salento, Univ. Ghent, Univ. Cassino (<http://www.archeologia-aerea.it>)

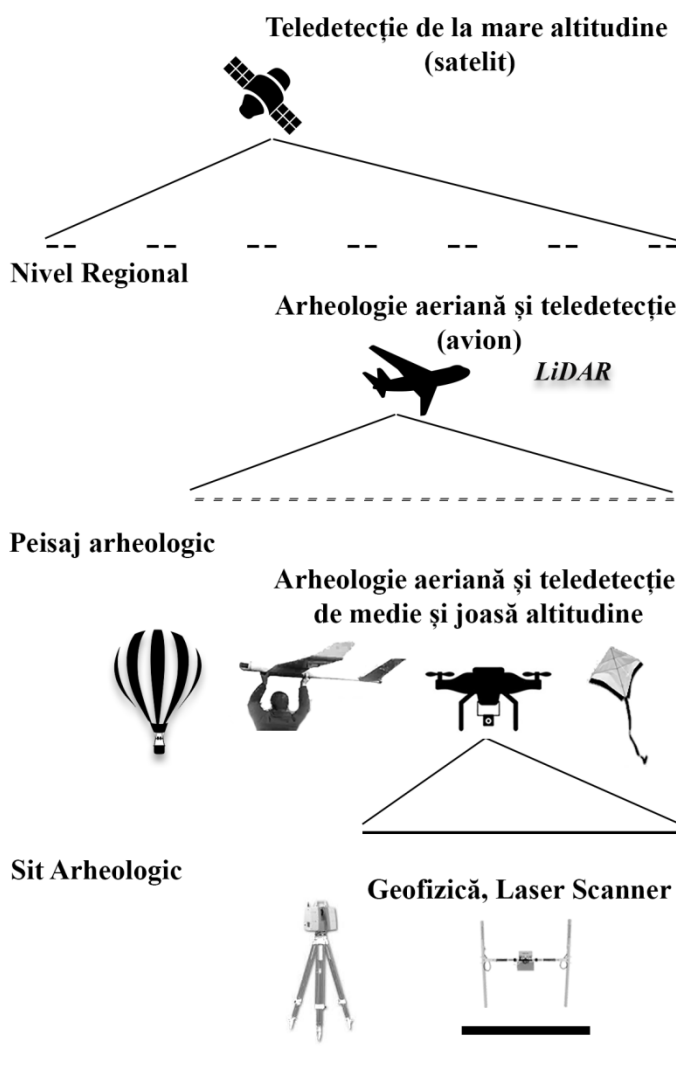
¹³ UAV Drones Market by Type (Fixed Wing, Rotary Blade, Nano, Hybrid), Application (Law Enforcement, Precision Agriculture, Media and Entertainment, Retail), & Geography (Americas, Europe, APAC, RoW) - Analysis & Forecast to 2020 by: marketsandmarkets.com, Publishing Date: October 2015, Report Code: SE 3099

¹⁴ Concept for Operations of Drones, 2015, 2.

¹⁵ Reglementările aviatice curente în Europa încadrează dronele ce cântăresc mai mult de 150 kg în categoria aeronavelor, cele mai ușoare de atât fiind lăsate la latitudinea legislației fiecărei țări în parte. Un proiect legislativ cu scopul unificării reglementărilor de securitate la nivel european a fost propus spre analiză de Comisia Europeană în septembrie 2015. Acesta combate criteriul greutății, concentrându-se pe *cum* și *în ce condiții* sunt utilizate dronele (de exemplu gradul de risc pe care îl reprezintă pentru terți), neocupându-se însă de aspectele legate de respectarea intimității și a protecției datelor personale. În România, în perioada ianuarie 2014 - ianuarie 2016, au existat restricții legale importante care au limitat sever, printr-un Ordin al Ministerului Transporturilor, utilizarea aeronavelor fără pilot, atât pentru activități de educative și divertisment, dar și pentru activități comerciale. În prezent, în România cadrul legal este mult mai favorabil, dar acest cadru este încă incomplet.

¹⁶ Wiseman, El-Baz 2007

nu va elimina aplicațiile de observație arheologică aeriană la nivel regional, realizate, la altitudini mai mari, cu ajutorul aeronavelor cu pilot, nici nevoia de supraveghere aeriană a patrimoniului arheologic prin imagini din satelit. Este de așteptat, însă, ca utilizarea dronelor în arheologie să devină o constantă în numeroase proiectele de cercetare, noile tehnologii urmând să asigure necesarul de date spațiale de foarte mare detaliu din vecinătatea imediată a siturilor arheologice, adică exact acolo unde rezoluția datelor din sursele tradiționale (mai exact, lipsa acestei rezoluții) a fost mereu o piedică în procesul de racordare a siturilor la peisaj și mediul geografic adiacent.



Imaginile și datele înregistrate la mare altitudine, din satelit, sunt folosite intensiv în arheologie, în special în analiza regională. Un reper al acestui domeniu îl constituie misiunea LandSat. În prezent, tehnologiile de glob virtual (Google Earth, Bing, ArcGIS Explorer etc.) furnizează o cale simplă și rapidă de căutare, distribuție și vizualizare a numeroase categorii de date de interes arheologic. Rezoluția datelor înregistrate din satelit: imagini – până la 3 m/pixel; modele digitale – 30÷90 m/nod.

Arheologia aeriană are o lungă tradiție, care merge până la perioada timpurie de naștere și dezvoltare a aviației. Rezoluția imaginilor și a datelor poate fi mult mai bună, de exemplu: ANCPPI furnizează ortofotografii cu rezoluția de 0.5 m/pixel.

Dezvoltarea arheologiei aeriene de medie și joasă altitudine va pune la dispoziția cercetătorilor mijloacele conceptuale și seturile de date necesare pentru racordarea siturilor la peisajul arheologic. Rezoluția uzuală: imagini - 1÷5 cm/pixel; modele digitale - 10÷30 cm/nod.

Nivelul sitului arheologic este caracterizat prin nivelul ridicat de detaliu al informațiilor spațiale măsurate, înregistrate și analizate. Rezoluția spațială poate fi oricât de bună, limitată doar de timpul și costurile de achiziție și prelucrare. Acesta este nivelul în care sunt utilizate și integrate date geofizice, laser scanner și topografice.

Figura 3. Detalierea progresivă a datelor spațiale.

Arsenalul senzorial care echipază, în prezent, aeronavele fără pilot, este deja remarcabil. Cele mai des utilizate echipamente sunt camerele fotografice de mare rezoluție, înzestrate cu sisteme optice de bună calitate, capabile să înregistreze imagini și flux video în domeniul vizibil și NIR (Near-Infrared). Camerele termice capabile să înregistreze imagini și date instrumentale din spectru IR (Infrared) și FIR (far-Infrared) echipază deja sisteme multicopter, dar costurile ceva mai ridicate limitează încă aplicațiile de scară largă în arheologie. Este de așteptat ca, în viitor, odată cu scăderea costurilor acestei tehnologii, investigațiile în spectrul infraroșu să revoluționeze în special studiile din domeniul arheologiei peisajului. Prin combinarea imaginilor aeriene înregistrate în misiuni aeriene realizate cu sisteme multicopter cu tehnici fotogrammetrice de prelucrare (SfM – Structure from Motion) sunt realizate, în prezent, ortofotografii și modele digitale ale terenului comparabile, ca precizie și nivel de detaliu, cu cele obținute prin tehnologia LiDAR. Cu toate acestea, investigarea suprafețelor acoperite de păduri și alte forme de vegetație densă nu poate fi asigurată întotdeauna doar prin tehnici fotogrammetrice (deși în anumite condiții pot exista rezultate satisfăcătoare),

utilizarea, în cazurile foarte dificile, a sistemelor active bazate pe telemetrie laser, așa cum este LiDAR, fiind obligatorie. În acest moment, există sisteme LiDAR portabile¹⁷, proiectate și construite special pentru a echipa aeronave multirotor. Costurile sunt însă considerabile¹⁸ iar eficiența acestora în medii acoperite de vegetație rămâne a fi dovedită¹⁹. Dincolo de aceste limitări, este important că misiunile aeriene cu sisteme multicopter echipate cu LiDAR sunt posibile, chiar în prezent, și este rezonabil să presupunem că, la momentul convergenței, în viitorul apropiat, al unor performanțe superioare și al unor costuri sensibil mai reduse, vom asista la unul dintre următoarele salturi tehnologice și metodologice majore în cercetarea arheologică. O altă sferă de interes pentru arheologie este domeniul geofizicii aeropurtate adaptate pentru sisteme UAV, domeniu în care numeroase proiecte se află deja în stadii avansate de testare²⁰.

Platforme de zbor dezvoltate și/sau testate în proiect

O evaluare generală a caracteristicilor tehnice ale echipamentelor UAV disponibile comercial a fost realizată în stadiul inițial de implementare al proiectului. În urma acestei evaluări a rezultat necesitatea proiectării și dezvoltării cu mijloace proprii a unei platforme UAV, nici una dintre alternativele disponibile comercial nefiind în întregime potrivite pentru caracterul liniar al sitului arheologic investigat. Din acest motiv, cea mai mare parte din rezultatele obținute în proiect se datorează propriilor noastre dezvoltări și experimente²¹. Aceste dezvoltări au valoare atât în domeniul tehnic (conceperea unor platforme de zbor cu caracteristici adaptate specificului cercetării aeriene pentru arheologie), cât și în cel al bunelor practici, precum alegerea, testarea și parametrizarea celor mai potrivite soluții tehnice și aplicații software pentru prelucrările fotogrammetrice, optimizarea strategiilor de planificare a misiunilor aeriene, testarea echipamentelor fotografice, identificarea momentelor potrivite pentru zbor (din punct de vedere al vegetației, luminii etc.). În procesul de proiectare, realizare și testare, o atenție deosebită a fost acordată atingerii obiectivelor tehnice asumate în condiții de securitate a zborului și a navigației, a greutății reduse, a eficienței ridicate în zbor, și a unor costuri reduse a platformelor aeriene radiocomandate.

Primele teste au fost realizate cu o platformă multicopter, denumită H1D1, cu sistem de propulsie electric cu 6 motoare (configurație hexacopter), proiectată și construită de către autori. Greutatea utilă a acestei platforme este de 1,2 kg (din care 800 g sistemul de amortizare și de stabilizare a camerei foto și 400 g camera foto + obiectiv). Greutatea totală maximă la decolare este de 4,2 kg iar timpul de zbor, în condiții atmosferice reale, cu acumulatori LiPo de 10.000 mAh, este de 11 minute. Această platformă a fost optimizată, în cadrul unui proiect de cercetare anterior, pentru explorarea aeriană a siturilor arheologice punctuale²². O caracteristică specială a sistemului de navigație permite realizarea de misiuni aeriene după un model anterior programat, independent de locul și direcția de lansare. Folosind această strategie, misiunile sunt executate prin decolare din centrul zonei de interes (situl arheologic) și asigură o acoperire cu mozaic de fotografii aeriene perpendiculare și oblice pe o suprafață circulară, cu raza de aproximativ 400 m față de punctul de decolare. După prelucrare fotogrammetrică, rezultă ortofotoplanuri cu rezoluția mai bună de 5 cm/pixel și modele digitale cu rezoluția de aproximativ 25 cm/pixel, ce acoperă o suprafață de aproximativ

¹⁷ De exemplu, unul dintre aceste sisteme LiDAR portabile are greutatea de 2,1 kg.

¹⁸ Costurile totale ale unuia dintre sistemele disponibile comercial este de aproximativ 120.000 Euro. Acest nivel de cost ridică nu doar problema resurselor inițiale, dar și obligativitatea utilizării unor polițe de asigurare în caz de avarie, încă dificil de negociat datorită noutății tehnologice și legislative și, oricum, cu costuri nedeductibile din proiectele de cercetare, cel puțin pe legislația valabilă în 2016.

¹⁹ Una dintre componentele care condiționează eficiența LiDAR în medii dificile este puterea de emisie laser. Este de presupus că puterea scăzută disponibilă pentru un sistem portabil constituie un factor limitativ, care ar putea fi compensată totuși prin senzori de recepție de generație nouă, algoritmi de prelucrare superiori și prin operarea la altitudini mai reduse, așa cum este cazul aeronavelor fără pilot la bord.

²⁰ Stoll 2013.

²¹ În procesul de proiectare a platformelor aeriene multicopter am primit numeroase recomandări și sugestii din partea comunității de aeromodeliști, în special din partea unor specialiști remarcabili așa cum sunt Cornel Fudulu și Laurențiu Bălăceanu. Construcția practică a dronelor a fost realizată de către autori și de către ing. Constantin Ștefan. Datorăm recunoștință și mulțumiri tuturor acestor colegi.

²² PNCDI PN II – 69/2011.

40 ha, situl arheologic aflându-se în punctul central. În plus, un set suplimentar de imagini oblice asigură o acoperire vizuală suplimentară pe o rază de aproximativ 1000 m față de punctul de decolare.

Practica explorării aeriene a sectorului sudic al *Limes Transalutanus* a arătat, destul de repede, că platforma hexacopter testată mai sus nu corespunde criteriilor de eficiență ridicate de caracterul liniar al sitului arheologic. Din acest motiv a fost proiectată o platformă multicopter nouă, pentru care s-a urmărit optimizarea mai multor parametri. Dintre aceștia, reducerea semnificativă a greutateii la decolare urma să asigure portabilitatea echipamentului, un criteriu important pentru a ușura transportul, în condiții dificile de teren (lipsa drumurilor de acces, bălți, noroi) până la punctul de decolare. În plus, reducerea greutateii este un factor important pentru minimizarea daunelor directe și colaterale în caz de accident. Prelungirea timpului de zbor a fost un alt deziderat pentru noua platformă. Reducerea consumului general de energie electrică urma să fie luată în calcul în scopul micșorării capacității acumulatorilor LiPo utilizați, cu beneficii directe asupra greutateii totale și a costurilor²³. În sfârșit, asigurarea controlului platformei multicopter la distanțe mari (până la 1,5 km) și redundanța acestui control au fost considerate elemente critice ce urmau să influențeze ciclul de proiectare. Prototipul rezultat, denumit Q1D2, a fost dezvoltat în jurul unei platforme quadcopter, mai ușoară și mai eficientă, în comparație cu soluțiile ce folosesc sisteme de propulsie cu un număr mai ridicat de motoare. Pentru alegerea soluției optime de propulsie au fost testate laborios, cu ajutorul unui echipament specializat, peste 300 de combinații de motor, elice și modul electronic de comandă a motoarelor (ESC – *electronic speed controllers*). În acest fel, a fost selectată o soluție de propulsie cu motoare fără perii (*brushless*) cu raport înălțime/diametru mic (tip *pancake*), elice realizate din fibră de carbon (diametru: 13 inch, pas 4,5 inch, profil de atac specializat) și module de comandă a motoarelor cu răspuns ultrarapid. Sarcina utilă a acestui prototip a fost coborâtă la 0,6 kg (din care doar 200 g sistemul de amortizare și de stabilizare a camerei foto și 400 g camera foto + obiectiv). Greutatea totală maximă la decolare este de numai 2,1 kg, iar timpul de zbor, în condiții atmosferice reale, cu acumulatori LiPo de 5 300 mAh, este de 15 minute.

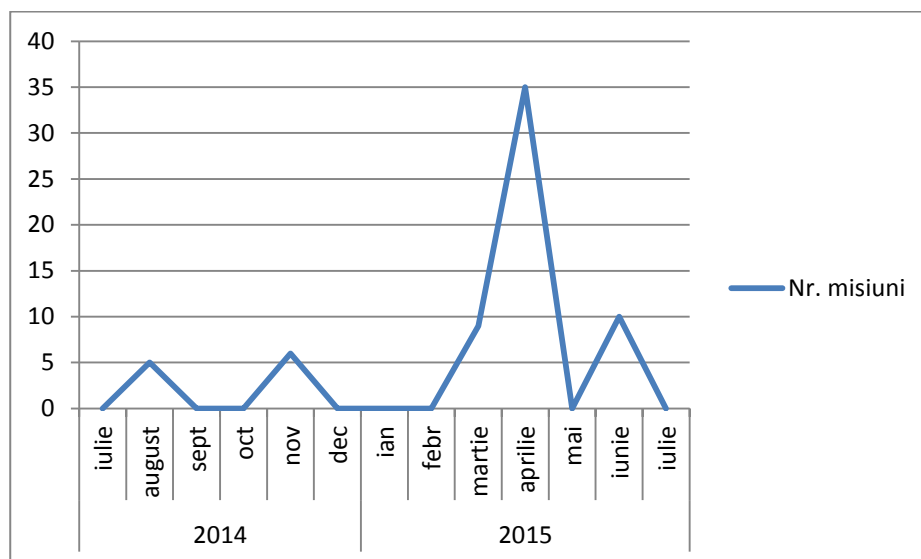


Figura 4. Calendarul misiunilor. S-au realizat zboruri în momentele tradițional cunoscute drept favorabile pentru investigații aeriene, legate în mod direct de ciclul agricol. În mod special, s-a lucrat mai mult în perioada de primăvară timpurie în zonele cu vegetație deasă.

Prototipul Q1D2 a fost prevăzut cu sisteme complexe de comandă și control, fiind capabil să execute misiuni aeriene într-unul din următoarele moduri (cu posibile combinații): control și navigație complet manuale, control manual și navigație instrumentală (urmărire traseu de zbor, interactiv, pe hartă și vizualizare prin camera de la bord), control și navigație în întregime automate. Prezența mai multor sisteme de comandă și control, precum radiocomandă cu tehnologie de salt în frecvență (FHSS – *frequency hopping spread spectrum*), telemetrie instrumentală și de navigație, de asemenea realizate în tehnologie FHSS și flux video FPV (*first person view*), asigură un înalt nivel de redundanță. Practic, scenariul defectării oricăreia dintre subsistemele de control și de navigație nu afectează în nici un fel capacitatea de continuare a misiunii aeriene

²³ Acumulatorii de tip LiPo utilizați pentru propulsia aeronavelor fără pilot contribuie semnificativ la costurile inițiale și mai ales a celor de exploatare. Un amănunt deseori neglijat arată că acești acumulatori furnizează energie la parametrii necesari doar pentru o perioadă de 12 luni de la fabricație. După această perioadă, acumulatorii mai sunt folosiți ca back-up încă o perioadă de 6÷12 luni. Aceste detalii tehnice la care se adaugă necesarul relativ mare de acumulatori pentru misiunile din teren (minim 4, optim 6) explică de ce costurile de exploatare sunt atât de ridicate.

și de revenire, în siguranță, la punctul de aterizare. O altă componentă importantă (sistemul *fail safe*) gestionează scenarii de avarie mai complexe, așa cum sunt epuizarea rezervei de energie din acumulatori sau pierderea orientării operatorului uman de la sol.

După executarea a numeroase teste în condiții atmosferice diverse (de la atmosferă calmă la vânturi puternice în rafală), ce au fost derulate cel de-al doilea trimestru al anului 2014, prototipul Q1D2 a fost considerat apt pentru a executa misiuni reale de explorare arheologică aeriană (figura 5).



Figura 5. De la stînga la dreapta: Hexacopter H1D1, Quadcopter Q1D2, DJI Phantom 3

Tabelul 1. Caracteristici comparate ale multicopterelor folosite în proiect

UAV	H1D1	Q1D2	DJI Phantom 3 Adv.
Sistem de propulsie	Hexacopter	Quadcopter	Quadcopter
Viteză maximă de zbor	18 m/s	20 m/s	16 m/s
Viteză maximă ascensională	5 m/s	5 m/s	5 m/s
Sistem stabilizare cameră (gimbal)	2 axe, <i>brushless</i>	2 axe, servo	2 axe, servo
Sarcină utilă utilizată	1,2 kg	0,6 kg	0,3 kg
din care: greutate gimbal	800 g	200 g	200 g
greutate cameră	400 g	400 g.	100 g.
Greutate totală la decolare	4,2 kg	2,1 kg	1,3 kg
Capacitate totală acumulatori	10600 mAh	5300 mAh	4480 mAh
Timp de zbor (condiții reale)	11 min.	15 min.	18 min.
Camera	Sony Nex 5T	Sony Nex 5T	FC300S
Rezoluție	16 Mpx	16 Mpx	12 Mpx
Mărime senzor	23,4 x 15,6 mm	23,4 x 15,6 mm	6,17 x 4,55 mm
Obiectiv	Interschimbabil	Interschimbabil	Fix:
	- 24 mm sau	- 24 mm sau	- 20 mm
	- 28,5 mm	- 28,5 mm	

În toamna anului 2015, atunci când prima etapă a ciclului de explorare aeriană a sectorului sudic al *Limes Transalutanus* a fost deja încheiată, a fost testată o dronă comercială portabilă. Seria Phantom, foarte populară printre amatorii de filmări aeriene de divertisment, ajunsă la acel moment la generația a 3-a (figura 5), se caracterizează prin greutate mică: mai puțin de 1,3 kg, timp de zbor în condiții atmosferice reale destul de ridicat (până la 18 minute), cameră foto/video integrată, sistem de amortizare a vibrațiilor și stabilizare a camerei în 3 axe cu performanțe excelente și flux video digital care permite navigația în sistem FPV (cu latență ridicată, totuși; vezi Tabelul 1). Testele derulate au arătat că utilizarea acestei drone pentru explorarea aeriană a siturilor arheologice, în general, și a siturilor de tip coridor, așa cum este *Limes Transalutanus*, poate fi luată în considerație atunci când portabilitatea și ușurința în exploatare sunt criterii importante. Imaginile aeriene au o rezoluție și o calitate medie-slabă, la limita inferioară a cerințelor algoritmilor și aplicațiilor de software de prelucrare fotogrammetrică, produsul final fiind totuși posibil de folosit și de integrat în ansamblu informațional mai larg al proiectelor de cercetare arheologică. În plus, capacitățile videografice ale acestei drone pot fi un supliment util atunci când este necesară valorificarea către publicul larg a patrimoniului arheologic prin clipuri și documentare video.

Experiența complexă dobândită în această primă etapă de proiectare, construcție și testare comparativă, inclusiv cu soluții comerciale, a mai multor sisteme UAV, permit autorilor formularea unor recomandări. Cercetarea interdisciplinară modernă, a patrimoniului arheologic, cu ajutorul aeronavelor fără pilot la bord, impune condiții specifice, adeseori mult diferite de caracteristicile tehnice ale echipamentelor disponibile în domeniul comercial. Din acest motiv, abordarea cea mai potrivită este aceea a construirii de soluții aeriene proprii, pe deplin adaptate obiectivelor generale și specifice ale cercetării și valorificării patrimoniului arheologic. În viitor, este de așteptat ca soluțiile aeriene pentru aplicații topo-cadastrale să ajungă la maturitate, iar utilizarea acestora în cercetare arheologică poate fi luată în considerație. În anumite situații, ținând cont de nevoia de portabilitate și/sau de documentare videografică, soluțiile comerciale pot să constituie o alegere utilă, dar limitată. În cazul aplicațiilor de înaltă performanță, în care sunt utilizate platforme senzoriale complexe și/sau experimentale (camere termice, LiDAR și alte forme de telemetrie laser, geofizică aeropurtată etc.) singura opțiune corectă este aceea a dezvoltării de soluții tehnice proprii, cel mai adesea prin parteneriat interdisciplinar cu colective de cercetare din alte domenii.

Rezultate

În intervalul iulie 2014-iunie 2015, au fost executate 67 de misiuni aeriene cu drone, dintre care 54 doar în 2015, însumând peste 800 de minute de zbor activ (figura 6). Cele mai multe dintre aceste misiuni au fost realizate cu prototipul Q1D2, mai sus descris. În acest fel, au fost înregistrate mai mult de 3000 de fotografii oblice și 5300 imagini verticale, care au permis documentarea a peste 2600 ha, respectiv peste 50 km liniari, din sectorul sudic (cuprins între Dunăre și râul Argeș) al graniței Imperiului Roman în Dacia – *Limes Transalutanus*.

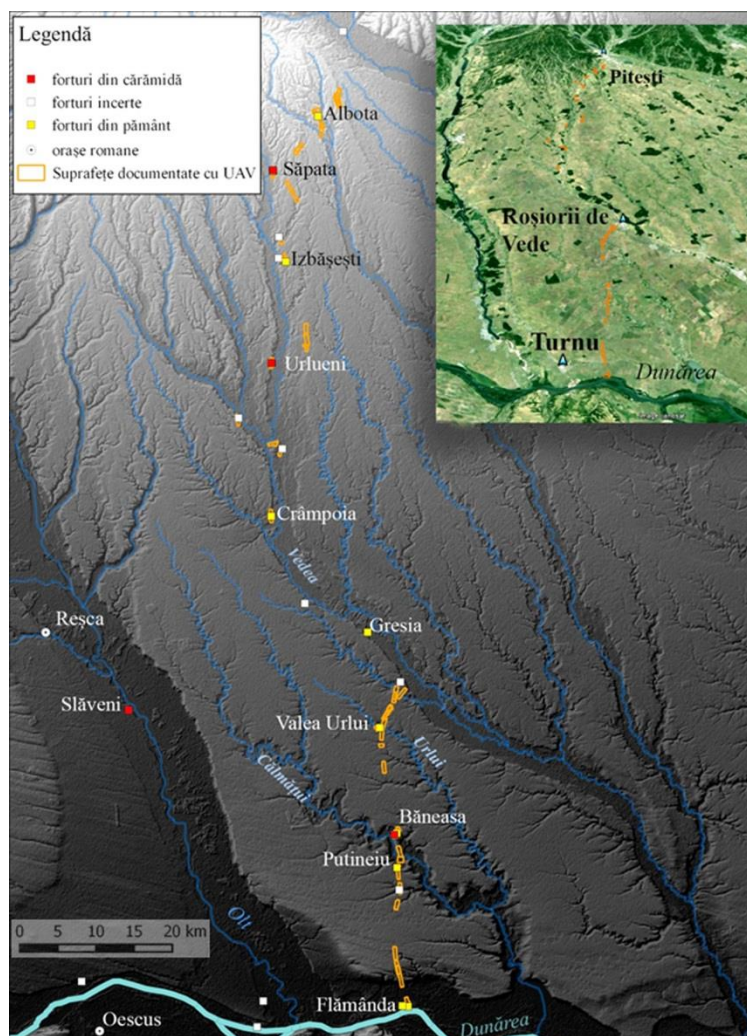


Figura 6. Localizarea zonelor survolate pe parcursul tuturor celor 67 de misiuni aeriene realizate cu UAV până în prezent, în sectorul sudic al Limes Transalutanus. Ca fundal s-au folosit DEM Europea (harta mare) și imaginile Google Earth (harta mică). A fost reprezentată doar rețeaua de râuri majore.

Dacă la primele zboruri-test realizate cu un multicopter în configurație hexacopter (prototip H1D1), cu sarcina utilă maximă de 1,2 kg, durata misiunii aeriene era între 7 și 12 minute (în funcție de capacitatea acumulatorului utilizat), odată cu reajustarea proiectului platformei de zbor, a fost posibilă execuția de misiuni mai lungi, de până la 15 minute (uzual 13, lăsând marjă de securitate). Coroborând modificările în platforma de zbor cu optimizarea strategiei de acoperire a terenului, a devenit posibilă documentarea prin ortofotografie și model digital, în cadrul unei singure misiuni, a unor suprafețe măsurând între 50 și 90 de hectare. Raportând acest rezultat la aspectul liniar al obiectivului arheologic investigat, putem calcula un traseu mediu de 1,5 km lungime în lungul graniței romane și/sau structurilor asociate, pentru fiecare zbor, pe un coridor de 450 m lățime. În acest fel, proiectul *Limes Transalutanus* a devenit prima activitate sistematică de cercetare arheologică din România, realizată cu ajutorul sistemelor UAV, aliniindu-se, prin aceasta, evoluțiilor metodologice internaționale.

Principalele produse realizate în cadrul misiunilor de arheologie aeriană la medie și joasă altitudine sunt redate mai jos.

1. Produse primare:

- imagini aeriene verticale (axa optică este perpendiculară pe suprafața terenului); avantaje: scara constantă, detalii maxime, distorsiuni minime;
- imagini aeriene oblice cu unghi mic (sub 45 de grade²⁴, nu se vede orizontul) – sunt utile, în cadrul procesului de tip SfM de obținere a modelelor digitale de teren; cu cât sunt utilizate mai multe imagini înregistrate din unghiuri diferite ale aceleiași scene, cu atât rezultatele sunt mai corecte geometric (se determină mai corect geometria internă a lentilei și camerei) și, în consecință, se obțin modele de teren mai corecte; sunt numite, uzual, „oblice joase” (vezi figura 7);
- imagini aeriene oblice cu unghi mare (orizontul este vizibil) – sunt cele mai utile pentru detectarea de anomalii în sol și vegetație, oferă perspectivă integratoare și imagine de ansamblu asupra peisajului; sunt numite, uzual, „oblice înalte”.

2. Produse secundare:

- mozaic ortorectificat de imagini verticale (rezoluție 5 cm/pixel) - se obține, în special, din imagini verticale, implementând tehnici de prelucrare fotogrammetrice (SfM – *Structure from Motion*); pentru rezultate acceptabile este necesar ca aceeași scenă să fie surprinsă în 3 fotografii, iar pentru rezultate excelente în intervalul 5-9 fotografii;
- model digital al terenului, de tip DSM²⁵ – conține nivelul vegetației, clădirilor și alte structuri antropice; este calculat dintr-o combinație de imagini verticale și oblice (în special cu unghi mic), cu ajutorul tehnicilor și algoritmilor SfM;
- model digital de elevație a terenului (DEM) – este calculat automat sau prin proceduri semiautomate din (DSM); rezoluția poate fi mai bună de 25 cm/pixel; practica a dovedit că observarea modelelor de teren iluminate sub diferite unghiuri reprezintă principala metodă de identificare a anomaliilor/structurilor arheologice, metoda este, adeseori, mai relevantă decât analiza fotografiilor aeriene;
- planuri topografice la diverse scări, cu sau fără curbe de nivel, profile altimetrice, analize de vizibilitate și alte analize spațiale – sunt calculate din modelele digitale ale terenului.

O mare parte dintre rezultatele explorării aeriene la medie și joasă altitudine realizate, în perioada 2014-2015, cu ajutorul tehnologiei UAV, au fost deja utilizate în cadrul unor analize interdisciplinare ce fac obiectul mai multor din lucrări din prezentul volum, dispărând nevoia de a argumenta, aici, valoarea documentară a produselor UAV.

²⁴ Unde unghiul zero este perpendiculara la sol (nota editorului).

²⁵ DSM (*Digital Surface Model*) – model al suprafeței terenului, inclusiv vegetație, clădiri și alte structuri antropice.

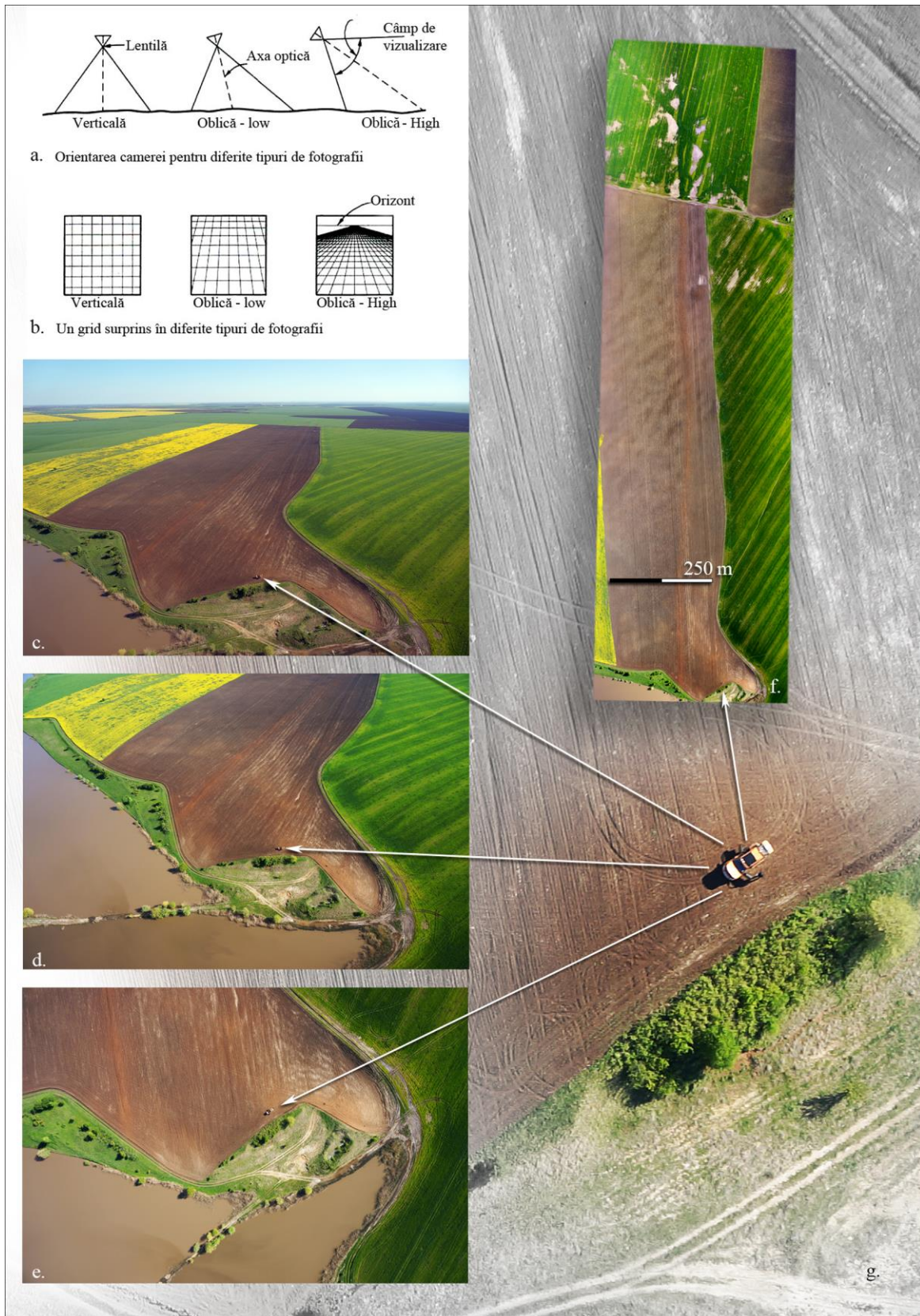


Figura 7. Produsele arheologiei aeriene cu UAV: a. ilustrarea tipurilor de imagini; b. exemplificarea unor distorsiuni geometrice ale imaginilor; c. imagine oblică cu unghi mare; d. imagine oblică cu unghi mic; e. imagine verticală; f. mozaic ortorectificat realizat din 120 de imagini verticale; g. exemplu de imagine verticală (detaliu) de la 200 m altitudine realizată cu SonyNEX5T-19mm, la rezoluție maximă. Studiu de caz: Valea Urlui. Toate vederile sunt orientate aproximativ sud. Troianul ars se vede la cca 100 m est de mașină.

Concluzii

Abordarea științifică, în cadrul unui proiect interdisciplinar, a temelor de cercetare a sectorului sudic al *Limes Transalutanus* a fost condiționată de precizarea și implementarea unui cadru metodologic nou, adaptat pentru complexitatea, mărimea și caracterul linear al sitului arheologic studiat. Ansamblul metodologic astfel dezvoltat are toate atributele unei tehnologii inovative ce poate fi aplicată în numeroase alte scenarii de cercetare, conservare și valorificare a patrimoniului arheologic.

Una dintre componentele esențiale ale noii tehnologii o constituie explorarea aeriană cu ajutorul tehnologiei aeronavelor fără pilot la bord. Avantajele teoretice ale utilizării extensive a tehnologiei UAV în cadrul proiectului au fost încă de la început evidente, aceasta, împreună cu prelucrarea fotogrametrică avansată și geofizica de mare randament, urmând să asigure racordarea sitului arheologic studiat la peisaj și mediu natural. Echipamentele și logistica necesare nu au fost accesibile pentru a fi achiziționate comercial și de aceea a fost necesar un efort propriu pentru proiectarea, construcția, reglarea și testarea echipamentelor și a anexelor tehnice asociate. După finalizarea acestei prime etape, a fost posibilă executarea a numeroase misiuni aeriene, imaginile verticale și oblice precum și produsele secundare fiind intensiv utilizate, în cadrul proiectului, pentru studiul ipotezelor arheologice de lucru. Au fost, astfel, identificate elemente structurale noi și au fost mai bine caracterizate componentele cunoscute din cercetări anterioare.

Dincolo de rezultatele cu semnificație arheologică, experiența tehnologică acumulată a permis dezvoltarea unor soluții noi, care pot fi, la rândul lor, considerate tehnologii noi: platforme și sisteme de navigație aeriană, protocoale de achiziție a imaginilor aeriene, procedee de prelucrare a datelor, abordări specializate pentru integrarea rezultatelor de teledetectie cu datele geofizice și înregistrările arheologice. Dezvoltarea acestei componente tehnologice constituie, în sine, un avans în domeniul arheologiei aeriene, definind, de fapt două subdomenii noi: teledetectia de medie și mică altitudine și, asociat, arheologia aeriană de medie și mică altitudine

Referințe

Concept for Operations of Drones 2015.

https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/204696_EASA_concept_drone_brochure_web.pdf

Fernández-Lozano Javier, Gutiérrez-Alonso Gabriel 2016 – Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: An example from the Roman Gold District of the Eria River Valley (NW Spain, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, 5, 509-520.

Fernández-Hernandez J., González-Aguilera D., Rodríguez-Gonzálvez P., Mancera-Taboada, J. 2015 – Image-Based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, Low-Cost Tool for Archaeological Applications, *Archaeometry*, 2015, 57, 128–145.

Mozas-Calvache A.T., Pérez-García J., Cardenal-Escarcena F., Mata-Castro E., Delgado-García J. 2012 –Method for photogrammetric surveying of archaeological sites with light aerial platforms. *Journal of Archaeological Science*, 2012, 39 (2), 521-530.

Stoll Johannes B. 2013 - Unmanned Aircraft Systems For Rapid Near Surface Geophysical Measurements. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-1/W2, 2013, 391-394.

Teodor, Eugen S., 2013 - *Uriașul invizibil: Limes Transalutanus. O reevaluare la sud de râul Argeș*, Târgoviște: Cetatea de Scaun.

UAV Drones Market by Type (Fixed Wing, Rotary Blade, Nano, Hybrid), Application (Law Enforcement, Precision Agriculture, Media and Entertainment, Retail), & Geography (Americas, Europe, APAC, RoW) - Analysis & Forecast to 2020 by: marketsandmarkets.com, Publishing Date: October 2015, Report Code: SE 3099

Wiseman James R., El-Baz Farouk (ed.) 2007 - Remote Sensing in Archaeology, Springer Science & Business Media.