L'eredità ambientale e geomorfologica della Prima Guerra Mondiale: GIS e remote sensing per la ricostruzione del paesaggio lungo il Fronte Occidentale

Beatrice D'Agostino[1][0009-0007-5483-3453] e Enrico Borgogno[0000-0003-4570-8013]

[1] Dottorato in Osservazione della Terra, Sapienza Università di Roma, beatrice.dagostino@uniroma1.it
[2] Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari, Università di Torino, enrico.borgogno@unito.it

Abstract Questo studio si propone di indagare, quantificare e mappare l'impatto ambientale e geomorfologico causato dagli intensi episodi bellici susseguitesi lungo il Fronte Occidentale durante la Prima Guerra Mondiale. L'obiettivo è identificare e interpretare le trasformazioni che rimangono rilevabili a più di un secolo di distanza, attraverso una ricostruzione diacronica dell'evoluzione del paesaggio del campo di battaglia. La ricerca adotta un approccio integrato in ambiente GIS per analizzare e quantificare tali trasformazioni, confrontando due aree di studio pertinenti entrambe al Dipartimento della Somme (Francia) e caratterizzate da destini post-bellici differenti: il territorio agricolo di Cléry-sur-Somme e il massiccio forestale del Bois de Saint-Pierre-Vaast. Per valutare l'evoluzione del paesaggio, la ricerca integra diverse fonti geospaziali: cartografia storica militare, fotografia aerea storica e DTM LiDAR. Nel caso di Cléry-sur-Somme l'applicazione della tecnica fotogrammetrica *Structure from Motion* (SfM) su fotogrammi aerei dell'agosto 1919 ha permesso di generare un ortomosaico storico ad altissima risoluzione, che mostra il paesaggio all'indomani del conflitto, con tracce oggi completamente livellate dalle pratiche agricole. Al contrario, il DTM nell'area boscata del Bois de Saint-Pierre-Vaast conserva intatta la memoria morfologica degli scontri ed è stato possibile procedere all'estrazione vettoriale dei crateri.Attraverso un approccio multidisciplinare, il progetto mira a ricostruire l'eredità ambientale del conflitto, contribuendo alla ricostruzione storica e alla comprensione dei processi di trasformazione territoriale indotti dalla guerra.

Parole chiave: Prima guerra mondiale, GIS, Fotogrammetria storica, LiDAR

1 Introduzione

Gli intensi episodi bellici della Prima Guerra Mondiale lungo il Fronte Occidentale hanno causato profonde trasformazioni e lasciato tracce indelebili nei territori coinvolti

Molti di questi effetti di origine antropica sono ancora leggibili nel paesaggio attuale, sebbene non sempre immediatamente visibili a causa delle bonifiche agricole e a processi di riforestazione del dopoguerra. L'intensa attività militare, attraverso massicci bombardamenti d'artiglieria, la guerra di mina e la costruzione di sistemi difensivi, ha determinato una radicale alterazione morfologica del terreno, generando crateri, devastando la copertura vegetale e distruggendo interi insediamenti umani, lasciando al contempo numerose tracce archeologiche [1, 2].
In questo scenario, la Battaglia della Somme (1° luglio e il 18 novembre 1916) costituisce uno degli esempi più emblematici di tale rimodellamento antropico del territorio. Nel corso dei circa cinque mesi di scontri, il prolungato bombardamento con artiglieria pesante, unito all'esplosione di imponenti mine sotterranee, ha stravolto la microtopografia locale, arrivando anche a cancellare interi centri abitati [3, 4]. Oggi, la valle della Somme mostra chiaramente questa complessa stratificazione: se da un lato l'agricoltura e le bonifiche hanno riassorbito gran parte delle deformazioni superficiali, dall'altro le aree boschive custodiscono ancora le ferite del conflitto.

2 Materiali e metodi

2.1 Aree di studio

Le aree di studio prese in considerazione (fig.1) sono entrambe collocate in Francia, nella porzione nord- orientale del Dipartimento della Somme, nella regione Hauts-de-France. La prima è pertinente alla cittadina di Cléry-sur-Somme, teatro di aspri combattimenti sul finire dell'estate 1916 che portarono alla distruzione pressoché totale del villaggio. Situato sulla riva destra del fiume Somme in prossimità di Péronne, il sito costituiva un caposaldo tedesco protetto da un elaborato difensivo costituito da trincee, cunicoli e reticolati. Dopo sanguinosi scontri svoltisi in agosto, nell'ambito di un'offensiva generale scattata su tutto il fronte della VI armata, 279° Reggimento di Fanteria riuscì a spezzare definitivamente la resistenza tedesca e a liberare Cléry-sur-Somme[5]. Inclusa al termine del conflitto nella zona rossa, all'inizio degli anni '20 prese avvio un processo di ricostruzione e bonifica finalizzata a restituire i terreni a una destinazione agricola.

La seconda area di interesse è costituita invece dal Bois de Saint-Pierre-Vaast, un massiccio forestale di circa 1200 ettari occupato nel settembre 1914 e sfruttato dall'esercito tedesco come complesso bastione difensivo fino alla riconquista francese nel novembre 1916, a seguito di feroci combattimenti di artiglieria. Il luogo divenne nuovamente teatro di scontri nel marzo e nell'estate 1918, determinando una profonda devastazione della copertura arborea [6, 7]. Dichiarato Zona rossa, l'area è stata soggetta a riforestazione e ancora oggi risulta solo parzialmente bonificata.

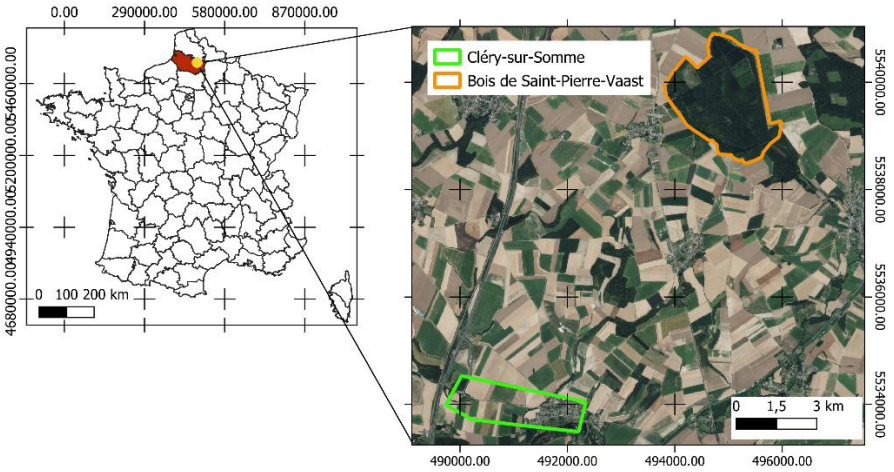

Fig.1: Aree di studio. Mappa di base: BD ORTHO® 2024; SR: WGS 84/UTM zone 31N.

2.2 Dataset geospaziali: cartografia storica, fotografia aerea, dati LiDAR

Per uno studio di questo tipo risulta fondamentale un approccio multidisciplinare che preveda l'analisi e l'integrazione in ambiente GIS di dati provenienti da fonti differenti. In primo luogo, sono state reperite le carte storiche disponibili per le aree selezionate. In particolare, sono state utilizzate le carte militari con scala compresa tra 1:5.000 e 1:20.000 dell'area settentrionale della Somme conservate e rese disponibili online dagli archivi del Dipartimento della Somme [8]. Esse sono state georiferite nel sistema di riferimento EPSG:32631-WGS 84/UTM zone 31N mediante lo strumento Georeferencer del software QGIS. Per la georeferenziazione è stata utilizzata come base cartografica il servizio WMS BD ORTHO® distribuito dall'IGN (*Institut national de l'information géographique et forestière*), comprendente una collezione di ortomosaici con risoluzione a 20cm [9]. Sull'ortofoto 2024 sono stati individuati i Ground Control Points (GCP)**,** selezionati tra gli elementi stabili, principalmente incroci stradali rimasti invariati nel tempo.

Grazie allo strumento *Remonter le temps – IGN* [10] è stato possibile scaricare i fotogrammi storici acquisiti con un volo aereo risalente al 12 agosto 1919 sul villaggio di Cléry Sur Somme, con i quali si è potuto procedere a una ricostruzione fotogrammetrica dell'area in un momento immediatamente successivo alla fine del conflitto.

Fondamentale per questa prospettiva di ricerca, è poi il DTM derivato da dati LiDAR che sempre l'IGN distribuisce gratuitamente ad alta risoluzione (0,50m/px) [11]. I tasselli DTM relativi all'area di studio sono stati scaricati direttamente in "QGIS" per mezzo del plugin "PointCloudFR".

2.3 Ricostruzione fotogrammetrica per il territorio di Cléry sur Somme

Per realizzare un ortomosaico con i fotogrammi sopracitati, si è utilizzato il software di fotogrammetria *Structure from Motion* "Agisoft Metashape". Trattandosi di immagini prive di coordinate, l'orientamento del blocco fotogrammetrico è stato eseguito inserendo in "Agisoft" GCP estratti da cartografia storica georeferenziata e da elementi antropici rimasti inalterati ricavati da ortofoto, con SR: EPSG:32631-WGS84/UTM zone 31N. Non essendo in alcun modo noti i parametri di orientamento interno della camera utilizzata, si sono mantenuti quelli stimati dal software. A seguito dell'allineamento dei fotogrammi, è stata elaborata la nuvola densa di punti sulla base della quale è stato generato il Modello Digitale di Elevazione (DEM) con risoluzione spaziale di 17cm/px. Infine, utilizzando il DEM con superficie geometrica di appoggio i fotogrammi sono stati ortorettificati in un ortomosaico con risoluzione a terra di 10 cm/px. La georeferenziazione è stata ulteriormente affinata grazie allo strumento Georeferencer in "QGIS" applicando una trasformazione Polinomiale di I grado con metodo di ricampionamento Nearest neighbor,ottenendo un RMSE planimetrico di 6m.

2.4 Analisi del DTM per l'area del Bois de Saint-Pierre-Vaast

Trattandosi di un'area boscata e per la maggior parte non bonificata, l'analisi del DTM del Bois de Saint-Pierre-Vaast prometteva la possibilità di individuare ancora oggi la persistenza archeologica di tracce del conflitto. Per mettere in luce queste anomalie morfologiche del terreno, il modello digitale del terreno è stato elaborato mediante differenti algoritmi di visualizzazione processati in "QGIS" con il plugin "Relief Visualization Toolbox (RVT)".

Contestualmente, in ambiente "SAGA GIS", al fine di isolare i crateri causati da artiglieria o esplosione rimuovendo la componente macro-topografica, è stato calcolato il *Local Relief Model* (LRM), sottraendo il DEM originale da una versione levigata dello stesso generata tramite lo strumento *Simple Filter* (raggio di 60 pixel).

$$LRM = DTM_{levigato} - DTM_{\text{originale}}$$

Attraverso questa differenza, la componente di pendenza generale viene azzerata, consentendo di evidenziare le variazioni altimetriche negative corrispondenti alle cavità [12]. Per filtrare la rugosità trascurabile del terreno, è stata applicata una sogliatura (*thresholding*) e per discriminare i soli crateri con una profondità pari o superiore a 0,25m è stata applicata una riclassificazione binarizzata in cui ai pixel caratterizzati da un valore di depressione pari o superiore a 0,25 metri è stato assegnato valore 1, rappresentante i crateri, mentre a tutti i pixel con valori inferiori è stato assegnato il valore 0, rappresentante lo sfondo. Infine, è stato applicato un filtro *Sieve* con soglia di 5 pixel per ripulire dal rumore topografico residuo.

Il raster LRM risultante è stato sottoposto a vettorializzazione convertendo le regioni di pixel a valore 1 in geometrie poligonali. Ciascuna entità è stata successivamente arricchita nella tabella attributi associata con parametri morfometrici descrittivi, tra cui l'area superficiale, il diametro equivalente medio e la profondità massima, estratti tramite statistiche zonali calcolate in "QGIS".

Per valutare il pattern di distribuzione e le concentrazioni spaziale dei crateri, per ogni poligono è stato calcolato ed estratto il relativo centroide geometrico dai quali è

stata eseguita un'interpolazione di densità spaziale con l'algoritmo *Kernel Density Estimation* per la generazione di una *Heatmap.*

3 Risultati e discussioni

Pur trattandosi di uno studio ancora a uno stadio preliminare, l'integrazione dei dati cartografici storici, della fotogrammetria storica e dei rilievi LiDAR ad alta risoluzione comunque permesso di analizzare e quantificare alcune prime evidenze dell'impatto geomorfologico del conflitto.

3.1 Ortomosaico di Cléry-sur-Somme

Dall'analisi dell'ortomosaico, emergono dettagliatamente i segni dell'impatto antropico e delle distruzioni causate dai combattimenti dell'estate 1916. Sul terreno sono ben identificabili i reticoli delle trincee e dei camminamenti di collegamente, infrastrutture logistiche militari, oltre a un'elevata concentrazione di crateri di artiglieria distribuiti in maniera capillare su tutta la superficie. Il confronto in ambiente GIS permette di associare le strutture difensive individuate con quelle riportate nella cartografia militare. Inoltre, si riscontra la presenza di tracce non censite dalla cartografia ufficiale, evidenziando la natura fortemente dinamica e in continua evoluzione del campo di battaglia. Il raffronto con il DTM dimostra la quasi totale levigatura delle micro-deformazioni superficiali determinata dai processi di ricostruzione, spianamento e bonifica agricola che hanno progressivamente riassorbito e cancellato la visibilità diretta delle tracce dei combattimenti nei terreni coltivati (fig.2).

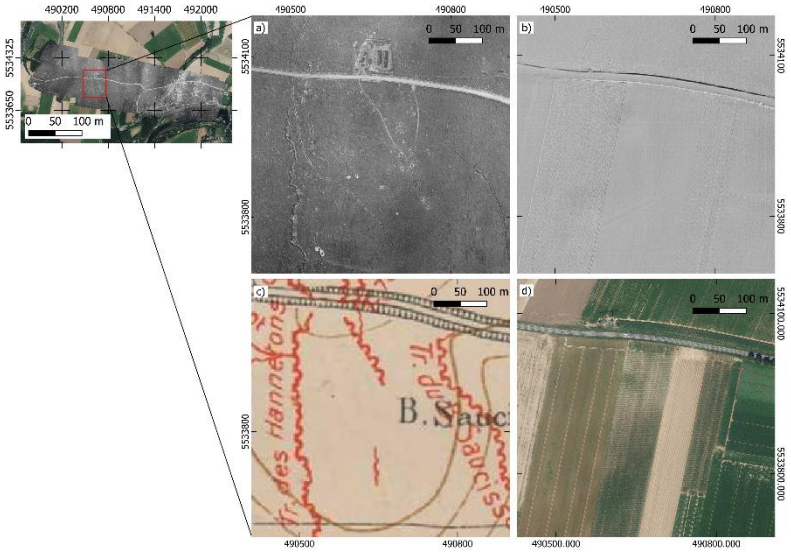

Fig. 2: Particolare dell'ortomosaico ottenuto (a) e confronto con DTM – *Hillshade* (b), Carta storica *Nord de la Somme. Groupe des canevas de tir - 22FI74, Archives de la Somme* (c), BD

ORTHO® 2024 (d) ; SR: WGS 84/UTM zone 31N.

3.2 Analisi LiDAR e morfometria dei crateri nel Bois de Saint-Pierre-Vaast

In netto contrasto con le aree agricole di Cléry-sur-Somme, l'analisi del DTM nel Bois de Saint-Pierre-Vaast ha confermato come la copertura boscata e la bonifica parziale abbiano preservato la memoria morfologica del conflitto. La vettorializzazione e l'estrazione delle statistiche zonali hanno permesso di caratterizzare quantitativamente i crateri in termini di area superficiale, diametro equivalente medio e profondità massima. L'*heatmap* generata mostra come le concentrazioni più elevate si registrino in corrispondenza dei settori settentrionale e occidentale, trovando riscontro in quanto riportato nei resoconti delle operazioni [6, 13].

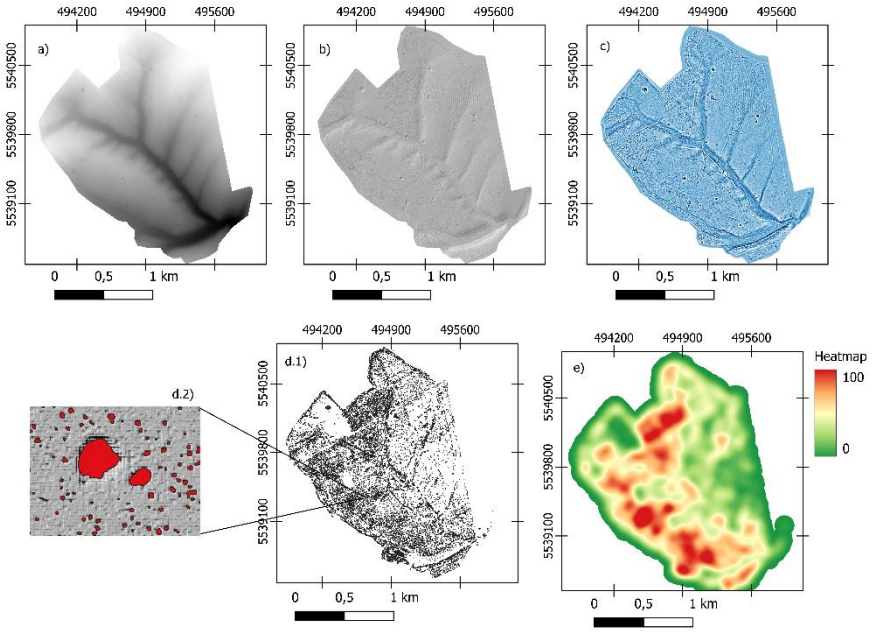

Fig.3: Analisi dell'area del Bois de Saint-Pierre-Vaast, a) DTM ; b) *Hillshade* ; c) LRM ; d1) Vettorializzazione dei crateri; d2) Particolare della vettorializzazione; e) *Heatmap*; SR: WGS 84/UTM zone 31N.

4 Conclusioni e prospettive future

I primi risultati ottenuti in questa fase preliminare della ricerca dimostrano la validità di un approccio multidisciplinare basato sull'integrazione tra dati di differente natura. I successivi sviluppi mirano ad ampliare il quadro conoscitivo e a consolidare la metodologia estendendo l'indagine anche ad altre tipologie di dato. In particolare, si intende testare le potenzialità di immagini multispettrali e iperspettrali acquisite da

satellite (es. Sentinel-2, Planetscope, PRISMA) o da drone. Esse permetteranno di osservare eventuali anomalie vegetative e dei suoli (*crop marks* e *soil marks*) corrispondenti a tracce non più rilevabili topograficamente in aree agricole. L'analisi iperspettrale inoltre consentirà di identificare variazioni nella composizione minerale del suolo dovute al rimescolamento stratigrafico (*bombturbation*), alla presenza di metalli pesanti o a contaminazioni. Si intende anche proseguire nell'analisi spaziale, implementando, ad esempio, analisi di visibilità (*Viewshed Analysis*) per ricostruire le dinamiche logistiche, i campi di tiro e la visibilità reciproca tra le linee avversarie.

Questo approccio non solo arricchisce la ricostruzione storica nell'ambito dell'archeologia dei paesaggi di guerra, ma dimostra come il terreno costituisca un vero e proprio archivio materiale, dove l'impatto ecologico e morfologico dei conflitti continua a manifestarsi attraverso cicatrici indelebili.

Riferimenti bibliografici

1. Milanese, M.: APM–Archeologia Postmedievale, 22, 2018. L'archeologia della Prima Guerra Mondiale. Scenari, progetti, ricerche/The archaeology of the First World War. Research background, projects and case studies. All'Insegna del Giglio (2020).

2. Tucker, R.P., Keller, T., McNeill, J.R., Schmid, M.: Environmental histories of the first world war. Cambridge University Press (2018).

3. Boutet, M., Nivet, P.: La Bataille de la Somme: L'hécatombe oubliée, 1er juillet-18 novembre 1916. Tallandier (2016). https://doi.org/10.14375/NP.9791021018495.

4. Cimmino, M.: Breve storia della prima guerra mondiale. Vol. 1: 1914-1916. Gaspari (2017).

5. Fayolle, M.: Cahiers secrets de la Grande Guerre. Nouveau Monde (2013). https://doi.org/10.14375/NP.9782365838290.

6. Historique du 91e régiment d'infanterie pendant la campagne 1914-1918. Charleville (1920).

7. Jünger, E.: Nelle tempeste d'acciaio. Guanda (2014).

8. Archives en ligne, https://archives.somme.fr/page/archives-en-ligne-1, last accessed 2026/10/11.

9. data.gouv.fr, https://www.data.gouv.fr/datasets/bd-ortho-r, last accessed 2026/10/11.

10. Remonter le temps - IGN, https://remonterletemps.ign.fr/, last accessed 2026/10/11.

11. data.gouv.fr, https://www.data.gouv.fr/datasets/mnt-lidar-hd/informations, last accessed 2026/10/12.

12. Matos-Machado, R. de, Toumazet, J.-P., Bergès, J.-C., Amat, J.-P., Arnaud-Fassetta, G., Bétard, F., Bilodeau, C., Hupy, J.P., Jacquemot, S.: War landform mapping and classification on the Verdun battlefield (France) using airborne LiDAR and multivariate analysis. Earth Surface Processes and Landforms. 44, 1430–1448 (2019). https://doi.org/10.1002/esp.4586.

13. Journaux des marches et opérations (JMO), https://www.memoiredeshommes.defense.gouv.fr/conflits-operations/premiere-guerre-mondiale/journaux-des-unites-engagees-dans-la-premiere-guerre-mondiale.