

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Corso di laurea magistrale in Geografia e Processi Territoriali

Riconoscimento mediante dati satellitari Sentinel-2 dei suoli nudi
nella regione Emilia-Romagna per una loro sostenibile
valorizzazione

Tesi di laurea in Telerilevamento

Relatore

Prof.ssa Michaela De Giglio

Candidato

Alessandro Gualtieri

Correlatori

Prof. Nicolas Greggio
Dott. Alessandro Pirola
Prof. Marco Dubbini

Sessione Unica
Anno Accademico 2021-2022

INDICE

ABSTRACT.....	IV
INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1 – I cambiamenti climatici nelle politiche del settore agricolo.....	4
1.1 – <i>Effetti dei cambiamenti climatici in agricoltura</i>	4
1.2 – <i>Contributo dell’agricoltura ai cambiamenti climatici</i>	6
1.3 - <i>Politiche europee</i>	7
1.4 - <i>Politiche italiane</i>	10
1.5 - <i>Politiche regionali in Emilia-Romagna</i>	12
CAPITOLO 2 - Uso del suolo in Emilia-Romagna.....	15
2.1 – <i>Area di studio</i>	15
2.2 - <i>Uso del suolo attuale</i>	16
2.3 - <i>Uso del suolo negli anni ‘20</i>	20
2.4 – <i>Uso del suolo negli anni ‘50</i>	21
CAPITOLO 3 – Stato dell’arte e dati.....	23
3.1 – <i>Stato dell’arte</i>	23
3.2 – <i>Il programma Copernicus</i>	33
3.3 – <i>Le missioni Sentinel</i>	37
3.4 – <i>Altri dati utilizzati</i>	41
CAPITOLO 4 – Analisi dei dati per il riconoscimento dei suoli nudi.....	44
4.1 – <i>Fase preliminare: preparazione dei dati</i>	44

4.2 – <i>Analisi dei dati</i>	58
a) Calcolo dell'NDVI.....	58
b) Selezione dei valori di NDVI.....	60
c) Individuazione dei terreni non coltivati.....	61
d) Vettorializzazione.....	63
e) Statistiche sulle aree.....	68
Statistiche sulle aree	
f) Validazione.....	76
CAPITOLO 5 – Possibili impieghi dei suoli nudi.....	85
5.1 – <i>Biomasse</i>	85
5.2 – <i>Colture energetiche</i>	89
5.3 – <i>Simulazione sul territorio emiliano-romagnolo</i>	92
CONCLUSIONI.....	99
BIBLIOGRAFIA.....	102
SITOGRAFIA.....	105

ABSTRACT

La ricerca oggetto del presente elaborato di tesi persegue fini di lotta ai cambiamenti climatici e promozione delle energie rinnovabili, in linea con i diciassette Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile definiti dall'Organizzazione delle Nazioni Unite nel 2015 a causa dell'incombente emergenza ambientale in atto; inoltre individua risorse che possono risultare utili in situazioni di crisi energetica come quella iniziata nel 2022.

L'obiettivo dell'elaborato è l'individuazione dei *bare soils* o “suoli nudi”, ovvero terreni lasciati senza copertura nei mesi che intercorrono tra un raccolto e la semina successiva, presenti nella parte pianeggiante dell'Emilia Romagna nell'anno 2021. È stata eseguita una ricerca introduttiva sulle politiche agricole inerenti i cambiamenti climatici e sull'uso del suolo nell'area di studio. Nel procedimento seguente sono stati utilizzati immagini e dati satellitari a libero accesso, rilevati dai satelliti *Sentinel-2* del programma *Copernicus* dell'Unione Europea. Per mezzo di *software open source*, sono state identificate le superfici di suolo nudo tramite calcolo degli indici di vegetazione *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e selezione delle aree con valori dell'indice idonei per 4 mesi consecutivi; sono state create mappe tematiche con le posizioni dei terreni, sono state ricavate statistiche sulla loro estensione e sono state effettuate validazioni dei risultati. Secondo i calcoli, nei 2 periodi più promettenti i suoli nudi coprivano rispettivamente circa il 4% e il 25% dell'area di studio. I terreni individuati sono stati poi utilizzati come input per una simulazione di un loro utilizzo sostenibile. Infatti, quando abbastanza estesi e liberi per un tempo sufficiente, possono essere utilizzati per colture intercalari come il sorgo, volte ad ottenere biomasse adatte alla produzione di biocarburanti.

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni i cambiamenti climatici sono divenuti una vera e propria emergenza a livello mondiale, a causa dell'incessante inquinamento. I gas prodotti dalle attività umane causano assottigliamento dello strato d'ozono, riscaldamento dell'atmosfera, scioglimento dei ghiacci e anomalie meteorologiche. Il presente lavoro annovera tra gli obiettivi il contrasto al cambiamento climatico e la promozione delle energie rinnovabili, due dei 17 *goal* globali per lo sviluppo sostenibile definiti dall'Organizzazione delle Nazioni Unite nel 2015. Inoltre la crisi energetica iniziata nel 2022 è un altro motivo per cui incrementare la ricerca di fonti energetiche alternative a quelle tradizionali. Le energie rinnovabili sono quelle provenienti da fonti che vengono naturalmente rinnovate: oltre a non esaurirsi mai, generano un inquinamento basso o nullo, al contrario dei combustibili fossili, attualmente la fonte energetica prevalente, che sono esauribili e hanno emissioni alte di gas a effetto serra e di altre sostanze dannose¹. La fonte rinnovabile individuata è la biomassa proveniente dalla coltivazione dei terreni che restano incolti tra un raccolto e la semina successiva della coltura principale. Sfruttando questi terreni tutto l'anno non solo si otterrebbe una fonte di energia *green*, ma si eviterebbe lo spreco di una risorsa disponibile e aumenterebbe la fertilità del suolo: infatti i suoli coltivati mantengono il carbonio organico necessario per rendere disponibili gli elementi nutritivi delle piante², migliorando la fertilità e diminuendo quindi la quantità di acqua e sostanze chimiche necessaria per le coltivazioni successive. Inoltre i suoli nudi facilitano l'erosione da parte degli agenti atmosferici, in questo modo si riduce il suolo disponibile e si facilita lo scioglimento delle sostanze inquinanti nell'acqua³. La biomassa ottenuta coltivando i suoli nudi può dare origine a diversi biocarburanti, come il biometano, che possono sostituire i combustibili fossili in motori o impianti, abbassando le emissioni nocive⁴.

¹ www.globalgoals.org

² www.arpa.veneto.it/arpavinforma/indicatori-ambientali/indicatori_ambientali/geosfera

³ www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/conoscenza-dei-suoli/carte-applicative/rischio-di-erosione

⁴ Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto, "Colture energetiche e protezione del suolo", 2010

Con l'aumento della sensibilità verso l'ambiente e la sua salvaguardia, le politiche agricole europee, nazionali e regionali degli ultimi tre decenni hanno incentivato un utilizzo sostenibile del suolo. Le riforme dei regolamenti europei, i piani nazionali e i piani regionali sull'agricoltura hanno promosso tramite aiuti economici la tutela dell'ambiente e degli habitat, la riduzione dell'uso di sostanze chimiche e acqua, l'agricoltura biologica, la conservazione dei boschi, il mantenimento della fertilità dei terreni e la coltivazione di piante da biomassa energetica⁵. L'obiettivo è quello di limitare le sostanze nocive, sequestrare il carbonio, evitare gli sprechi e conservare gli ambienti⁶. In Emilia-Romagna questi provvedimenti hanno avuto effetti visibili, in quanto negli ultimi anni si è registrato un considerevole aumento per quanto riguarda agricoltura biologica, aree protette e produzione di energia da biomasse⁷.

L'obiettivo primario della tesi è quello di individuare i suoli nudi presenti nella parte pianeggiante della regione Emilia-Romagna nell'anno 2021, mediante l'utilizzo di dati satellitari Sentinel-2 e l'analisi dell'indice di vegetazione *Normalized Difference Vegetation Index*. Gli altri studi effettuati negli ultimi cinquant'anni hanno utilizzato diversi sistemi per individuare i suoli nudi, tra cui il calcolo di numerosi indici di vegetazione⁸ e le classificazioni di immagini in base alla risposta spettrale del suolo all'interazione con le onde elettromagnetiche⁹ provenienti da fonti naturali. Inoltre hanno analizzato le variazioni della risposta alle onde provenienti principalmente da fonti artificiali in base a caratteristiche dei suoli come umidità o rugosità¹⁰.

L'elaborato di tesi è suddiviso in cinque capitoli. Nel primo sono riportati gli effetti e le cause dei cambiamenti climatici in campo agricolo e sono descritte le politiche agricole

⁵ Parlamento Europeo, Regolamento (UE) 2021/2115, 2021

⁶ MIPAAF, Programma di Sviluppo Rurale Nazionale 2014-2022, 2013

⁷ Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2014-2022, 2013

⁸ Yue J. et alii, "Using broadband crop residue angle index to estimate the fractional cover of vegetation, crop residue and bare soil in cropland systems", *Remote Sensing of Environment*, n. 237, 2020, pp. 1-16

⁹ May G. A., Petersen G.W., "Spectral signature selection for mapping unvegetated soils", *Remote Sensing of Environment*, 4, 1975, pp. 211-220

¹⁰ Desmet A. et alii, "Influence of some soil factors on the reflectance of bare soils", *Pedologie*, XXXVIII-3, 1988, pp. 227-247

inerenti la lotta ai cambiamenti climatici attuate fino ad oggi in Europa, in Italia e in Emilia-Romagna. Nel secondo è descritta l'area di studio, ovvero la regione Emilia-Romagna, dal punto di vista fisico-amministrativo; è poi riportata una panoramica sull'uso del suolo, dal '900 ad oggi, relativa a coltivazioni, bonifiche, boschi, aree protette del territorio regionale. Nel terzo sono introdotti gli studi effettuati fino ad oggi sui suoli nudi, e sono descritti il programma di monitoraggio *Copernicus*, i suoi satelliti e i dati utilizzati nel presente lavoro. Nel quarto capitolo sono illustrati i metodi applicati, l'analisi dei dati eseguita su arco temporale di nove mesi, i relativi risultati e le loro validazioni. Infine, nel quinto sono valutati i possibili impieghi dei terreni individuati, sono infatti descritti i possibili trattamenti delle biomasse, i diversi biocarburanti ottenibili e le diverse colture ad uso energetico; inoltre è stata effettuata una simulazione della resa energetica ipotizzando di coltivare sorgo da biogas nei periodi più favorevoli sui suoli individuati.

CAPITOLO 1 – I cambiamenti climatici nelle politiche del settore agricolo

1.1 - Effetti dei cambiamenti climatici in agricoltura

L'agricoltura è un campo ove gli effetti del cambiamento climatico degli ultimi decenni, dovuto principalmente alla massiccia industrializzazione mondiale, si stanno avvertendo in modo particolarmente intenso. Infatti il mondo agricolo è il settore lavorativo più dipendente dalle condizioni meteorologiche: ogni operazione, come ad esempio la semina o l'irrigazione, necessita di calcoli e pianificazioni precise, che stanno diventando sempre più difficili proprio a causa del cambiamento climatico. Quest'ultimo è causa di fenomeni che spesso presentano intensità anomala o repentinità, come ad esempio nubifragi, grandine, gelate, siccità prolungata, i quali possono vanificare un anno di lavoro. È sempre più complicato prevedere in quali periodi e con quale intensità si verificheranno i vari eventi meteorologici e regolarsi di conseguenza, effettuando o annullando eventuali operazioni programmate. Tra gli effetti dell'emergenza climatica in Italia figurano la diminuzione delle precipitazioni invernali, l'aumento delle temperature invernali, l'intensificazione del caldo primaverile ed estivo e l'aumento delle precipitazioni di breve durata ma dalla forte intensità (Figg. 1.1 e 1.2): questi avvenimenti stanno causando siccità frequente, erosione del suolo, desertificazione, dissesto idrogeologico. Si registra una scarsità di risorse idriche, soprattutto per quanto riguarda le falde profonde, una diminuzione della portata dei fiumi e del livello dei bacini naturali o artificiali¹¹.

¹¹ MIPAAF, Piano Strategico Nazionale per lo Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007

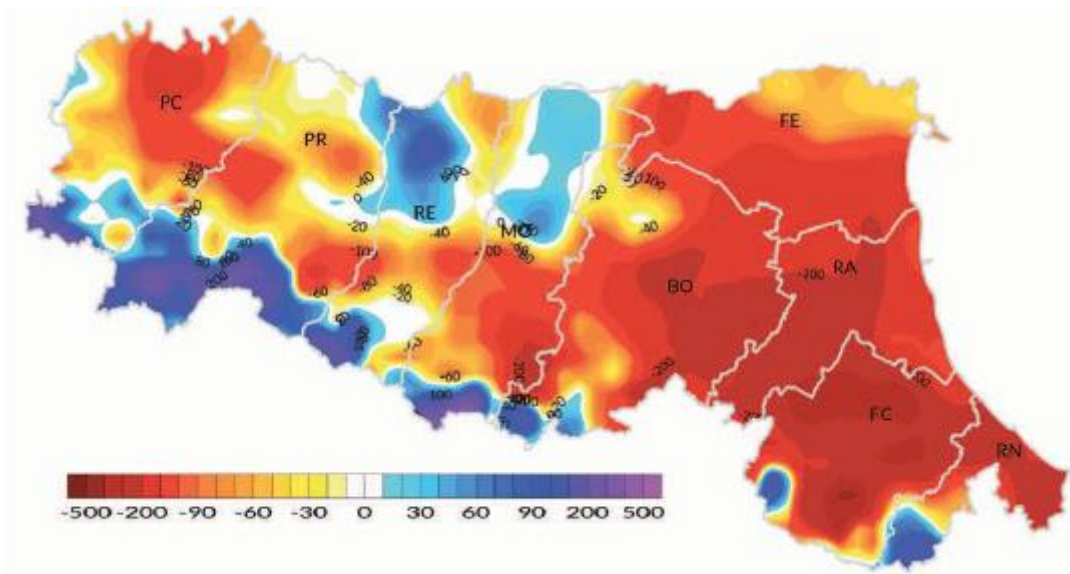


Figura 1.1: Anomalia (in millimetri) delle precipitazioni totali in Emilia-Romagna nel 2020 rispetto alla media del periodo 1961-1990. Fonte: www.chiara.eco/il-2020-piogge-fuori-norma-in-emilia-romagna/

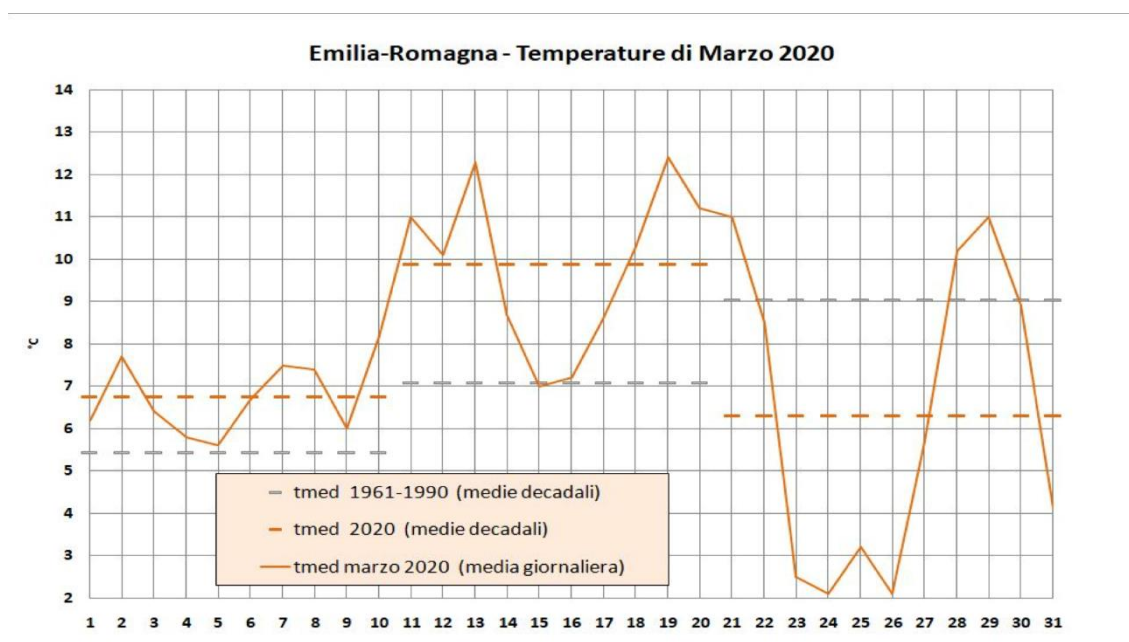


Figura 1.2: Anomalia delle temperature di marzo 2020 in Emilia Romagna rispetto alla media del periodo 1961-1990. Fonte: www.centrometeoemiliaromagna.com/clima/emilia-romagna-bollettino-clima-e-siccita-marzo-2020#pid=1

1.2 - Contributo dell'agricoltura ai cambiamenti climatici

L'agricoltura spesso può rivelarsi dannosa o inquinante, contribuendo essa stessa ai cambiamenti climatici che la danneggiano. La fonte di inquinamento più evidente in questo campo sono le ingenti quantità di sostanze chimiche necessarie per la produzione su scala industriale che da sessant'anni circa ha preso il sopravvento. Alcune di queste sostanze sono divenute indispensabili per assicurare una produzione e un guadagno all'agricoltore, tuttavia è necessario cercare di evitare gli abusi. Le sostanze principali usate in campo agricolo sono gli insetticidi (contro gli insetti), i fungicidi (contro i funghi), i diserbanti (contro le piante infestanti) e i fertilizzanti (concimi chimici)¹². Questi possono inquinare in modo consistente l'aria, il suolo e le acque (superficiali o profonde). Una soluzione a questo problema è l'agricoltura biologica, la quale riduce o elimina l'utilizzo di sostanze chimiche¹³. Inoltre vengono utilizzati in modo massiccio i combustibili fossili per i mezzi agricoli (spesso vecchi quindi più inquinanti e meno efficienti), contribuendo così all'inquinamento dell'aria. Le sostanze principali emesse dalle attività agricole sono l'ammoniaca, il protossido di azoto, i nitrati e il fosforo provenienti dalla fertilizzazione e l'anidride carbonica emessa dai mezzi.

Un altro problema dell'agricoltura è l'ingente consumo di acqua. Ciò è dovuto specialmente alle siccità causate dai cambiamenti climatici, le quali costringono a sopperire alle piogge mancanti tramite le irrigazioni. Tuttavia sono frequenti gli sprechi di acqua dovuti a scarsa efficienza dei sistemi di irrigazione o colture non idonee¹⁴.

Una fonte indiretta di inquinamento possono essere anche i suoli nudi, ovvero i terreni lasciati vuoti tra un raccolto e la semina successiva. Essi non solo rappresentano uno spreco di risorse (terreni disponibili ma non utilizzati), ma provocano anche una diminuzione della fertilità del terreno per la perdita di sostanze nutritive: ciò renderà

¹² www.products.pcc.eu/it/blog/prodotti-fitosanitari-chimici-classificazione/

¹³ www.treccani.it/enciclopedia/agricoltura-biologica

¹⁴ MIPAAF, Piano Strategico Nazionale per lo Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007

necessario un uso più massiccio di acqua o sostanze chimiche nelle produzioni successive, causando spreco e inquinamento. I suoli nudi contengono meno carbonio organico rispetto a quelli coltivati: esso è essenziale per la fertilità poiché si lega con numerose sostanze, rendendo disponibili alle piante elementi nutritivi come fosforo e azoto¹⁵. Inoltre l'assenza di copertura vegetale facilita l'erosione del suolo da parte degli agenti atmosferici: in questo modo si ha non solo una riduzione del suolo, ma anche un trasporto delle sostanze chimiche residue verso le acque superficiali¹⁶. Le coltivazioni monocolturali lasciano il suolo privo di copertura vegetale specialmente nei periodi dell'anno più piovosi: il suolo nudo ha una capacità minima di intercettare l'acqua, pertanto si riduce il tempo di corrivazione (ovvero l'acqua scorre più velocemente), facilitando l'erosione e riducendo il suolo disponibile¹⁷.

1.3 – Politiche europee

Un tema di attualità di questi anni è la “Nuova PAC”, ossia i nuovi regolamenti della Politica Agricola Comune (PAC) che entreranno in vigore il 1° gennaio 2023. La PAC è l'insieme di norme dell'Unione Europea riguardanti il settore agricolo. La prima versione è stata istituita nel 1962, allo scopo di tutelare gli agricoltori e i consumatori dell'allora Comunità Economica Europea. Da allora ha subito diverse riforme, le principali negli anni 1984, 1992, 2003, 2013, 2023¹⁸.

Dagli anni '90, in seguito al Summit della Terra di Rio de Janeiro, l'attenzione verso l'ambiente ha iniziato ad essere maggiormente considerata. La riforma del 1992 introdusse i concetti di protezione dell'ambiente e delle risorse e di agricoltura

¹⁵ www.arpa.veneto.it/arpavinforma/indicatori-ambientali/indicatori_ambientali/geosfera

¹⁶ www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/conoscenza-dei-suoli/carte-applicative/rischio-di-erosione

¹⁷ MIPAAF, Piano Strategico Nazionale per lo Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007

¹⁸ Nègre F., “Gli strumenti della PAC e le loro riforme”, Note Tematiche sull'Unione Europea, 2022

biologica¹⁹. Fu stilato un regolamento apposito sulla compatibilità dell'agricoltura con le esigenze di tutela ambientale. Furono introdotti aiuti economici per chi si impegnava a ridurre l'uso di sostanze chimiche, passare al metodo biologico o estensivo, creare riserve naturali, o adottare altre iniziative inerenti la protezione ambientale²⁰.

Nella riforma del 2003, la protezione dell'ambiente, intesa come mitigazione dell'inquinamento dell'acqua e conservazione degli habitat, divenne uno dei criteri obbligatori di gestione dei suoli e fu introdotto un pagamento supplementare per produzioni di particolare importanza per la tutela ambientale. Inoltre, sempre nel 2003, fu emessa una direttiva che promuoveva l'uso dei biocarburanti nel settore dei trasporti, allo scopo di ridurre l'inquinamento dovuto ai combustibili fossili, perseguire gli obiettivi del Protocollo di Kyoto del 1997 e ridurre la dipendenza da energia di importazione²¹. Nella riforma della PAC fu introdotto un aiuto per chi adottasse colture energetiche, ovvero utili alla produzione di biocarburante, energia elettrica o termica²².

Nella riforma del 2013, vengono posti tra gli obiettivi essenziali l'abbassamento delle emissioni di carbonio, la gestione sostenibile delle risorse e la salvaguardia degli ecosistemi, allo scopo di proteggere l'ambiente e mitigare i cambiamenti climatici. Vengono previsti aiuti per chi effettua interventi importanti nell'ottica del miglioramento ambientale, per l'agricoltura biologica (che contribuisce alla riduzione delle emissioni dei fertilizzanti) e per la selvicoltura (che favorisce il sequestro di carbonio)²³. Si introduce il concetto di "inverdimento" (o *greening*), ovvero una serie di pratiche retribuite benefiche per l'ambiente e il clima, quali diversificazione delle colture (prevedendo due o tre colture

¹⁹ Frascarelli A., "L'evoluzione della PAC e le imprese agricole: sessant'anni di adattamento", *Agriregionieuropa*, 50, 2017

²⁰ Comunità Economica Europea, Regolamento (CEE) 2078/92, 1992

²¹ Parlamento Europeo, Direttiva 2003/30/CE, 2003

²² Comunità Europea, Regolamento (CE) N. 1782/2003, 2003

²³ Parlamento Europeo, Regolamento (UE) N. 1305/2013, 2013

obbligatorie su superfici maggiori di 10 ettari²⁴), mantenimento delle aree a prato permanente e costituzione di aree di interesse ecologico, tra cui boschi, terrazzamenti e terreni a riposo²⁵.

La riforma che entrerà in vigore nel 2023 definisce “orientamento strategico” l’incremento della salvaguardia ambientale e il perseguimento degli obiettivi climatici dell’UE²⁶. Vengono posti tra gli obiettivi generali l’incentivazione dello sviluppo sostenibile e il rafforzamento della tutela di ambiente, clima e biodiversità. Si perseguono i fini dettati dai recenti accordi internazionali, ovvero l’Agenda 2030 ONU del 2015, l’Accordo di Parigi dell’ONU del 2015 e il Green Deal dell’Unione Europea del 2020, i quali hanno fissato obiettivi di mitigazione dei cambiamenti climatici per i prossimi decenni. Tra gli obiettivi specifici dei nuovi regolamenti PAC figurano la lotta ai cambiamenti climatici, la riduzione dei gas a effetto serra, il sequestro del carbonio, la produzione di energia sostenibile, la gestione efficiente delle risorse, la riduzione delle sostanze chimiche, la conservazione di biodiversità e habitat, la riduzione degli sprechi. Vengono sostenuti gli agricoltori che adottano pratiche benefiche per ambiente e clima, dette “regimi ecologici”. Tali pratiche devono soddisfare gli obiettivi di almeno due settori di intervento tra i seguenti: mitigazione dei cambiamenti climatici (tramite riduzione e sequestro dei gas serra), adattamento agli stessi (tramite miglioramento della resistenza delle piante), protezione delle risorse idriche (tramite riduzione dell’uso di acqua), protezione del suolo (tramite prevenzione del degrado e miglioramento della fertilità), protezione della biodiversità (tramite conservazione di habitat e specie), riduzione dell’uso di pesticidi (in particolare di quelli pericolosi) e miglioramento del benessere animale²⁷. Viene finanziato il monitoraggio sull’uso e sulle condizioni dei terreni e sulle condizioni climatiche, tramite dati satellitari, geospaziali e meteorologici, al fine di ottenere dati utili al perseguimento degli obiettivi ambientali. A tal fine, vengono

²⁴ MIPAAF, “*Greening* e pratiche agricole equivalenti: un’analisi sulle possibili ripercussioni del pagamento verde in Italia”, 2014

⁸ Parlamento Europeo, Regolamento (UE) N. 1307/2013, 2013

²⁶ Parlamento Europeo, Regolamento (UE) 2021/2116, 2021

²⁷ Parlamento Europeo, Regolamento (UE) 2021/2115, 2021

citati i sistemi europei Copernicus, Galileo ed EGNOS come fornitori di dati²⁸. Vengono aumentati i fondi destinati ad interventi in favore dell'ambiente; ogni stato membro sarà tenuto a certificare di aver contribuito a raggiungere gli obiettivi climatici dell'Unione²⁹.

1.4 – Politiche italiane

Lo stato italiano, come gli altri stati membri dell'Unione Europea, è tenuto a redigere periodicamente il piano strategico nazionale di sviluppo rurale (PSN), stabilito dal regolamento dell'UE numero 1698 del 2005, basandosi sulle norme e sugli obiettivi della PAC. Il PSN è sia un resoconto sulla situazione agricola italiana, sia un piano per le politiche agricole da portare avanti negli anni successivi (priorità, obiettivi, finanziamenti). Costituisce il punto di riferimento per i programmi di sviluppo rurale regionali³⁰.

Prima del 2005 in Italia erano già state approvate alcune leggi in merito al rapporto tra agricoltura e ambiente. Nel 1999 fu istituito un “Fondo per lo sviluppo dell'agricoltura biologica e di qualità” per promuovere l'agricoltura biologica o a basso impatto ambientale e fu introdotta una tassa sulla vendita di alcuni fitosanitari³¹. Nel 2000 furono introdotti incentivi per gli agricoltori che adottassero il metodo di produzione biologico e fu ampliato l'elenco delle sostanze chimiche tassate³². Nel 2003 fu introdotto il “Fondo per la ricerca nel settore dell'agricoltura biologica e di qualità”³³.

²⁸ Parlamento Europeo, Regolamento (UE) 2021/2116, 2021

²⁹ Pupo D'Andrea M., “Le novità della PAC 2023-2027”, *Agriregionieuropa*, 57, 2021

³⁰ Comunità Europea, Regolamento (CE) n. 1698/2005, 2005

³¹ Parlamento Italiano, Legge 23 dicembre 1999, n. 488, Art. 59, 1999

³² Parlamento Italiano, Legge 23 dicembre 2000, n. 388, Art. 123, 2000

³³ Parlamento Italiano, Legge 7 marzo 2003, n. 38, 2003

Il primo Piano Strategico Nazionale italiano fu redatto e approvato dalla Commissione Europea nel 2007. Uno degli assi di questo piano è basato sul miglioramento ambientale: esso ha come obiettivi la diminuzione dei gas a effetto serra, tramite riduzione delle emissioni e assorbimento, e la tutela di biodiversità, territorio e risorse idriche. Si prevedono sostegni per l'agricoltura biologica o estensiva, tutela e ampliamento degli habitat naturali come zone umide e prati, forestazione in zone ove siano rimasti pochi boschi, tutela delle foreste con prevenzione degli incendi, miglioramento delle aree fluviali, creazione di corridoi ecologici e risparmio idrico. Inoltre si promuove la coltivazione di biomasse destinate alla produzione di biocombustibili, dette anche colture bioenergetiche³⁴.

Il PSN del 2014, in linea con la riforma della PAC del 2013, annovera tra le strategie la tutela o il ripristino degli ecosistemi, l'uso proficuo delle risorse, l'abbassamento delle emissioni di carbonio e ammoniaca e la resilienza climatica. Si promuovono le fonti di energia rinnovabili nell'ottica della bioeconomia (Fig. 1.3). Vengono introdotti i pagamenti agro-climatico-ambientali, i quali consistono in sostegni economici per gli agricoltori che si impegnano per un certo numero di anni a cambiare i propri metodi di lavoro in favore del miglioramento ambientale e climatico³⁵.

Il PSN relativo alla riforma della PAC del 2023 è in fase di approvazione. La versione attuale annovera tra le strategie fondamentali la transizione ecologica, ovvero gli interventi per il passaggio ad un sistema sostenibile, e l'agricoltura biologica. Molti fondi saranno destinati ad interventi per l'ambiente. Vengono introdotti cinque eco-schemi nazionali, basati sui regimi ecologici della PAC, i quali consistono in sostegni per le aziende che adotteranno pratiche sostenibili. Molti fondi saranno destinati all'agricoltura biologica, che sarà il metodo di produzione privilegiato nell'ottica del conseguimento degli obiettivi climatici. Tra le strategie figurano la mitigazione dei cambiamenti climatici, tramite riduzione delle emissioni, sequestro del carbonio e promozione dell'energia sostenibile, la promozione dello sviluppo sostenibile, comprendente gestione

³⁴ MIPAAF, Piano Strategico Nazionale per lo Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007

³⁵ MIPAAF, Programma di Sviluppo Rurale Nazionale 2014-2022, 2013

efficiente delle risorse e riduzione delle sostanze chimiche, e infine la tutela degli habitat³⁶.

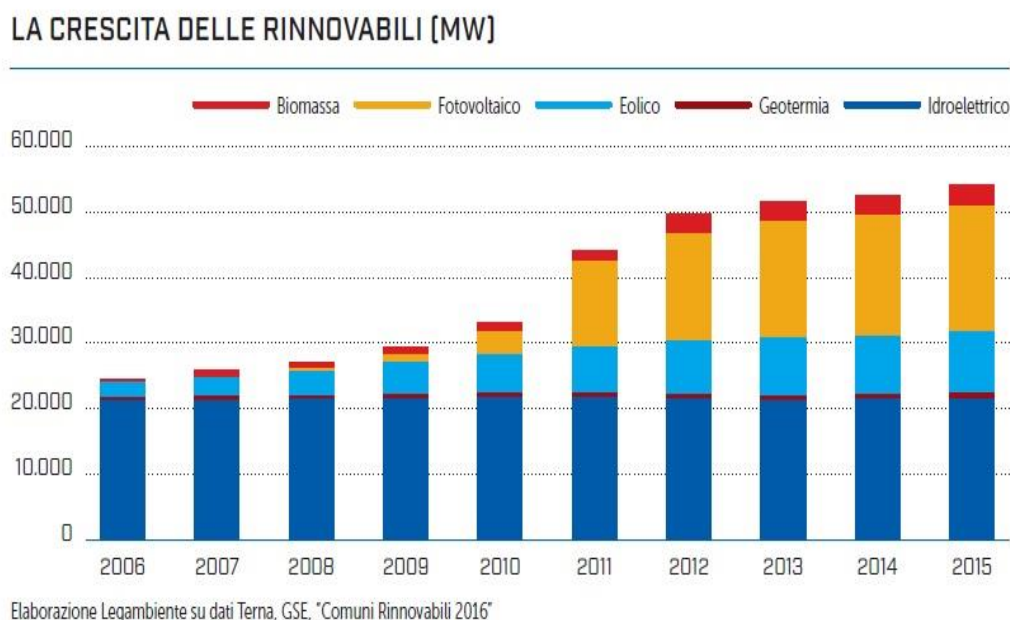


Figura 1.3: Crescita delle energie rinnovabili in Italia. Fonte: www.sociale.corriere.it

1.5 – Politiche regionali in Emilia-Romagna

Il piano di sviluppo rurale (PSR) è il documento che definisce le politiche agricole delle regioni negli stati dell'Unione Europea. Il primo PSR della regione Emilia-Romagna fu approvato dalla Commissione Europea nel 2000. Ha promosso una integrazione tra sviluppo economico e tutela ambientale, ovvero attività eco-compatibili e sviluppo sostenibile. Ha previsto la diffusione dei metodi di produzione a basso impatto ambientale, soprattutto l'agricoltura biologica, insieme alla tutela del territorio e della biodiversità, al rimboschimento, all'estensivizzazione. Ha altresì promosso e sostenuto

³⁶ MIPAAF, Relazione sul Piano Strategico Nazionale PAC 2023-2027, 2021

l'impiego di colture intercalari, per la copertura dei suoli tra due colture principali e il conseguente mantenimento della fertilità³⁷.

Il PSR del 2007 sottolinea la necessità di combattere i cambiamenti climatici, conservare le risorse, promuovere l'agricoltura biologica e priva di organismi geneticamente modificati (OGM). Si prevede, in base al protocollo di Kyoto, di ridurre le emissioni, aumentare l'efficienza energetica e utilizzare le fonti rinnovabili (Fig. 1.4). Si evidenzia come l'agricoltura possa fornire materie prime per la produzione di bioenergia e si incentiva l'aumento della copertura vegetale. Per la riconversione energetica e la riduzione dei combustibili fossili utilizzati, si incentiva la costruzione di nuovi impianti per la produzione di energia alimentati a biogas o biomasse agricole³⁸.

Il PSR del 2014 prevede, tra le esigenze, la gestione sostenibile dei suoli agricoli, la minore pressione sull'ambiente, la maggiore efficienza energetica, lo sviluppo di bioenergie rinnovabili a basse emissioni. Tra le strategie, annovera la riduzione delle emissioni, l'uso efficiente delle risorse, la conservazione degli ecosistemi. Tra le misure, prevede i pagamenti agro-climatico-ambientali, l'agricoltura biologica (Fig. 1.5). Si evidenzia come l'Emilia-Romagna sia la seconda regione italiana per quanto riguarda la produzione di elettricità da bioenergia, infatti in quel periodo il 2% delle aziende agricole della regione possiede un impianto dedicato a tale scopo, e come sia necessario incrementare ulteriormente questa attività³⁹.

³⁷ Regione Emilia-Romagna, Piano Regionale di Sviluppo Rurale 2000-2006, 2000

³⁸ Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007

³⁹ Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2014-2022, 2013

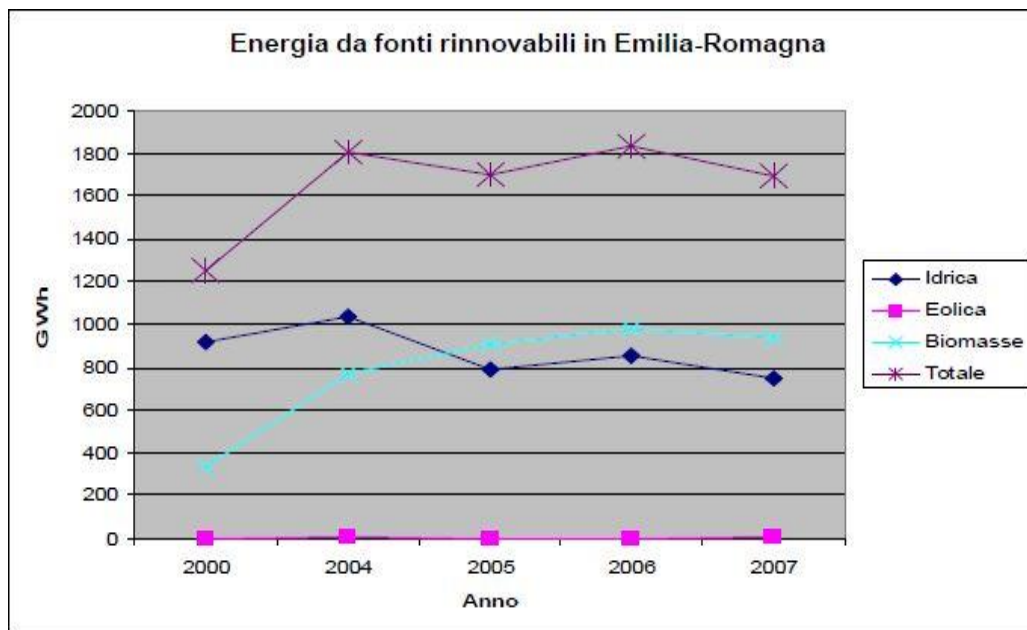


Figura 1.4: Energia rinnovabile in Emilia-Romagna. Fonte: Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007

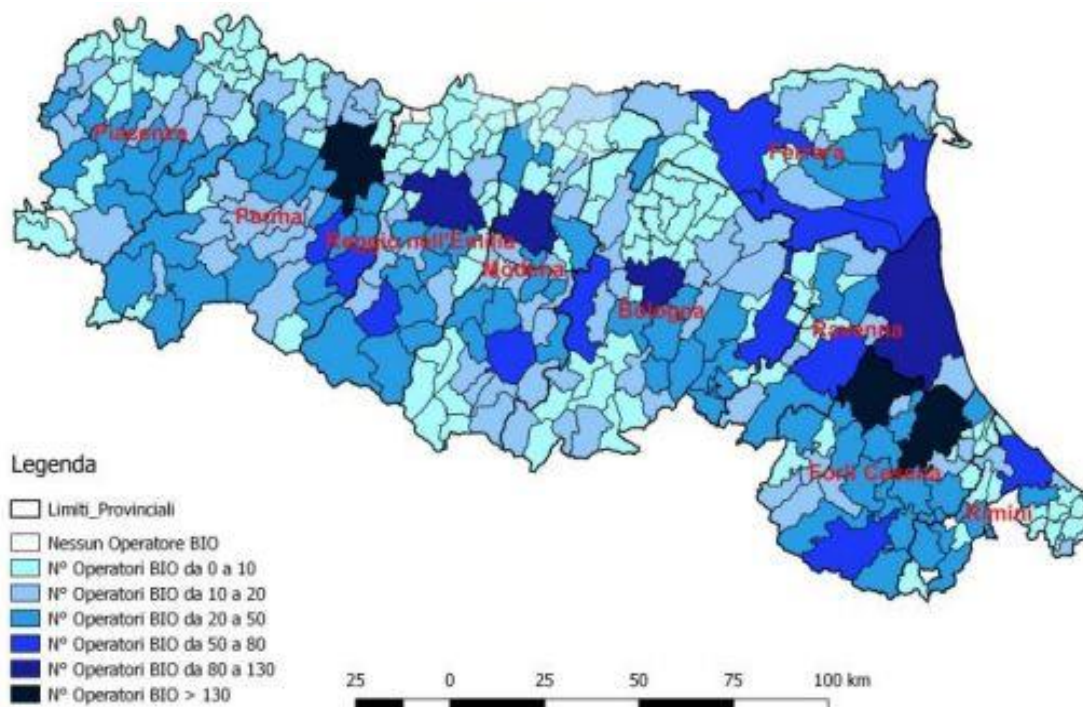


Figura 1.5: Distribuzione delle imprese biologiche per comune dell'Emilia-Romagna nel 2018. Fonte: Regione Emilia-Romagna, Rapporto sull'agricoltura biologica in Emilia-Romagna, 2019

CAPITOLO 2 – Uso del suolo in Emilia-Romagna

2.1 – Area di studio

L'Emilia-Romagna è una regione amministrativa dell'Italia settentrionale, con una superficie di circa 22450 km² e circa 4,5 milioni di abitanti. Comprende circa un quarto della Pianura Padana, circa 135 chilometri di costa Adriatica, una fascia collinare e una parte del versante Adriatico degli Appennini⁴⁰, compresa tra lo spartiacque alla sinistra orografica della valle Trebbia a nord e lo spartiacque alla destra orografica della valle Marecchia a sud. La regione è amministrativamente suddivisa in nove province, aventi come capoluoghi rispettivamente le città di Piacenza, Parma, Reggio Emilia, Modena, Bologna, Ferrara, Ravenna, Forlì e Rimini (Fig. 2.1). I fiumi più lunghi della regione, da nord a sud, sono Po, Trebbia, Taro, Secchia, Panaro, Reno, Santerno, Lamone, Montone, Bidente, Savio e Marecchia. I torrenti più lunghi, da nord a sud, sono Nure, Ceno, Parma, Enza, Samoggia, Idice, Sillaro e Senio⁴¹.

⁴⁰ Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2014-2022, 2013

⁴¹ www.comuni-italiani.it/08/fiumi/

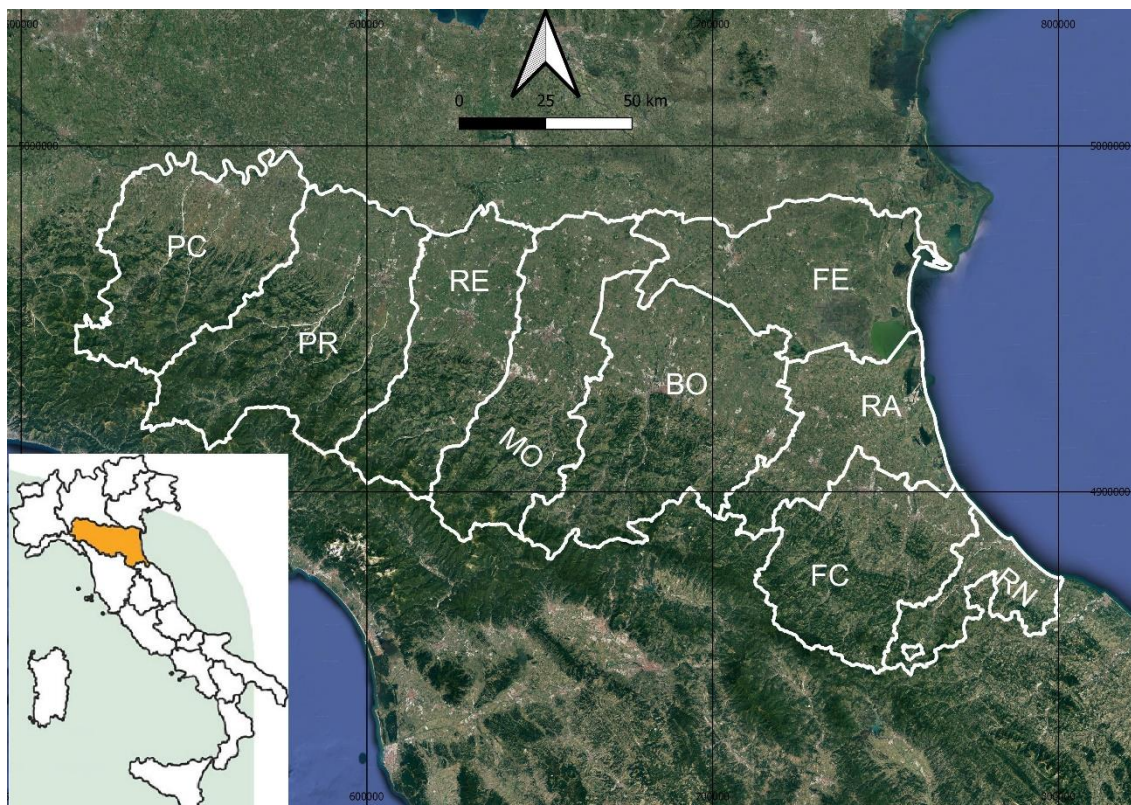


Figura 2.1. Area di studio: Regione Emilia-Romagna. Fonte sfondo: Google Satellite.

2.2 - *Uso del suolo attuale*

La parte montana (25,1%) è scarsamente coltivabile a causa del clima e delle forti pendenze: è coltivata a seminativi o prato in aree limitate, mentre la maggior parte di essa è coperta da boschi; è soggetta da diversi decenni ad abbandono e conseguente dissesto idrogeologico. La parte collinare (27,1%) presenta aree industriali ed è coltivata a seminativi, vigneti, frutteti o pascoli. La parte pianeggiante costituisce il 47,8 % della regione, per un totale di circa 10760 km². Le sue coltivazioni prevalenti sono: seminativi, frutteti e vigneti nella fascia adiacente le colline; seminativi, orticole e risaie nella fascia più bassa; seminativi e orticole nella fascia costiera.

La parte pianeggiante orientale è stata oggetto di bonifiche fino agli anni '70 del XX secolo, specialmente nell'area vicina al delta del Po dove le zone paludose erano diffuse

a causa delle depressioni⁴². La maggior parte dell'area pianeggiante è assai fertile e la superficie agricola utilizzata in questa zona raggiunge l'80%⁴³, tuttavia è massiccia la presenza di aree urbanizzate, soprattutto lungo l'asse stradale della via Emilia e sulla costa meridionale. I boschi ad oggi in pianura coprono aree molto limitate e soprattutto sulla costa.

I seminativi possono essere cereali (dal più al meno diffuso: frumento, mais, sorgo, orzo, riso, segale, avena e triticale), legumi (piselli, fagioli, fave e ceci), colture industriali (soia, barbabietole, girasole e colza) o foraggere (erba medica, trifoglio e lupinella o cereali come sorgo e avena o prati permanenti). Le ortive possono essere pomodori, patate, carote, zucchine, cipolle, spinaci, lattuga, asparagi, aglio, cavolfiori, radicchio. I frutteti comprendono peri, peschi, meli, albicocchi, susini, ciliegi, kiwi e noci. I vigneti e gli uliveti fanno parte di diverse DOC e DOP (denominazioni di origine controllata o protetta). Il frumento (duro o tenero) è la coltura più praticata ed è massicciamente coltivato nella parte piana di tutte le province. Il mais è coltivato maggiormente nel ferrarese, il sorgo specialmente nella piana bolognese e modenese, l'orzo in tutte le province ma equamente in pianura e in collina, il riso quasi del tutto nel ferrarese; segale, avena e triticale sono scarsamente coltivati. I piselli sono coltivati maggiormente tra ferrarese e ravennate, i fagioli nella piana ravennate e forlivese, le fave specialmente in collina, i ceci sono meno diffusi. La soia è presente soprattutto nel ferrarese, la barbabietola tra bolognese e ferrarese, il girasole nella piana bolognese e ravennate, la colza tra bolognese e ferrarese. Le foraggere sono più diffuse in provincia di Parma, Reggio Emilia e Bologna. I pomodori sono coltivati soprattutto nella bassa piacentina e nel ferrarese, le patate tra bolognese e ferrarese, le carote e le zucchine nel ferrarese, le cipolle nel bolognese, gli spinaci nel ferrarese, la lattuga nella bassa forlivese e riminese; asparagi, aglio, cavolfiori e radicchio sono più scarsamente diffusi. I peri sono presenti soprattutto tra ferrarese e modenese, i peschi nella bassa reggiana e ravennate, i meli tra ferrarese e ravennate, gli albicocchi tra la bassa e le colline della Romagna, i susini nella

⁴² Regione Emilia-Romagna, Piano Regionale di Sviluppo Rurale 2000-2006, Regg. (CE) nn. 1257/1999 e 1750/1999, 1999

⁴³ Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2007-2013, Reg (CE) n. 1698/2005, 2005

bassa ravennate, i ciliegi nel modenese e nel forlivese tra collina e pianura, i kiwi nella bassa ravennate e i noci nella bassa romagnola. I vigneti sono presenti in pianura e in collina in tutte le province, anche se maggiormente nel ravennate. Gli ulivi sono coltivati soprattutto sulle colline romagnole⁴⁴.

Questa è una carta tematica dell'uso del suolo riferita all'anno 2017, tratta dal Geoportale della regione Emilia-Romagna⁴⁵ ed elaborata con il software QuantumGIS: le classi che occupano superfici maggiori sono quelle dei seminativi semplici irrigui per la parte pianeggiante, dei seminativi non irrigui per la fascia collinare e i boschi di querce, castagni e faggi per la parte montana (Fig. 2.2).

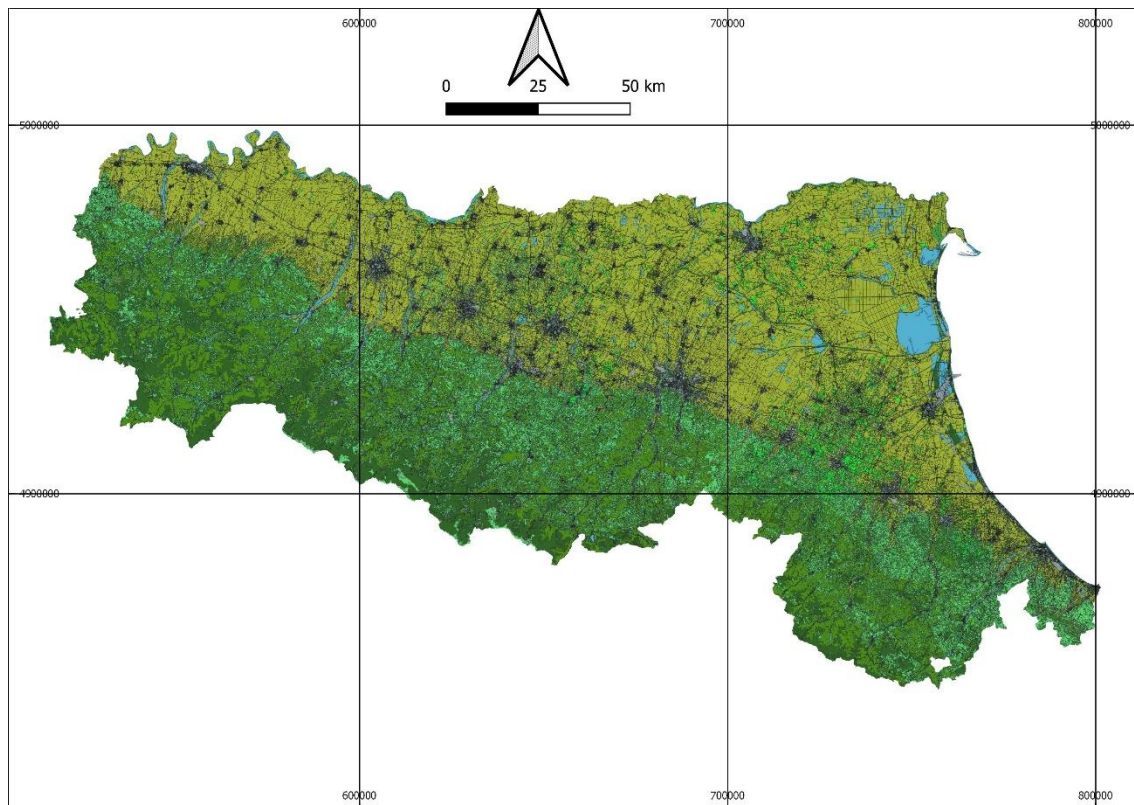


Figura 2.2. Carta dell'uso del suolo dell'Emilia-Romagna nel 2017. 88 classi totali. I toni di verde scuro rappresentano i boschi, i toni di verde chiaro le coltivazioni, i toni di grigio le costruzioni, i toni di azzurro le acque. Fonte: geoportale.regione.emilia-romagna.it/approfondimenti/database-uso-del-suolo

⁴⁴ Regione Emilia-Romagna, Statistiche agrarie anno 2020, 2020

⁴⁵ geoportale.regione.emilia-romagna.it/approfondimenti/database-uso-del-suolo

Diverse sono le aree protette istituite dallo Stato, dalla Regione o dall'Unione Europea a partire dagli anni '70 in difesa dell'ambiente e della biodiversità. In tali zone l'attività agricola o agro-silvo-pastorale è limitata in base a regole che variano a seconda della tipologia dell'area protetta. Vi sono i due parchi nazionali dell'Appennino Tosco-Emiliano e delle Foreste Casentinesi, il parco interregionale del Sasso Simone, quattordici parchi regionali, quindici riserve naturali regionali, diciassette riserve naturali statali, trentaquattro aree di riequilibrio ecologico regionali, cinque paesaggi protetti regionali e 159 siti *Rete Natura 2000* dell'UE, questi ultimi divisi in Zone Speciali di Conservazione e Zone di Protezione Speciale⁴⁶. Vi è anche la riserva naturale integrale di Sasso Fratino, ubicata in un luogo mai antropizzato a causa dell'impervietà, nella quale sono vietati sia le attività umane che l'accesso⁴⁷. Le aree protette attualmente occupano il 17,5% del territorio regionale e sono distribuite abbastanza equamente tra le zone montane, collinari e pianeggianti (Fig. 2.3).

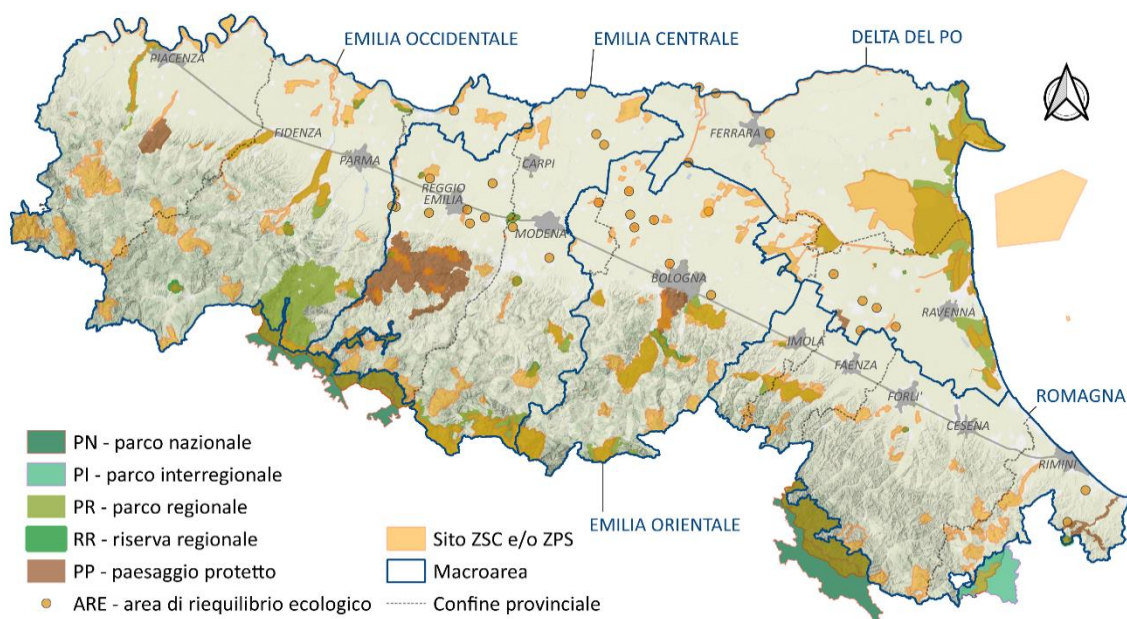


Figura 2.3. Mappa delle aree protette dell'Emilia-Romagna.
 Fonte: ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/aree-protette

⁴⁶ ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/aree-protette/aree-protette-in-er/aree-protette-1

⁴⁷ www.emiliaromagnameteo.com/sasso-fratino

2.3 – Uso del suolo negli anni '20

Negli anni venti del '900, l'industria era ancora poco diffusa nella regione, la quale era votata specialmente all'agricoltura anche se non ancora intensamente meccanizzata. Dalla fine del XIX secolo, nelle province di Modena, Bologna, Ferrara e Ravenna erano state effettuate diverse bonifiche tramite scavo di canali, per un totale di oltre 1400 chilometri quadrati di terreno bonificato. Tuttavia, i terreni paludosi nella pianura erano ancora molto estesi, soprattutto nel Ferrarese, nonostante la sua superficie coltivabile fosse raddoppiata negli ultimi decenni. In questi anni furono costituiti, dai proprietari terrieri, i consorzi di bonifica per facilitare tale opera. L'area regionale irrigata tramite canali era scarsa e si attestava intorno ai 600 km². Iniziavano ad essere utilizzati prodotti chimici e macchine agricole. Si stava diffondendo l'agricoltura intensiva con frazionamento dei terreni e stavano sorgendo nuove case coloniche.

La parte pianeggiante della regione era coltivata specialmente a frumento, mais, foraggio, leguminose e, soprattutto tra il Bolognese e il Ferrarese, canapa. I campi, eccetto i vasti poderi bonificati, erano suddivisi da file di viti, gelsi, olmi, pioppi, salici o alberi da frutto. La parte collinare era coltivata soprattutto a cereali, legumi, pascoli, vigne e, soprattutto in Romagna, uliveti e frutteti. Nella parte montana prevalevano castagni, frutteti, pascoli, mais e segale. Nelle zone più alte e improduttive i campi lasciavano il posto ai pascoli, soprattutto tra il Parmense e il Modenese, e alle foreste.

Il frumento era il prodotto più coltivato e la regione era la seconda d'Italia per l'area ad esso dedicata, ovvero circa 5000 km² di cui circa 3000 in pianura. Il secondo prodotto per area occupata era il mais. Seguivano avena, segale, orzo, riso, fagioli, fave, patate, canapa, barbabietole, viti, ulivi, foraggi e castagne. Riguardo alla frutta, si raccoglievano pere, mele, ciliegie, susine, albicocche, pesche, noci e nocciole.

Nell'area bolognese, maggiormente irrigata, la coltura prevalente era il riso. Nelle aree circostanti le città vi erano molte coltivazioni di ortaggi. Nei terreni bonificati, suddivisi in campi di grandi dimensioni, la coltura principale era il frumento, ma non mancavano barbabietole da zucchero e canapa. In quegli anni la maggior parte dei terreni vitati si trovava in pianura. Vi erano boscaglie abbastanza ampie lungo il Po e gli altri fiumi, oltre

alle pinete costiere. Nella regione vi erano numerose cave di pietra e circa cinquanta miniere, specialmente di zolfo, petrolio e torba. Vi erano saline a Comacchio e Cervia⁴⁸.

2.4 – Uso del suolo negli anni '50

Negli anni cinquanta del '900, prima del boom economico degli anni '60 e dell'esodo dovuto alla meccanizzazione, l'agricoltura era l'attività principale dell'Emilia-Romagna: più della metà della popolazione era impiegata nel settore rurale e circa un terzo del reddito regionale derivava da agricoltura o foreste.

Continuarono le bonifiche dei territori ravennati e ferraresi, anche nelle zone di Comacchio e Mezzano di Ravenna. Aumentò il numero dei consorzi di bonifica. In questi anni le aree sommerse, paludose o con problemi di scolo si erano ridotte a circa 600 km², ricadenti soprattutto nel Ferrarese presso le valli di Comacchio e Volano, ma anche nel Bolognese presso i torrenti Lavino, Idice e Quaderna e nel Ravennate presso i fiumi Lamone e Bevano. L'irrigazione fu estesa grazie alle iniziative dei consorzi: furono scavati diversi canali atti a trasportare le acque del Po verso il Reggiano, il Modenese e il Ferrarese e furono creati invasi tramite chiuse nei tratti finali dei fiumi del Ravennate (Ronco, Montone, Savio). Furono creati anche pozzi artesiani, laghetti collinari e invasi appenninici. Furono iniziati gli scavi del Cavo Napoleonico, il canale che collega i fiumi Po e Reno nel Ferrarese, e del canale Emiliano-Romagnolo, il più lungo canale artificiale italiano, il quale attraversa e irriga la pianura nelle province di Ferrara, Bologna, Ravenna, Forlì e Rimini.

Il prodotto più coltivato era il frumento, il quale occupava circa 4600 chilometri quadrati di terreno. Il consumo era ancora per la maggior parte locale, con solo qualche esportazione verso le altre regioni. I raccolti migliori si registravano nelle pianure tra il Modenese, il Bolognese e il Ferrarese, i più scarsi sugli Appennini reggiani e forlivesi. Le varietà delle sementi erano numerose, in quanto selezionate nel tempo perché si

⁴⁸ Longhena M., *La patria: geografia d'Italia – Emilia*, Torino, UTET, 1926

adattassero ai diversi ambienti del territorio. Il secondo prodotto più coltivato era il mais, con circa 800 km² occupati, specialmente tra il Parmense e il Bolognese. Gli altri cereali erano l'orzo, la segale, coltivata specialmente in montagna, l'avena e il riso, presente soprattutto tra il Bolognese e il Ferrarese. Le patate, alimenti fondamentali, occupavano circa 150 km² di terreno, dalla pianura alla montagna. Aumentò la coltivazione delle barbabietole da zucchero, specie nel Ferrarese, nel Bolognese e nel Ravennate. La canapa era in diminuzione, a causa dell'incremento dei materiali alternativi come iuta e cotone. La coltura orticola principale era il pomodoro, specie tra il Piacentino e il Parmense, ma in aumento anche nelle altre zone. La maggior parte dei vigneti era ubicata in collina, mentre la vite in coltura promiscua, ovvero associata a seminativi o piante legnose, prevaleva in pianura. Si stavano diffondendo maggiormente i frutteti, specialmente i pescheti e i meleti nelle province di Ravenna, Forlì, Bologna e Ferrara; vi erano anche susini, albicocchi e ciliegi. I pascoli e i prati permanenti, ubicati soprattutto in montagna e in collina, erano in diminuzione, mentre le foraggere coltivate in pianura erano in aumento. I boschi occupavano circa il 15% della regione, specie nell'area montuosa, della quale occupavano circa il 40%; in pianura la superficie boscata occupava appena il 5% del terreno, specie nel Parmense, nel Piacentino e nel Ravennate. Nell'area montana circa un terzo della superficie era dedicato all'agricoltura, tuttavia in quegli anni vi si stavano verificando fenomeni di esodo e di abbandono⁴⁹.

⁴⁹ Toschi U., *Le regioni d'Italia – Emilia-Romagna*, Torino, UTET, 1961

CAPITOLO 3 – Stato dell’arte e dati

3.1 – *Stato dell’arte*

Negli ultimi decenni sono stati effettuati diversi studi sui suoli nudi.

Negli Stati Uniti, già nel 1975 si utilizzavano i metodi che conosciamo oggi per effettuare classificazioni di immagini. Uno studio di quell’anno⁵⁰ utilizza dati multispettrali e produce mappe digitali. In particolare, vengono ricercate le firme spettrali, ovvero le curve grafiche caratteristiche di un materiale generate dai valori di riflettanza (rapporto tra energia riflessa ed energia incidente) in base alla lunghezza d’onda delle radiazioni incidenti. Vengono analizzati i suoli nudi di tre aree degli Stati Uniti, confrontando le firme spettrali ricavate dai dati di scanner aerei con quelle ottenute analizzando campioni di suolo tramite spettrofotometro in laboratorio. Esse vengono poi utilizzate per classificazioni supervisionate e non supervisionate, ottenendo mappe molto simili per i due tipi di firme. Le tre aree considerate presentavano tre diversi tipi di suolo (aventi caratteristiche geologiche differenti). Hanno preso in considerazione l’intervallo di lunghezze d’onda 0.4 – 2.6 μm , diviso nelle tredici bande dello scanner multispettrale, e la riflettanza è stata espressa in percentuale (Fig. 3.1).

⁵⁰ May G. A., Petersen G.W., “Spectral signature selection for mapping unvegetated soils”, *Remote Sensing of Environment*, 4, 1975, pp. 211-220

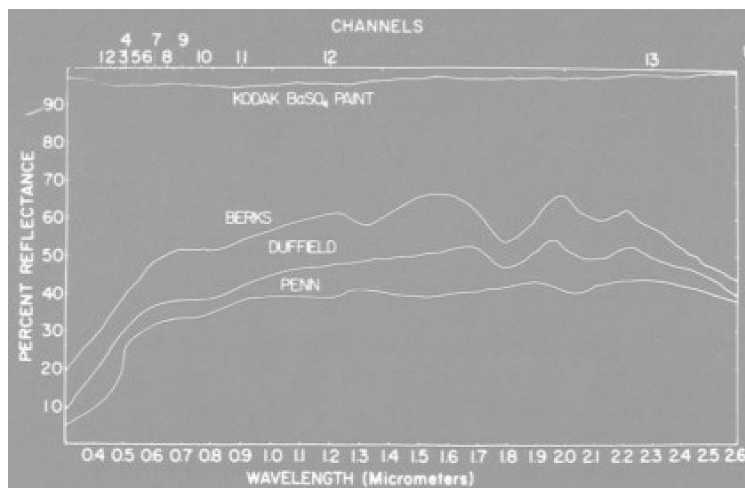


Figura 3.1. Firme spettrali ricavate dallo spettrofotometro per i tre tipi di suolo. Fonte: May G. A., Petersen G.W., "Spectral signature selection for mapping unvegetated soils", *Remote Sensing of Environment*, 4, 1975, pp. 211-220

Un altro studio del 1975⁵¹ analizza le differenze di riflettanza tra suolo nudo e suolo con residui vegetali². Sono state misurate le riflettanze, tramite spettroradiometro, in laboratorio su campioni vegetali e sul campo su alcuni terreni nudi o con residui di canna da zucchero. Si è visto che la riflettanza del suolo nudo e quella del suolo con residui appiattiti risultavano molto simili (la prima era leggermente inferiore nelle lunghezze d'onda comprese tra 0.5 e 1.8 μm) e che entrambe risultavano notevolmente maggiori rispetto a quella del suolo con residui "in piedi" in tutte le bande (Fig. 3.2). In seguito sono stati considerati i dati satellitari riguardanti dodici campi di suolo nudo e altrettanti con residui di diverse piante (pomodori, erbe, infestanti). Si è visto che la riflettanza dei campi con residui era generalmente più bassa di quella dei suoli nudi e che la densità dei residui aveva scarso influsso sui valori.

⁵¹ Gausman H. W. et alii, "Reflectance differences between crop residues and bare soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 39, n. 4, 1975, pp.752-755

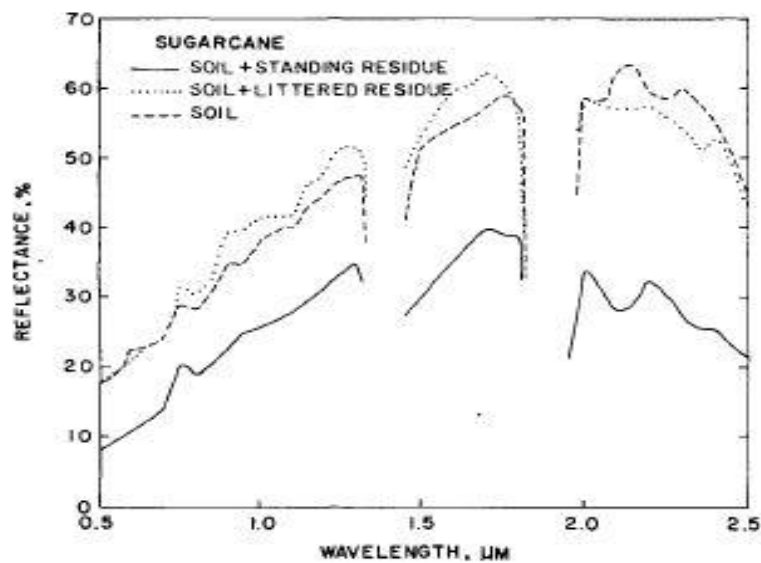


Figura 3.2. Firme spettrali ottenute con spettrometro di suoli con residui, con residui appiattiti o nudi. Fonte: Gausman H. W. et alii, "Reflectance differences between crop residues and bare soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 39, n. 4, 1975, pp.752-755

Uno studio del 1988⁵² ha ricavato le firme spettrali di diversi tipi di suolo, sia in laboratorio che sul campo, dimostrando come le caratteristiche del suolo influiscano sulla sua riflettanza: in particolare come l'aumento dei livelli di carbonio, umidità o rugosità del suolo provochi una forte diminuzione della riflettanza. In laboratorio sono stati presi campioni di quattro tipi di suolo, trattati e asciugati per eliminare carbonio e acqua e livellati; essi sono stati poi illuminati da luce artificiale ed è stata misurata la riflettanza nelle bande di lunghezze d'onda corrispondenti a quelle dei sistemi satellitari Landsat. Si è visto che la riflettanza aumenta all'aumentare della lunghezza d'onda e che i terreni sabbiosi presentano una riflettanza maggiore rispetto a quelli argillosi (Fig. 3.3).

⁵² Desmet A. et alii, "Influence of some soil factors on the reflectance of bare soils", *Pedologie*, XXXVIII-3, 1988, pp. 227-247

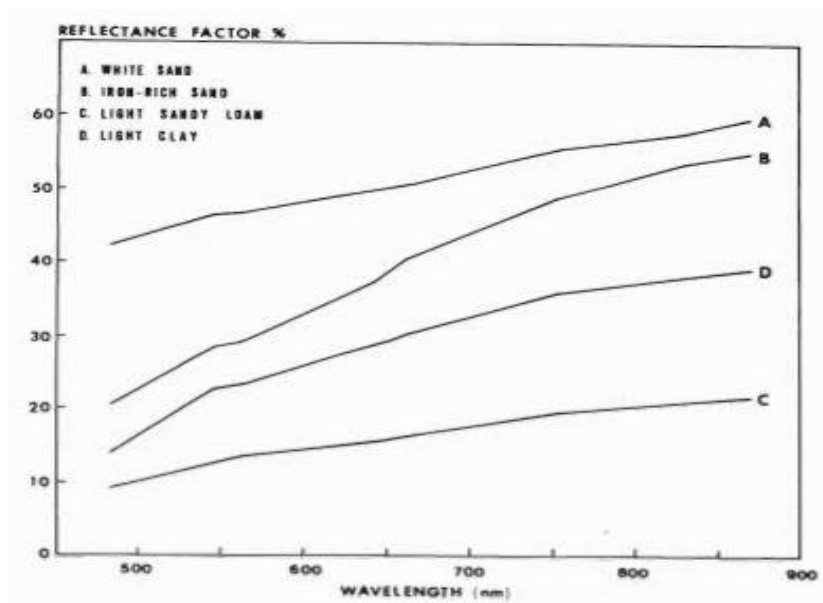


Figura 3.3. Firme spettrali di diversi tipi di suolo nudo privi di acqua o carbonio e livellati. Fonte: Desmet A. et al., "Influence of some soil factors on the reflectance of bare soils", *Pedologie*, XXXVIII-3, 1988, pp. 227-247

Ad alcuni campioni sono state poi aggiunte differenti quantità di acqua e humus, costituito principalmente da carbonio. Si è notato che la riflettanza diminuisce in modo non lineare all'aumentare dell'umidità o del contenuto di carbonio. Sul campo, sono state individuate tre aree geologicamente differenti, poi divise in quadranti modificati manualmente per ottenere un diverso livello di rugosità. Dopo le misurazioni, si è visto come i terreni lisci presentassero la riflettanza massima e i terreni più rugosi quella minima. Quindi anche l'aumento della rugosità causa una diminuzione di riflettanza.

Uno studio del 2009⁵³ era volto a trovare dei metodi per individuare suoli nudi a partire da immagini satellitari Landsat trattate con il software Envi⁴. L'area di studio era situata in Brasile su un'estensione di circa 3000 km². Il software ha individuato la riflettanza e le firme spettrali per ogni pixel. Sono stati presi 542 campioni di suolo con diverse caratteristiche in 39 zone dell'area di studio a diverse profondità. In laboratorio i campioni sono stati asciugati e setacciati e sono state determinate le diverse caratteristiche geologiche e chimiche. Sono state misurate le riflettanze mediante luce artificiale e

⁵³ Dematté J. et alii, "Methodology for bare soil detection and discrimination by Landsat TM Image", *The Open Remote Sensing Journal*, 2009, n. 5, pp. 24-35

spettrometro e sono state ottenute le firme spettrali dei suoli nudi (Fig. 3.4). Sono state confrontate le firme satellitari con le firme laboratoriali e sono stati individuati i suoli nudi nelle immagini tramite classificazione.

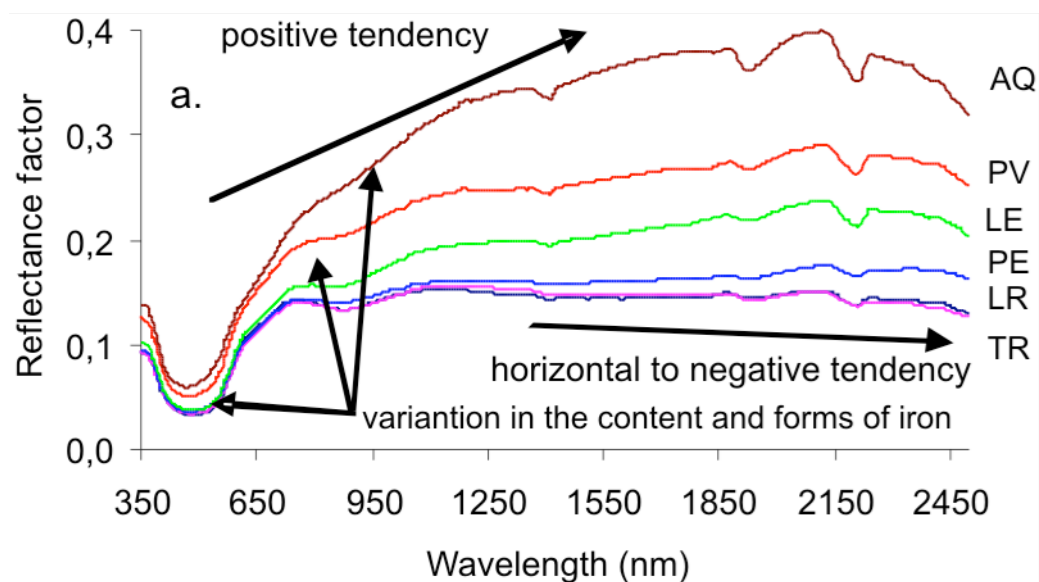


Figura 3.4. Firme spettrali di suoli con caratteristiche chimiche differenti. Le sigle sono abbreviazioni dei nomi scientifici dei suoli. Fonte: Dematté J. et alii, "Methodology for bare soil detection and discrimination by Landsat TM Image", *The Open Remote Sensing Journal*, 2009, n. 5, pp. 24-35

Un altro studio del 2009⁵⁴ analizza l'impatto dell'umidità superficiale sulla riflettanza dei suoli nudi⁵. Trenta campioni di suolo nudo con differenti caratteristiche sono stati raccolti in otto aree della Francia e suddivisi in base alla composizione chimica. Elementi diversi assorbono o riflettono la luce in modo differente. In seguito in laboratorio sono stati umidificati e asciugati per tempi differenti, in modo da ottenere sei livelli di contenuto di umidità o *soil moisture content* (SMC). Sono state misurate le riflettanze tramite spettrometro e lampada solare. Si è constatato che in generale la riflettanza decresce all'aumentare del contenuto di umidità (Fig. 3.5).

⁵⁴ Lesaignoux et alii, "Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4 - 15 μm domain", HAL, 2009

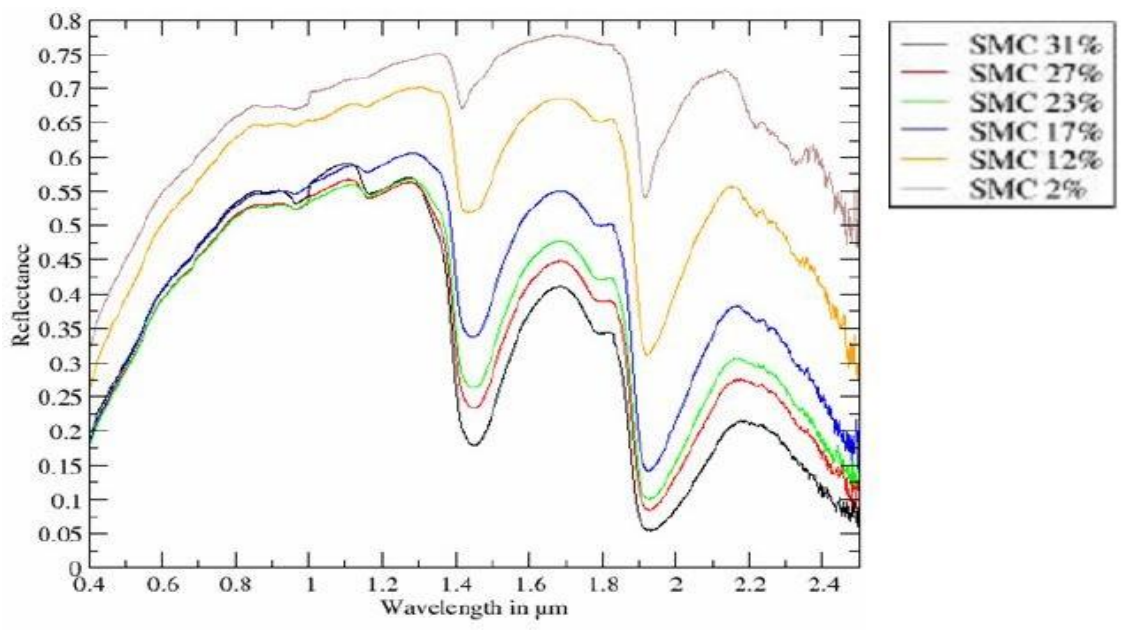


Figura 3.5. Firme spettrali di un tipo di terreno al variare del SMC. Fonte: Lesaignoux et alii, "Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4 - 15 μm domain", HAL, 2009

Uno studio del 2015⁵⁵ effettua il procedimento inverso, ovvero stimare il SMC dei suoli nudi partendo dalla riflettanza⁶. Sono stati presi 32 campioni di suolo nudo di diverso tipo in Francia. In laboratorio sono stati umidificati e asciugati a livelli diversi e sono state misurate le loro riflettanze. Per ottenere il SMC di un campione, sono state calcolate le aree sottese rispettivamente dal grafico della firma spettrale e dal suo involucro convesso (Fig. 3.6); infine è stata calcolata la loro differenza, a cui viene correlato il SMC mediante un modello di regressione lineare.

⁵⁵ Fabre S. et alii, "Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4-2.5 μm domain", Sensors, 2015, n. 15, pp. 3262-3281

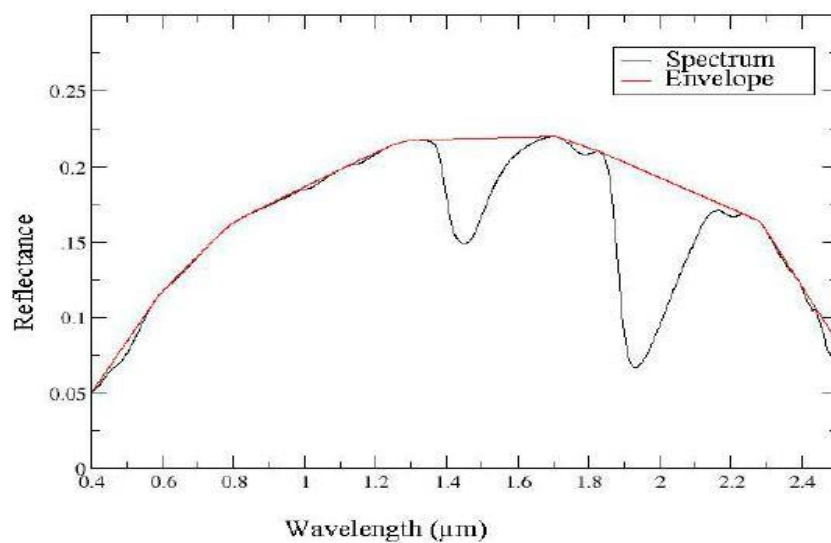


Figura 3.6. Firma spettrale di un suolo nudo con il suo involucro convesso. Fonte: Fabre S. et alii, "Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4-2.5 μm domain", *Sensors*, 2015, n. 15, pp. 3262-3281

Uno studio del 2020⁵⁶ mira a quantificare le parti di terreno prive di copertura, coperte da vegetazione o coperte da residui colturali⁷. È stata selezionata un'area comprendente campi aventi coltivazioni, residui colturali o suolo nudo. Immagini aeree sono state acquisite tramite drone e confrontate con immagini satellitari, poi sono state ricavate le riflettanze. In laboratorio è stato simulato il terreno reale con campioni di suolo, vegetali e residui (ottenendo diversi livelli di umidità e copertura del suolo) e sono state misurate le riflettanze. Viene proposto un nuovo indice chiamato BAI (*broadband spectral angle index*, derivato dagli angoli delle linee di riflettanza) per stimare la parte di terreno coperta da residui minimizzando gli effetti della percentuale di umidità (Fig. 3.7). Le parti di suolo nudo o copertura vegetale sono state quantificate combinando gli indici BAI e NDVI (*normalized difference vegetation index*). I risultati sono stati validati tramite i dati laboratoriali e satellitari.

⁵⁶ Yue J. et alii, "Using broadband crop residue angle index to estimate the fractional cover of vegetation, crop residue and bare soil in cropland systems", *Remote Sensing of Environment*, n. 237, 2020, pp. 1-16

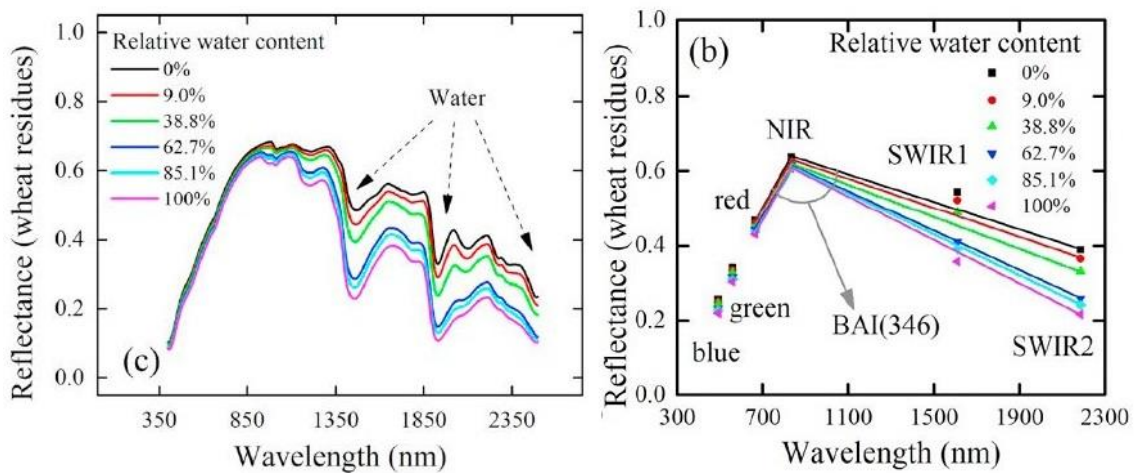


Figura 3.7. Firme spettrali di terreni con residui culturali a diverse percentuali di umidità e calcolo dell'indice BAI. Fonte: Yue J. et alii, "Using broadband crop residue angle index to estimate the fractional cover of vegetation, crop residue and bare soil in cropland systems", *Remote Sensing of Environment*, n. 237, 2020, pp. 1-16

Uno studio del 2022⁵⁷ mira a teorizzare un nuovo indice di suolo nudo o *normalized difference bare soil index* per migliorare la mappatura dei terreni, non essendoci indici di suolo nudo universalmente riconosciuti⁸. Vengono selezionate sei aree nella Repubblica Cinese aventi tipi di suolo e coperture differenti. Vengono scaricate le immagini satellitari Landsat e le firme spettrali caratteristiche delle diverse coperture: vegetazione, acqua, suolo nudo, superfici impermeabili (come l'asfalto) e tegole (Fig. 3.8).

⁵⁷ Liu Y. et alii, "A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas", *Catena*, n. 214, 2022

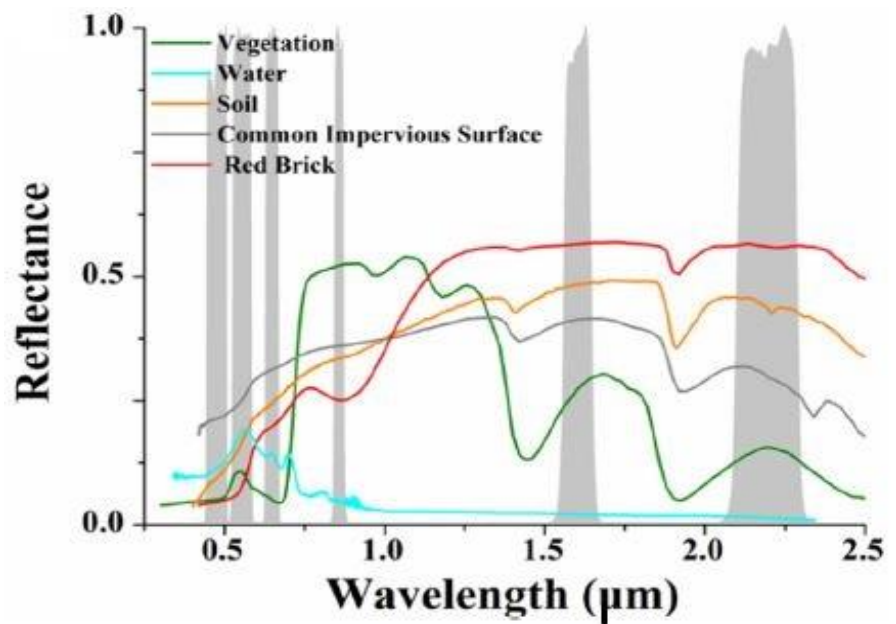


Figura 3.8. Firme spettrali del suolo nudo o con coperture. Fonte: Liu Y. et alii, "A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas", *Catena*, n. 214, 2022

L'indice è stato calcolato in base alle differenze tra le risposte spettrali più forti e più deboli: il suolo nudo presentava la riflettanza maggiore in corrispondenza della banda SWIR1 (*short-wave infrared 1*) e quella minore nella banda del Blu, pertanto sono state utilizzate queste due bande. Gli altri tipi di copertura sarebbero stati distinguibili in base ai diversi valori nelle due bande, ad esempio l'asfalto presenta riflettanza più bassa in SWIR1 e più alta nel Blu. Sono state introdotte delle altre variabili per distinguere le coperture con risposta simile a quella del suolo nudo: per le tegole si introduce "r" come differenza tra le riflettanze nelle bande del NIR (*near infrared*), del Rosso e dello SWIR1, per la vegetazione si introduce "v" come differenza tra le riflettanze nelle bande del Verde e del Rosso (Fig. 3.9).

$$NDBSI = \begin{cases} -\frac{|SWIR1 - Blue|}{SWIR1 + Blue} & k < 0 \\ \frac{SWIR1 - Blue}{SWIR1 + Blue} & k > 0 \end{cases}$$

with

$$k = r^*y$$

Figura 3.9. Formula dell'indice normalizzato di suolo nudo. Fonte: Liu Y. et alii, "A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas", *Catena*, n. 214, 2022

L'efficacia del metodo è stata dimostrata classificando le immagini satellitari in base all'indice e confrontando i risultati con le verità visibili nelle immagini. Il suolo nudo e gli altri tipi di copertura risultavano ben distinti tra loro in quasi tutti i casi, anche se si riscontrava maggiore efficacia per le aree urbane.

3.2 – Il programma Copernicus

Copernicus è il nome dell'innovativo programma di monitoraggio del pianeta Terra portato avanti dall'Unione Europea. Iniziato nel 2014, esso si propone di fornire informazioni gratuite in merito alle condizioni del pianeta, al fine di informare e aiutare nelle decisioni le autorità, i cittadini, i ricercatori e le organizzazioni. Il programma è frutto di una collaborazione tra l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), la Commissione Europea, le agenzie UE, gli stati membri, l'Organizzazione Europea per l'Esercizio dei Satelliti Meteorologici (EUMETSAT), il Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine e Mercator Océan (organizzazione internazionale per l'osservazione degli oceani). Il programma è costituito da un insieme di satelliti in orbita e da altri sistemi aerei, terrestri o marittimi (detti *in situ*, ovvero non spaziali), i quali effettuano misurazioni e fotografie sul pianeta per ottenere dati che saranno resi disponibili al pubblico in seguito a elaborazione e archiviazione. I dati sono indicizzati, in modo che possano essere confrontati tra di loro al fine di ottenere modelli e previsioni. Le informazioni fornite sono estremamente utili per prendere decisioni riguardanti diversi settori, come ad esempio, servono per lo sviluppo sostenibile, la tutela ambientale, la mitigazione dei cambiamenti climatici, la pianificazione urbana, la protezione civile e la difesa. Possono anche servire per organizzare il lavoro delle aziende nei settori dell'energia, dell'agricoltura, della silvicoltura, dei trasporti, delle assicurazioni, del turismo⁵⁸. Copernicus contribuisce al programma GEOSS (Global Earth Observation System of Systems), che raggruppa i sistemi di monitoraggio della Terra di diversi stati e organizzazioni⁵⁹ per conto di GEO (Group on Earth Observations, fondato nel 2005), l'associazione di istituzioni governative e organizzazioni volta all'osservazione della Terra e alla condivisione dei dati utili⁶⁰; in particolare fa parte di EuroGEOSS, la divisione europea di GEOSS⁶¹. Copernicus promuove la cooperazione internazionale nella ricerca di soluzioni ai problemi comuni.

⁵⁸ www.copernicus.eu/it/informazioni-su-copernicus

⁵⁹ earthobservations.org/geoss.php

⁶⁰ earthobservations.org/geo_community.php

⁶¹ ija.cnr.it/project/eurogeoss/

I servizi forniti da Copernicus sono suddivisi in sei campi: atmosfera, ambiente marino, territorio, cambiamenti climatici, sicurezza ed emergenze.

Il Servizio di Monitoraggio Atmosferico di Copernicus (CAMS) fornisce dati concernenti l'atmosfera, operando in cinque settori: qualità dell'aria e composizione atmosferica, strato di ozono e radiazioni ultraviolette, emissioni e flussi superficiali, radiazione solare e forzatura climatica. I dati ottenuti in tempo reale e in precedenza vengono confrontati al fine di ottenere previsioni per i giorni successivi e valutazioni di accuratezza. Vengono monitorate le concentrazioni di gas serra (anidride carbonica e metano), gas reattivi (monossido di carbonio, biossido di zolfo), ozono, aerosol e altri componenti, onde poter analizzare la qualità dell'aria in Europa. Inoltre vengono quantificati l'irraggiamento solare sulla superficie terrestre e la temperatura dell'aria. Le suddette informazioni tornano utili in settori quali meteorologia, climatologia, ecologia, agricoltura, energia, sanità. Il CAMS utilizza dati provenienti da osservazioni satellitari per quantificare la presenza di gas, aerosol, emissioni ed energia solare. Vengono sfruttate anche le osservazioni *in situ* per monitorare le concentrazioni di anidride carbonica, metano, protossido di azoto e altri inquinanti nell'atmosfera; queste osservazioni sono effettuate tramite sensori posti all'interno o nei pressi delle città, su aeroplani commerciali o appositi, su sonde a palloncino o su strumenti a terra⁶².

Il Servizio di Monitoraggio dell'Ambiente Marino di Copernicus (CMEMS), in collaborazione con Mercator Océan, fornisce dati riguardanti mari e oceani. Il campo di studio è lo stato fisico, chimico e biologico degli oceani di tutto il mondo e dei sei mari della regione europea. I dati sono utili principalmente a quattro settori: ambiente costiero e marino, sicurezza in mare, previsioni meteorologiche, risorse marine. Vengono fornite informazioni in merito a correnti marine, ghiacci, venti, qualità dell'acqua, livello del mare, temperatura, salinità. Vengono così facilitate le operazioni di organizzazione del traffico marittimo, ricerca e salvataggio, attività *offshore*, gestione della pesca, valutazione dell'erosione costiera, previsioni meteorologiche, gestione delle coste, politiche marittime. Il servizio pubblica annualmente una relazione sullo stato di salute degli oceani, con particolare riferimento ai cambiamenti climatici. L'innalzamento del

⁶² atmosphere.copernicus.eu

livello del mare e lo stato dei ghiacci artici e antartici sono un indicatore fondamentale del riscaldamento globale. Vengono forniti dati oceanografici, mappe, dati retrospettivi, simulazioni e modelli.

Il Servizio di Monitoraggio del Territorio di Copernicus (CLMS) fornisce dati riguardanti la superficie terrestre, operando in quattro settori: monitoraggio dei parametri biofisici, mappatura della copertura del suolo, mappatura dei punti critici (soggetti a particolari problemi ambientali), dati e immagini di riferimento. Vengono fornite informazioni in merito a vegetazione, colture, uso del suolo, ciclo dell'acqua, ghiacci, variabili energetiche. In futuro si prevede di misurare anche spostamenti del suolo e smottamenti. Il servizio è utile per i settori di pianificazione urbana e territoriale, gestione delle foreste, gestione idrica, agricoltura, tutela ambientale, mitigazione dei cambiamenti climatici.

Il Servizio relativo ai Cambiamenti Climatici di Copernicus fornisce informazioni sul clima attuale, precedente e futuro di tutto il mondo. Si basa sui programmi World Climate Research Program e Global Climate Observing System delle Nazioni Unite ed è attuato da oltre duecento aziende e organizzazioni. Aiuta le politiche europee sul clima e contribuisce al Global Framework for Climate Services (una partnership di diverse organizzazioni mondiali sul clima). Mette a disposizione dati in merito al clima e agli effetti dei suoi cambiamenti ai fini della mitigazione e dell'adattamento. Vengono forniti bollettini mensili e una relazione annuale concernenti le condizioni del clima, gli eventi anomali e l'evoluzione delle variabili climatiche. Vengono quantificati temperature, precipitazioni, radiazioni solari, venti, livello del mare, ghiacci. I dati sono utili ai settori riguardanti gestione dell'acqua, agricoltura, silvicoltura, infrastrutture, salute, energia, assicurazioni, navigazione, turismo, gestione delle coste e tutela della biodiversità. Per esempio, nel campo energetico, si possono quantificare l'energia necessaria per riscaldare o raffreddare gli edifici (in base alle temperature) e l'energia fornita dagli impianti fotovoltaici (in base all'irraggiamento solare), da quelli eolici (in base alla velocità dei venti) e da quelli idroelettrici (in base alle precipitazioni)⁶³.

⁶³ climate.copernicus.eu

Il servizio per le applicazioni di sicurezza di Copernicus ha come finalità il sostegno alle politiche dell'UE e la prevenzione delle crisi e opera in tre settori: sorveglianza delle frontiere, sorveglianza marittima e sostegno all'azione esterna dell'UE. Vengono monitorati spazi e attività per prevenire la criminalità transfrontaliera, garantire la sicurezza della navigazione, prevenire l'inquinamento dei mari e individuare minacce per la sicurezza europea o globale.

Il Servizio di Gestione delle Emergenze di Copernicus fornisce informazioni tempestive per aiutare la gestione di calamità naturali, situazioni emergenziali e crisi umanitarie. È diviso in due settori: mappatura e allerta rapida. La componente di mappatura fornisce carte basate su immagini satellitari e si divide in mappatura rapida (atta a gestire le emergenze) e mappatura del rischio e del recupero (atta a prevenire i disastri e ripristinare le aree danneggiate). La componente di allerta rapida fornisce informazioni e previsioni continue ed è composta da tre sistemi: il Sistema Europeo di Allarme Inondazioni, il Sistema Europeo di Informazione sugli Incendi Boschivi e l'Osservatorio Europeo sulla Siccità. Gli utenti dei dati sono soprattutto autorità di protezione civile e agenzie di aiuto umanitario⁶⁴.

I sistemi *in situ* sono molto importanti per Copernicus, poiché forniscono dati che permettono di integrare o validare i dati satellitari; comprendono sistemi di monitoraggio terrestri, marittimi o aerei. Sono gestiti dagli stati membri dell'UE, da strutture internazionali e dall'Agenzia Europea dell'Ambiente. Consistono in stazioni meteorologiche, rilevatori di qualità dell'aria e sensori posti su aerei, palloni, droni, navi, boe o rive di fiumi. Operano in quattro settori: meteorologia, oceanografia, composizione atmosferica e terraferma. Il primo prevede misurazioni di temperatura, precipitazioni, umidità, venti e radiazioni solari. Il secondo di temperatura, salinità, correnti, livello del mare, ghiacci e concentrazioni di clorofilla od ossigeno. Il terzo di concentrazioni di gas serra, polveri sottili e altri inquinanti. Il quarto di portate fluviali, ghiacciai, livelli di carbonio, umidità del suolo. La componente *in situ* comprende anche dati geospaziali di riferimento (a supporto dei servizi Copernicus), i quali possono essere mappe, immagini

⁶⁴ www.copernicus.eu/it/servizi

o modelli riguardanti insediamenti, industrie, idrografia, trasporti, elevazione, suoli e popolazione⁶⁵.

3.3 – *Le missioni Sentinel*

I satelliti principali utilizzati dal programma sono quelli appartenenti alla classe Sentinel, i quali sono stati progettati e lanciati appositamente per Copernicus. Vengono utilizzati anche satelliti preesistenti o commerciali per dati complementari (in questo caso si parla di missioni partecipanti). Il programma ha all'attivo 6 missioni Sentinel, ognuna delle quali è basata su una costellazione di 2 satelliti: questi ultimi viaggiano sulla stessa orbita sfasati di 180° tra di loro per garantire tempi di rivisitazione (passaggio sopra lo stesso punto della Terra) consoni. Essi trasportano sensori ottici, radar e strumenti di imaging dedicati al monitoraggio delle terre, degli oceani e dell'atmosfera.

Sentinel-1 è una missione in orbita quasi-polare (angolo di inclinazione rispetto l'equatore pari a 98°) iniziata nel 2014 e costituita dai satelliti Sentinel-1A e Sentinel-1B, aventi un sistema radar ad apertura sintetica (che invia e riceve impulsi lateralmente). Lo scopo è l'imaging radar della Terra diurno e notturno per il monitoraggio terrestre, marittimo e climatico.

Sentinel-2 è una missione in orbita quasi-polare eliosincrona (ovvero sincrona con il sole quindi garantisce sempre la stessa luminosità) iniziata nel 2015 e costituita dai satelliti Sentinel-2A e Sentinel-2B, che viaggiano ad una quota media di 786 km. Lo *swath* (area analizzata dal satellite) è ampio e misura 290 km in larghezza; la frequenza di rivisitazione complessiva è elevata (2-5 giorni). L'obiettivo è fornire immagini ad alta risoluzione per il monitoraggio di territorio, cambiamenti climatici, emergenze.

Sentinel-3 è una missione iniziata nel 2016 costituita dai satelliti Sentinel-3A e Sentinel-3B: monitora la superficie del mare e misura le temperature marine e terrestri, fornendo

⁶⁵ insitu.copernicus.eu

dati ottici, radar e altimetrici. L'obiettivo è il monitoraggio climatico, ambientale e oceanografico.

Sentinel-4 è una missione non ancora operativa che fornirà dati sulla composizione atmosferica (concentrazioni di gas, aerosol e altre componenti).

Sentinel-5 è una missione non ancora operativa che monitorerà la composizione atmosferica: al momento è stato lanciato solo il satellite Sentinel-5P (Precursor) nel 2017, che sta rilevando provvisoriamente i dati su qualità dell'aria, clima e radiazioni solari.

Sentinel-6 è una missione non ancora operativa che misurerà il livello del mare per studi su clima e oceanografia. Al momento è stato lanciato solo uno dei satelliti.

Sono allo studio sei ulteriori missioni, chiamate Sentinel Expansion, da affiancare alle sei missioni principali per integrare i dati riguardanti terre, oceani e atmosfera⁶⁶.

I satelliti dedicati attualmente in orbita sono Sentinel-1A e Sentinel-1B, Sentinel-2A e Sentinel-2B, Sentinel-3A e Sentinel-3B, Sentinel-5P e Sentinel-6A (Fig. 3.1).

Le missioni partecipanti o *Copernicus Contributing Missions* (CCM) mettono a disposizione satelliti che contribuiscono a fornire dati complementari e possono appartenere all'ESA, agli stati membri dell'UE, all'EUMETSAT o ad operatori terzi. Ci sono circa 30 missioni partecipanti all'attivo (Fig. 3.10). Esse utilizzano diversi sistemi: radar ad apertura sintetica (SAR) e sensori ottici (per osservazioni della Terra), altimetri (per misurazioni del livello del mare), radiometri (per misurazioni di temperatura) e spettrometri (per monitoraggi della qualità dell'aria)⁶⁷.

⁶⁶ sentinels.copernicus.eu

⁶⁷ www.copernicus.eu/en/contributing-missions



Figura 3.10. Satelliti dedicati e missioni partecipanti di Copernicus attualmente in orbita. Fonte: www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_contributing_missions

Il segmento terrestre è l'insieme delle infrastrutture sparse sul pianeta atte alla gestione dei satelliti (appartenenti al segmento spaziale) e al trattamento e alla distribuzione dei dati da essi ricevuti. Esso è gestito da ESA, EUMETSAT e altre agenzie o strutture pubbliche e private; è costituito da centri di controllo per comandare i satelliti, stazioni di terra per ricevere i dati e strutture per elaborazione, archiviazione e distribuzione dei dati. Ogni missione Sentinel o partecipante possiede un segmento terrestre coordinato con gli altri.

3.3.1 I dati Sentinel-2

I satelliti Sentinel-2, usati nel presente lavoro, si basano su un sistema di telerilevamento passivo, in quanto non emettono energia ma registrano quella solare riflessa dagli oggetti sul pianeta (a differenza del sistema radar, che è attivo quindi invia gli impulsi). Le immagini prodotte sono multispettrali, perché la quantità di energia riflessa viene rilevata dal sensore attraverso diversi intervalli di lunghezze d'onda. Viene utilizzato il sistema *push-broom*, nel quale una fila di detector registra i dati dello *swath* man mano che il satellite procede lungo l'orbita. Il rivelatore elettronico utilizzato è di tipo CCD (*Charge-coupled device*) ed è costituito da una matrice di pixel: in base alla quantità di energia

registrata, per ogni banda vengono assegnati numeri (detti *digital numbers*) ad ogni pixel. I *digital numbers* (DN) rappresentano la radianza, ovvero l'energia delle onde per unità di superficie, di angolo solido e di tempo. In funzione della risoluzione radiometrica di 12 bit, vengono poi assegnati ai fini della visualizzazione toni differenti di grigio ai singoli pixel, in base ai loro DN: ad una radianza maggiore corrisponderà un tono più chiaro (infatti gli oggetti chiari riflettono più energia, mentre quelli scuri la assorbono). In questo modo viene generata un'immagine in bianco e nero per ogni banda. I dati Sentinel-2 vengono acquisiti dai satelliti in tredici bande di lunghezze d'onda. Appartengono allo spettro del visibile le bande B1, B2, B3 e B4; all'infrarosso vicino le bande B5, B6, B7, B8, B8A e B9; all'infrarosso *short-wave* le bande B10, B11 e B12. Le bande B2, B3, B4 e B8 generano immagini con risoluzione geometrica di 10 metri; B5, B6, B7, B8A, B11 e B12 generano immagini con risoluzione di 20 m; B1, B9 e B10 generano immagini con risoluzione di 60 m. La lunghezza d'onda è crescente dalla banda B1 alla B12 (Figg. 3.11-3.12).

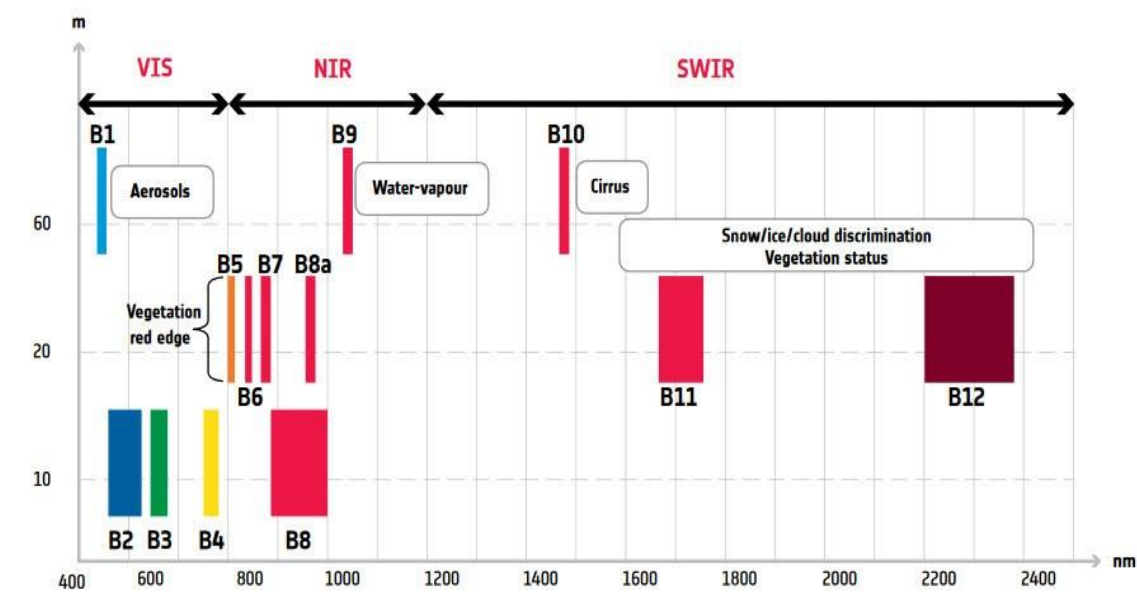


Figura 3.11. Bande di lunghezze d'onda utilizzate dai sistemi Sentinel-2. Fonte: esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-2_ESA_Bulletin161

Sentinel-2 bands	Central wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 – Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 – Blue	0.490	10
Band 3 – Green	0.560	10
Band 4 – Red	0.665	10
Band 5 – Vegetation red edge	0.705	20
Band 6 – Vegetation red edge	0.740	20
Band 7 – Vegetation red edge	0.783	20
Band 8 – NIR	0.842	10
Band 8A – Vegetation red edge	0.865	20
Band 9 – Water vapour	0.945	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1.375	60
Band 11 – SWIR	1.610	20
Band 12 – SWIR	2.190	20

Figura 3.12. Nomi e caratteristiche delle bande di Sentinel-2. *Fonte:* www.researchgate.net/figure/Sentinel-2-band-characteristics_tbl1_314119510

Copernicus Open Access Hub⁶⁸ è il portale di Internet attraverso il quale è possibile ottenere liberamente tutti i dati rilevati dai satelliti Sentinel di Copernicus. I dati possono essere visualizzati, trattati e analizzati tramite il programma per computer Sentinel Applications Platform (SNAP), concepito appositamente per tale scopo. BEAM-DIMAP è il formato dei dati visualizzati o trattati da SNAP.

3.4 – Altri dati utilizzati

Allo scopo di eliminare destinazioni di uso del suolo non agricole (urbano, strade, fiumi, laghi, etc.), è necessaria una maschera, ovvero un'immagine che serve da guida per ritagliarne altre. La maschera utilizzata nel lavoro è stata gentilmente fornita dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente dell'Emilia-Romagna (ARPAE) ed è basata su dati raccolti dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) riguardanti il consumo di suolo. Consiste in un'immagine in formato *raster*, ovvero costituita da pixel recanti informazioni; è nel formato TIFF, il più diffuso nel campo dei raster. La maschera contiene l'area di interesse del presente lavoro, ovvero la parte

⁶⁸ scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

pianeggiante della regione Emilia-Romagna privata delle aree coperte da edifici, strade o acque (Fig. 3.13).

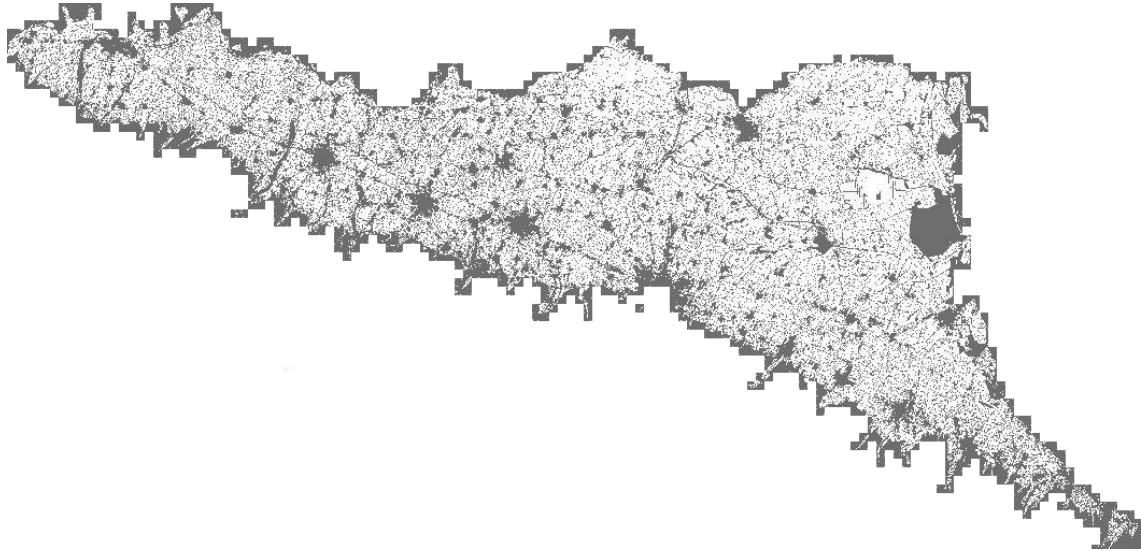


Figura 3.13. Maschera dell'area di interesse.

Per avere i dati sulle coltivazioni della zona è stata utilizzata la cartografia dell'uso agricolo del suolo del 2021 dell'Emilia-Romagna (Fig. 3.14). È stata gentilmente fornita da ARPAE ed è basata su dati forniti dall'Agenzia Regionale per le Erogazioni in Agricoltura dell'Emilia-Romagna (AGREA) ed elaborati dal Consorzio per il Canale Emiliano-Romagnolo (CER). Consiste in una mappa delle particelle catastali a cui sono associati i dati sulle colture praticate al loro interno. È in formato vettoriale, ossia è costituita da poligoni recanti informazioni; è nel formato *Shapefile*, il più diffuso nel campo dei vettoriali. Ogni particella riporta codice identificativo, superficie, colture e caratteristiche di esse. Alla stessa particella, suddivisa in più appezzamenti, possono essere associate più colture di cui si conosce la superficie (in ettari) ma non l'esatta posizione sulla particella.



Figura 3.14. Cartografia dell'uso agricolo del suolo del 2021 dell'Emilia-Romagna.

CAPITOLO 4 – Analisi dei dati per il riconoscimento dei suoli nudi

4.1– Fase preliminare: preparazione dei dati

a) Scelta delle immagini

Tramite il portale Copernicus Open Access Hub (Fig. 4.1), sono stati scaricati i dati contenenti la pianura dell’Emilia-Romagna in ogni mese compreso tra febbraio e novembre 2021, acquisiti dai satelliti Sentinel-2A e Sentinel-2B del programma Copernicus. Sono state scelte le immagini che presentavano una bassa o assente copertura nuvolosa (Fig. 4.2), tra i prodotti di tipo S2MSI2A, i quali sono già corretti atmosfericamente. La sigla “S2MSI” significa “strumento multispettrale su Sentinel-2” mentre “2A” indica che il livello di elaborazione è alto e che i valori di riflettanza sono stati corretti per ridurre gli errori causati da nuvole, aerosol, vapore acqueo e precipitazioni presenti nell’atmosfera⁶⁹.

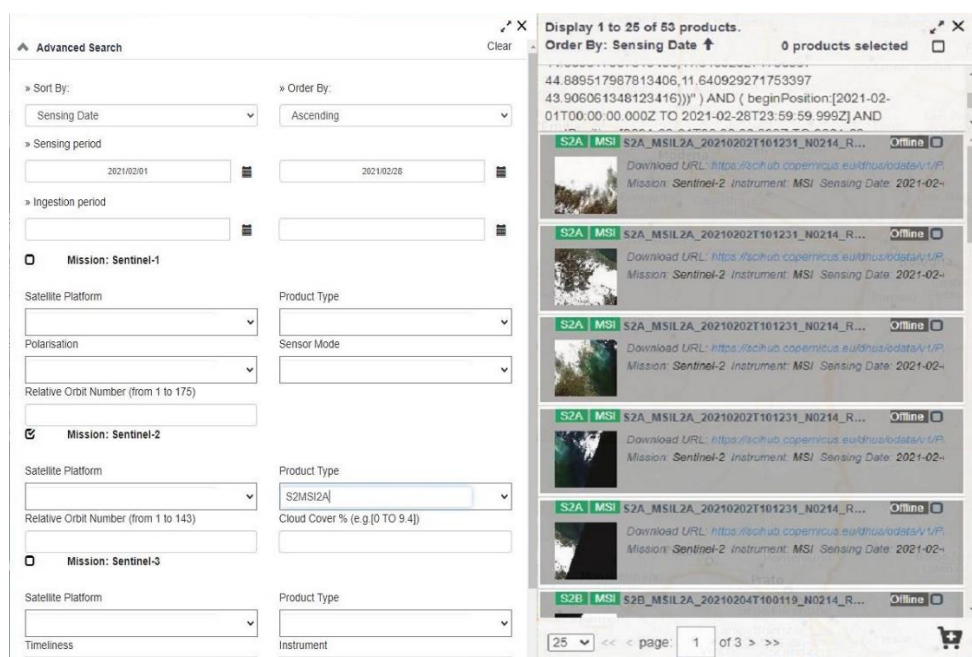


Figura 4.1. Esempio di ricerca di dati sul portale Copernicus Open Access Hub.

⁶⁹ sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2

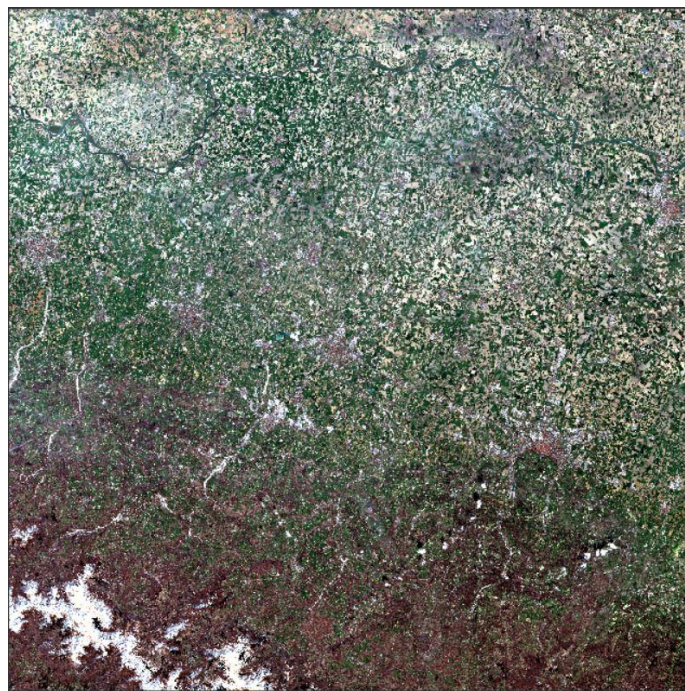


Figura 4.2. Immagine S2B_MSIL2A_20210329T100609 dell'area tra Parma e Bologna.

Fonte: scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

Tutti i dati scaricati sono riferiti all'anno 2021. L'area di interesse ricade in quattro delle zone definite dal portale. Sono state utilizzate le immagini delle seguenti date (Tab. 4.1):

	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE
PIACENZA-PARMA	25	22	1	21	15	10	9	8	13 , 28	
PARMA-BOLOGNA		4 , 29	8	28	22	7	11	5	15	24
FERRARA-RAVENNA		4 , 29	8	18	22	7	11	5	15	24
FORLI' -RIMINI	24	29	8	28	22	7	11	5	15	4

Tabella 4.1. Date delle immagini per zona.

b) Ritaglio delle immagini

Le immagini sono state importate nel software SNAP e visualizzate tramite il tool Red-Green-Blue (RGB) per vederle a colori naturali: le bande B2, B3 e B4, appartenenti allo spettro del visibile, sono state caricate nei canali blu, verde e rosso rispettivamente. Le immagini riguardanti le zone di Piacenza e Forlì sono state tagliate per rimuovere le aree montuose, non necessarie nel lavoro richiesto, tramite lo strumento Subset (Fig. 4.3).

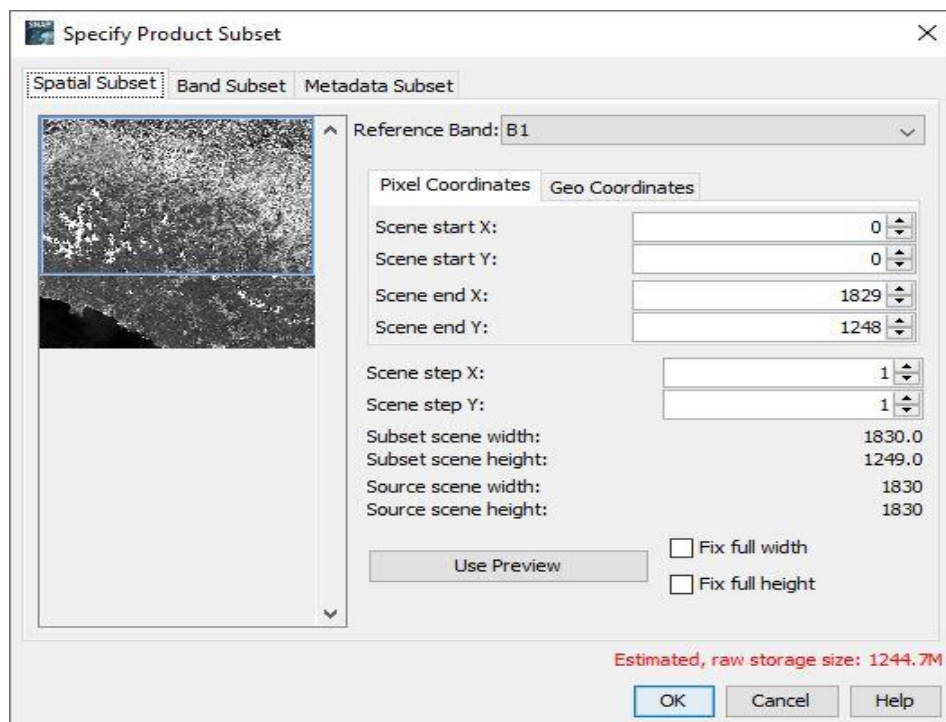


Figura 4.3. Esempio di Subset di un'immagine con SNAP.

c) Ricampionamento dei dati

Si è proceduto con il ricampionamento (Fig. 4.4) di tutti i dati multispettrali, che consiste nel portare tutte le diverse bande, per ogni singola immagine, alla stessa risoluzione geometrica (dimensione dei pixel) e nel riassegnare valori radiometrici ai nuovi pixel generati. In questo caso, prendendo la banda 2 come riferimento, la risoluzione spaziale delle bande a 20 e 60 m è stata portata a 10 m. L'algoritmo scelto per il campionamento

radiometrico è quello del *Nearest Neighbour*, il quale assegna al nuovo pixel il Digital Number (DN) del pixel avente le coordinate più vicine nella posizione iniziale.

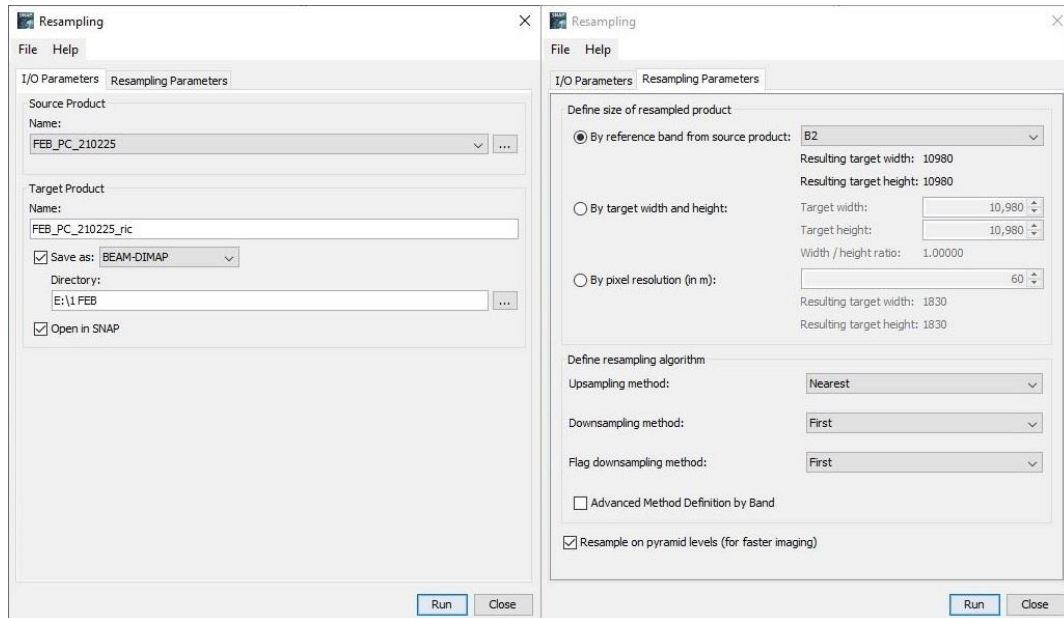


Figura 4.4. Esempio di ricampionamento di un'immagine con SNAP

d) Mosaicatura

In seguito sono state mosaicate le immagini dello stesso mese in blocchi da quattro, in modo da ottenere la copertura dell'intera area di interesse per ogni mese (Figg. 4.5-4.6).

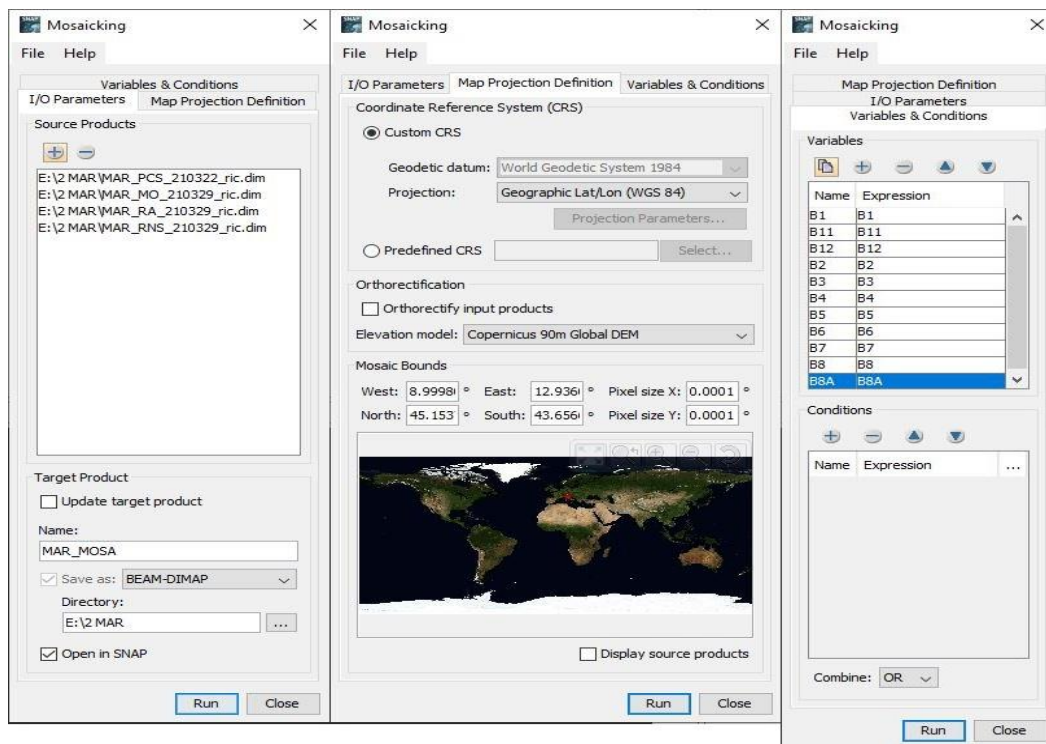


Figura 4.5. Esempio di *mosaicking* di immagini con SNAP.



Figura 4.6. Esempio di mosaico di quattro immagini (mese di luglio).

e) Riproiezione dei mosaici

Si è proceduto con la riproiezione dei mosaici (Figg. 4.7-4.8), per orientarli dal sistema di riferimento geografico WGS84 (latitudine e longitudine sull'ellissoide) a quello cartografico WGS84-UTM32 (coordinate X e Y sul piano, proiezione UTM fuso 32).

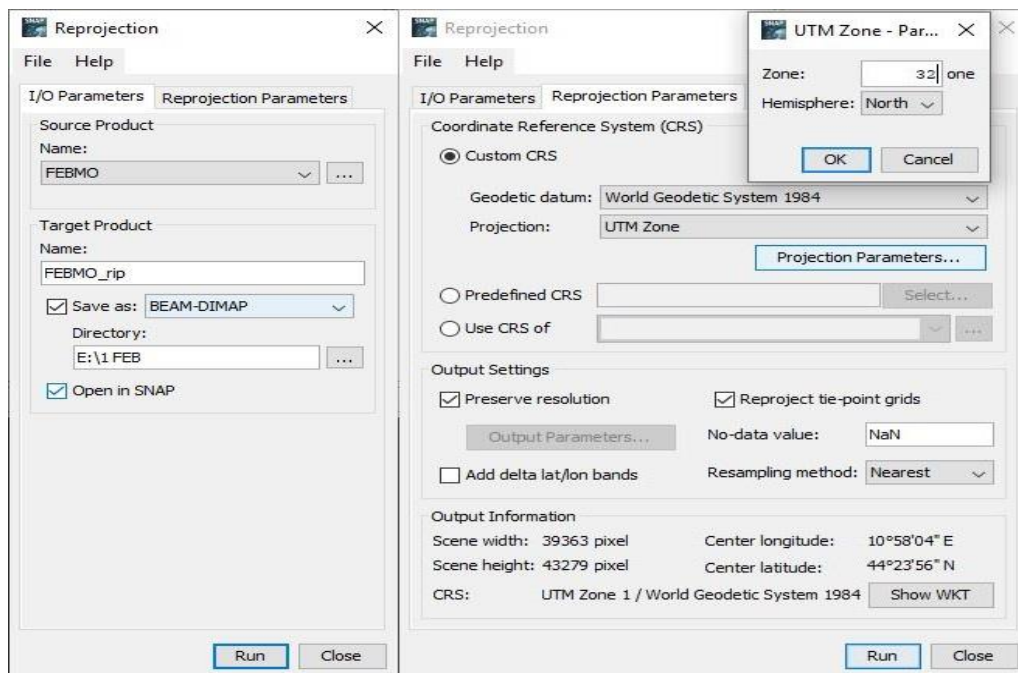


Figura 4.7. Esempio di riproiezione di un mosaico con SNAP.



Figura 4.8. Esempio di mosaico riproiettato (mese di luglio).

f) Trattamento della maschera

Per selezionare l'area di interesse è stata utilizzata la maschera della parte pianeggiante della regione Emilia-Romagna privata delle aree coperte da edifici, strade o acque (vedi paragrafo 3.4). È stato utilizzato il programma *QuantumGIS (QGIS)*, un sistema informativo geografico atto al trattamento dei dati territoriali. La maschera è stata importata nel programma e convertita dal formato raster al formato vettoriale, onde poter utilizzare i contorni per ritagliare le immagini satellitari (Figg. 4.9-4.11).



Figura 4.9. Maschera in formato Raster.

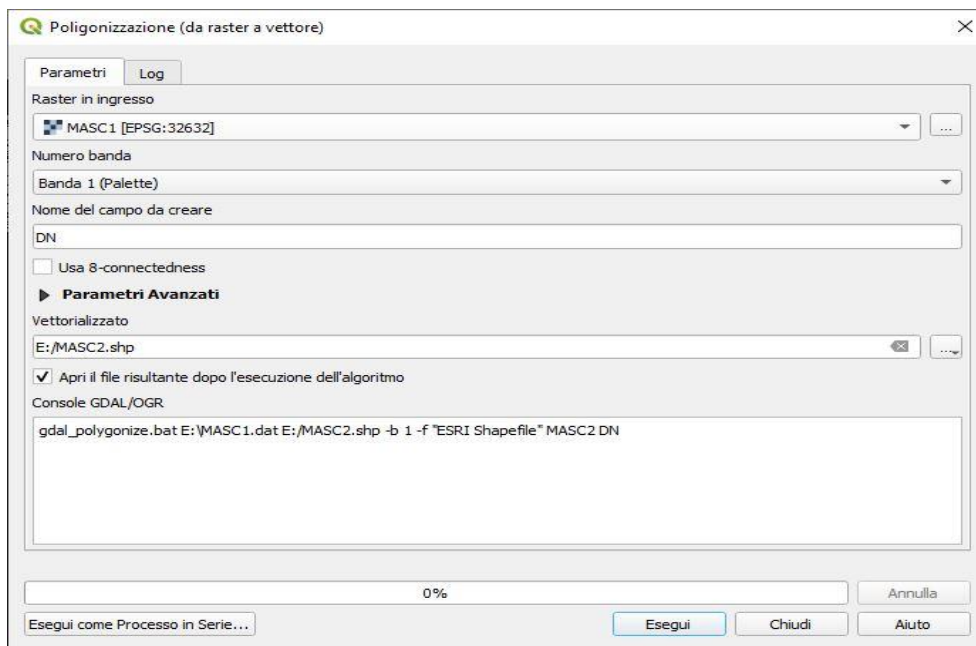


Figura 4.10. Conversione della maschera dal formato Raster al formato vettoriale con QGIS.

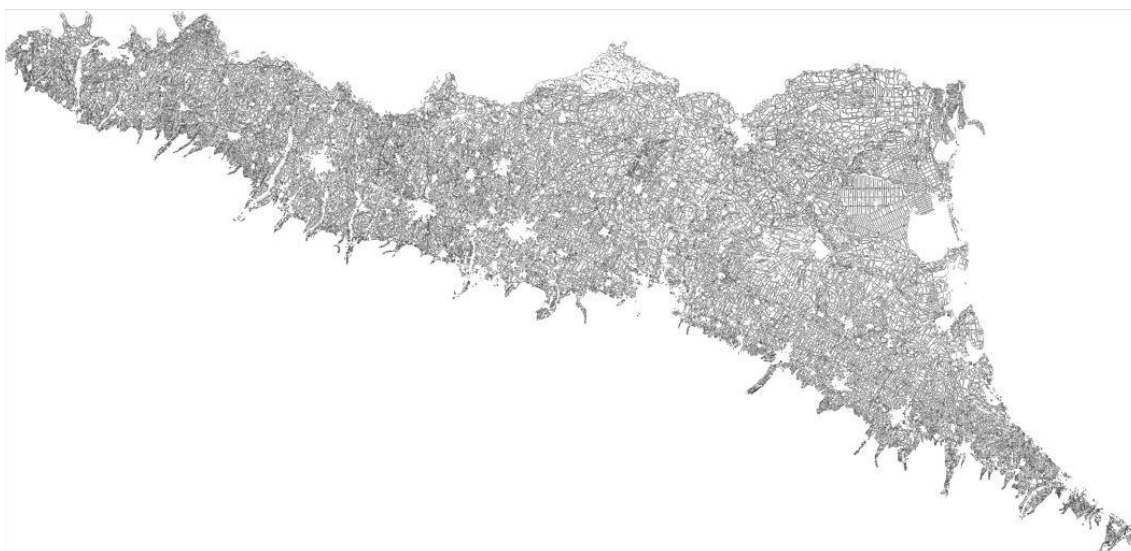


Figura 4.11. Maschera in formato vettoriale.

È stato altresì necessario controllare la validità degli elementi (per trovare eventuali errori geometrici) e in seguito riparare le geometrie della maschera per eliminare le linee aperte (che possono impedire un corretto funzionamento), (Figg. 4.12-4.13).

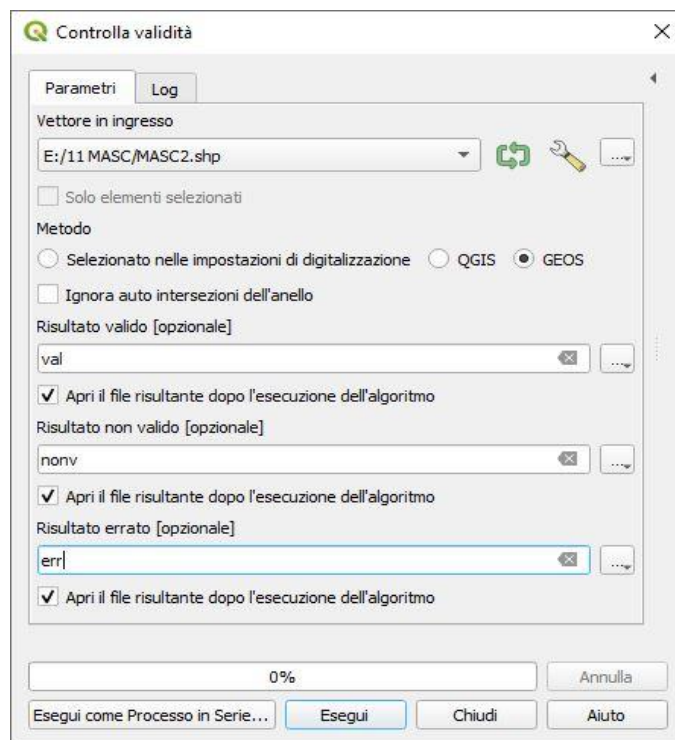


Figura 4.12. Controllo della validità della maschera.

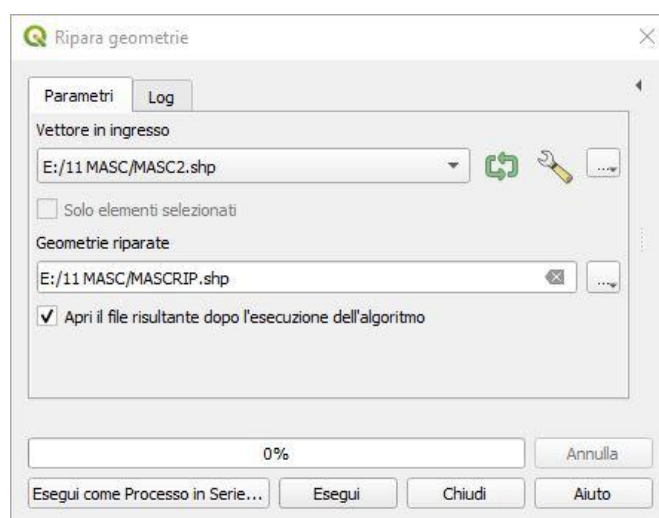


Figura 4.13. Riparazione delle geometrie della maschera.

g) Ritaglio dei mosaici

Per poter importare i mosaici di immagini in QGIS, è stato necessario convertirli dal formato BEAM-DIMAP al formato TIFF. La specifica GeoTIFF-BigTIFF permette di includere i riferimenti geografici e di trattare immagini di grandi dimensioni (Figg. 4.14-4.15).

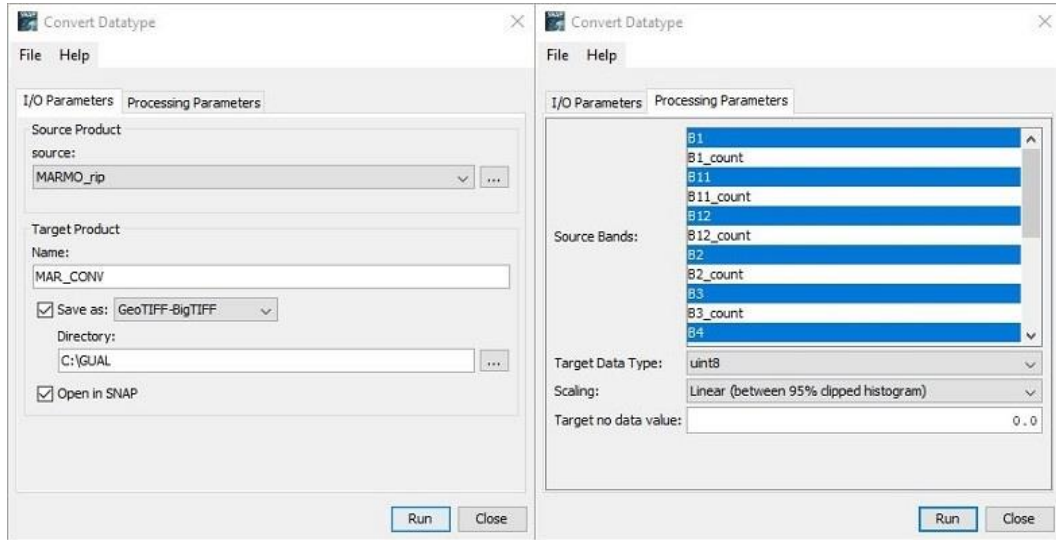


Figura 4.14. Conversione di un mosaico dal formato BEAM-DIMAP al formato TIFF con SNAP.

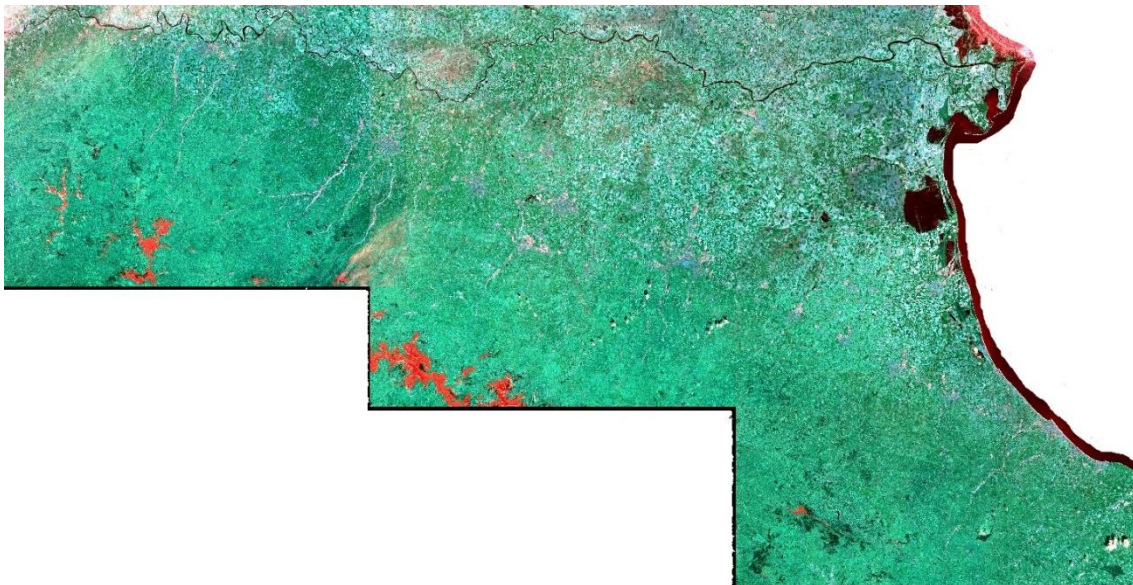


Figura 4.15. Mosaico convertito nel formato TIFF.

In seguito i mosaici sono stati tagliati seguendo la maschera dell'area pianeggiante, in modo da eliminare le aree collinari e montuose, non utilizzate nel lavoro (Figg. 4.16-4.17).

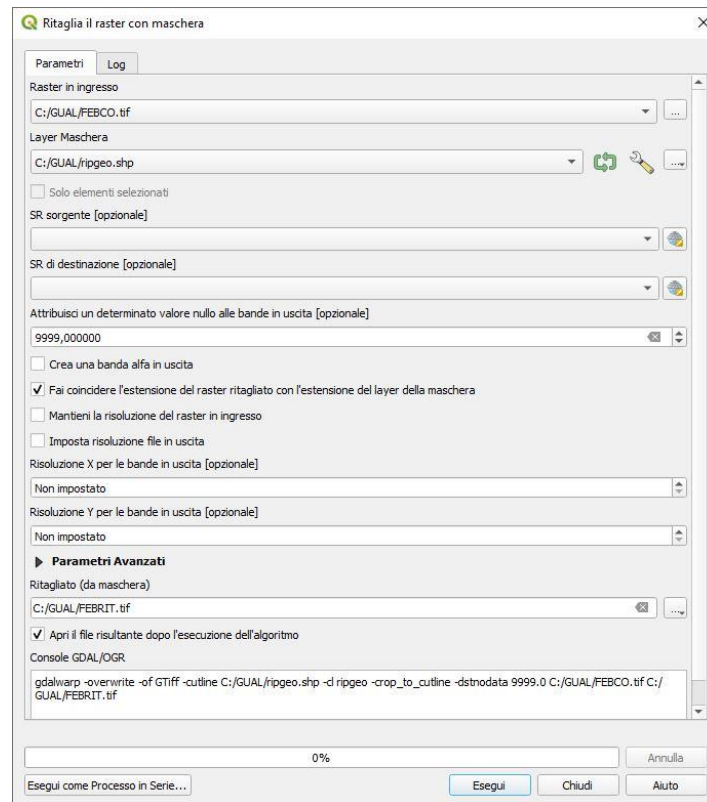


Figura 4.16. Ritaglio del mosaico sulla maschera con QGIS.

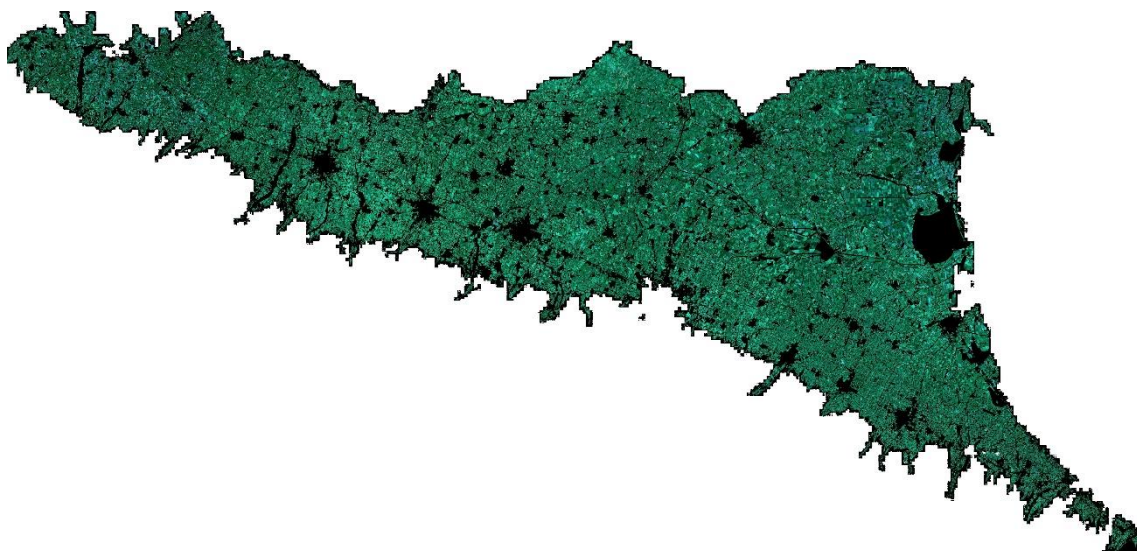


Figura 4.17. Mosaico ritagliato sulla maschera.

h) Estrazione dei dati colturali

Tramite la maschera, è stata estratta l'area di interesse dallo shapefile dell'uso agricolo del suolo (vedi Paragrafo 3.4) (Figg. 4.18-4.19).

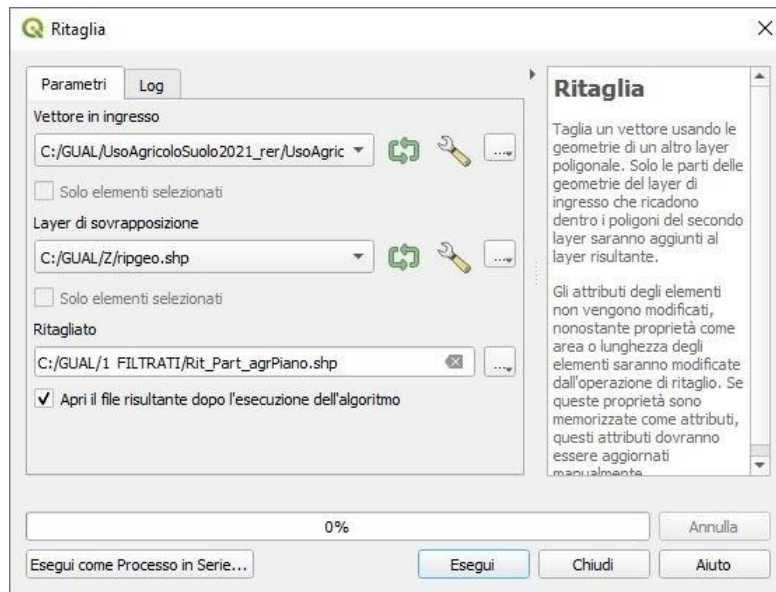


Figura 4.18. Ritaglio dello shapefile dell'uso agricolo del suolo sulla maschera.

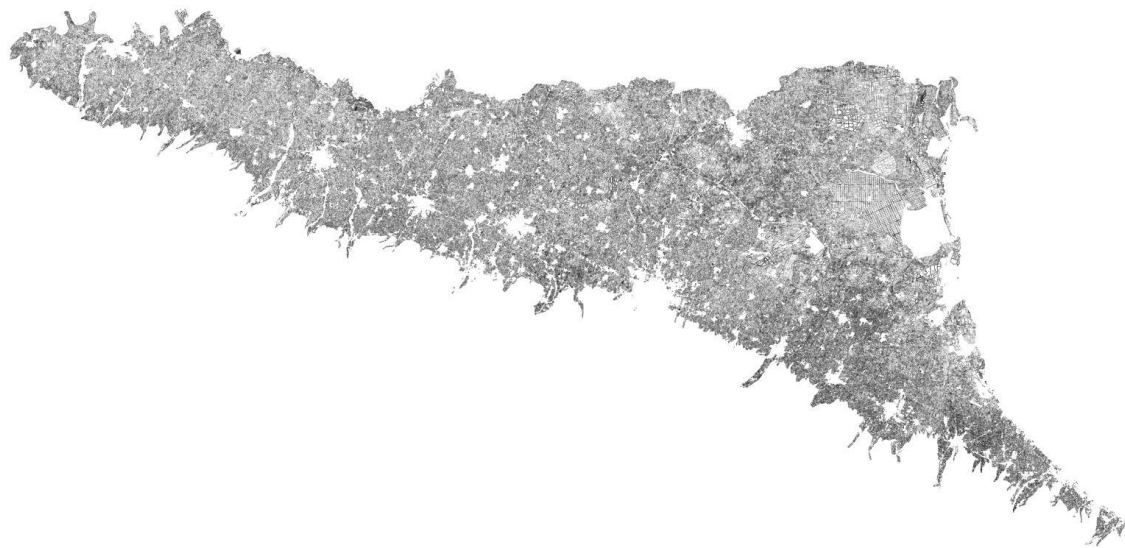


Fig. 4.19. Uso agricolo del suolo nell'area di interesse.

In seguito sono state riparate le geometrie ed è stato aggiunto un indice spaziale (strumento che facilita i calcoli successivi su QGIS) (Fig. 4.20).

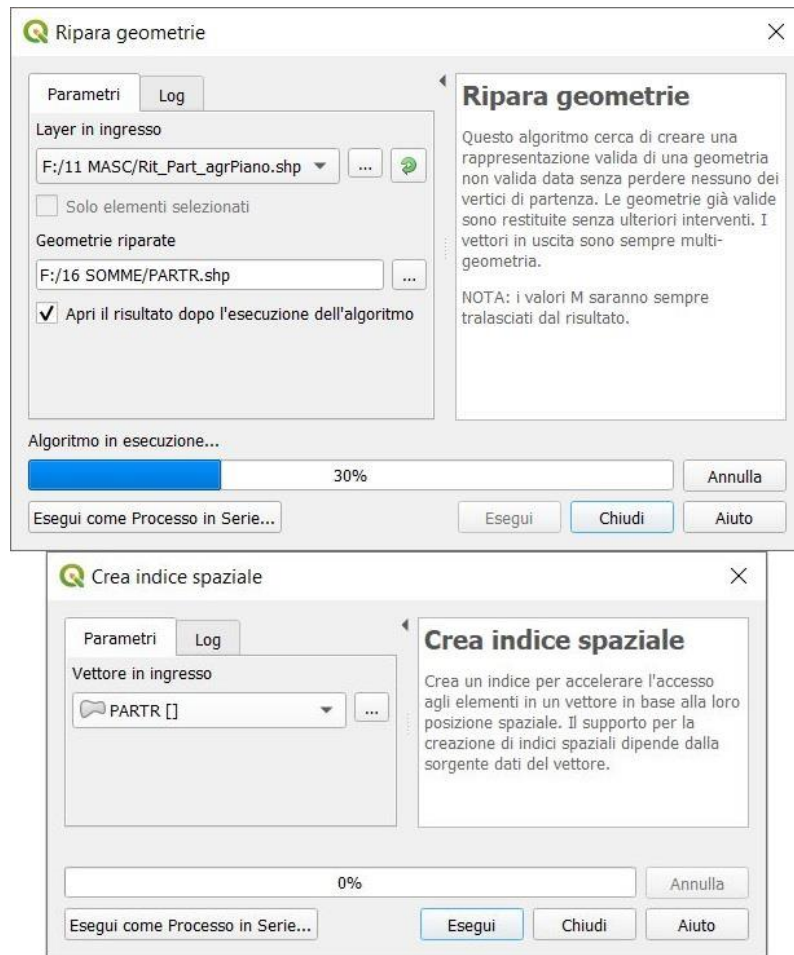


Figura 4.20. Riparazione delle geometrie e creazione dell'indice spaziale del vettoriale.

È stato ricavato anche uno shapefile privo delle particelle catastali aventi colture permanenti o serre (tra cui arboree, frutteti, vigneti, uliveti), non utili nel lavoro. Tramite la tabella degli attributi di QGIS (recante le informazioni del vettoriale) sono state selezionate le particelle con colture di interesse ed esportate come nuovo vettoriale (Figg. 4.21-4.22).

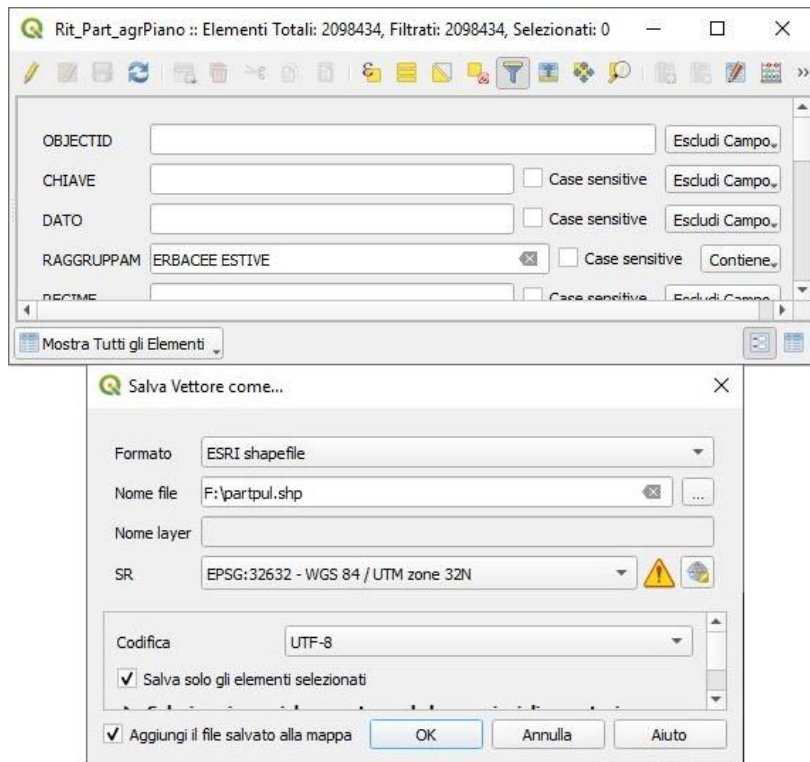


Fig. 4.21. Selezione delle colture di interesse e creazione del nuovo vettoriale.

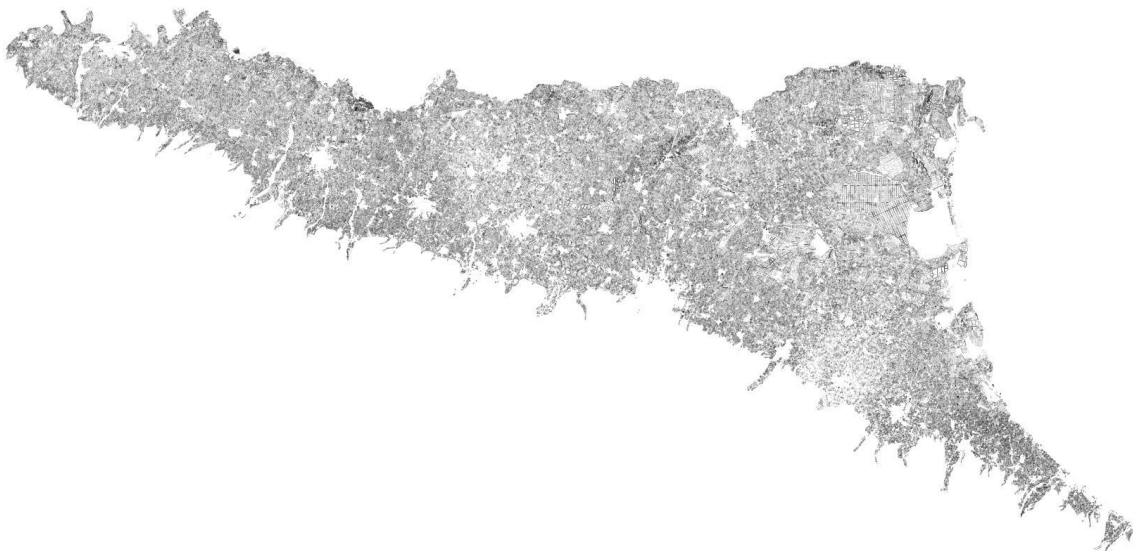


Fig. 4.22. Vettoriale delle particelle con colture di interesse.

4.2 – Analisi dei dati

La procedura applicata, basata sull'utilizzo dei software open source Quantum Gis (QGis) e Sentinel Application Platform (SNAP), ha previsto i passaggi schematizzati nel workflow riportato in figura 4.23 e di seguito descritti.

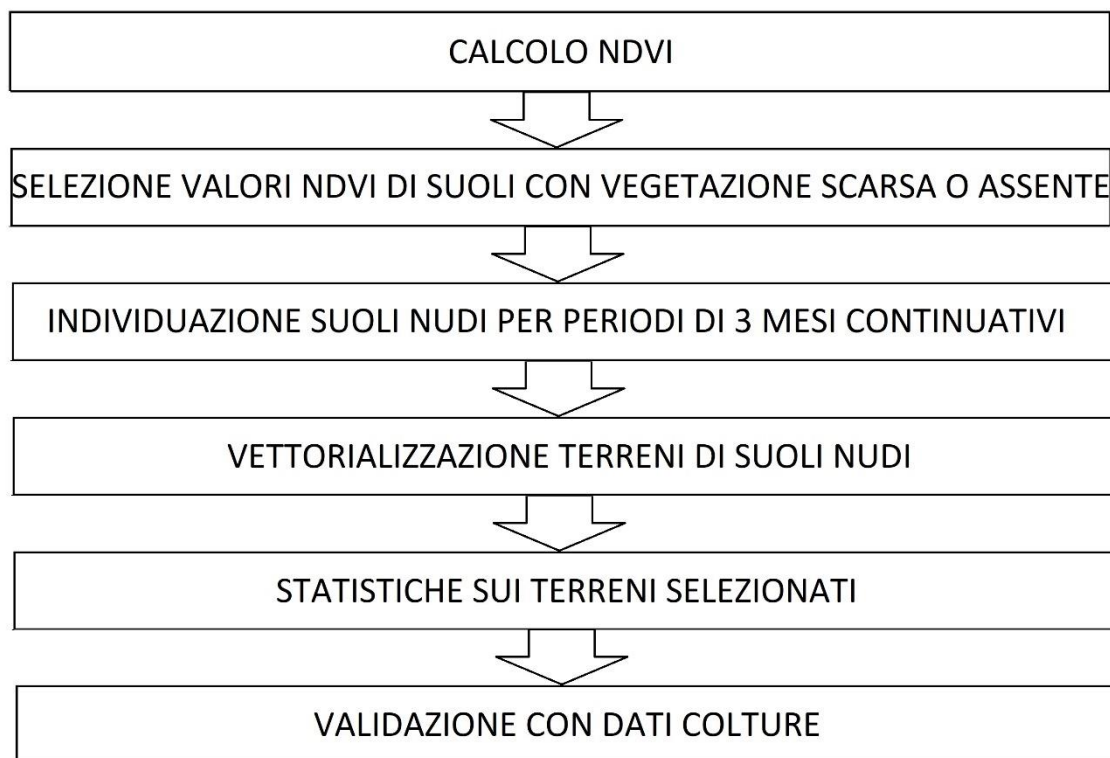


Figura 4.23. Diagramma dei passaggi successivi.

a) Calcolo dell'NDVI

Per individuare i suoli nudi è stato utilizzato l'indice di vegetazione *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), un numero adimensionale compreso tra -1 e 1 ottenuto dalle risposte spettrali della vegetazione nelle bande di lunghezze d'onda dell'infrarosso vicino e del rosso. Tra tutte le bande disponibili, sono state utilizzate le bande dell'infrarosso vicino (NIR) e del rosso (R) nella nota formula:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Figura 4.24. Formula dell'indice NDVI. NIR significa *Near InfraRed* o infrarosso vicino e R indica la banda del rosso. Fonte: Moriondo M. et alii, "A simple model of regional wheat yield based on NDVI data", *European Journal of Agronomy*, 2007, n. 26, pp. 266-274

Secondo Dalezios et al. (2017), un NDVI minore di 0.09 indica assenza di vegetazione (suolo nudo, acqua o neve), mentre un NDVI maggiore indica presenza di vegetazione (scarsa, media o densa) (Fig. 4.25). Nel procedimento è stato preso in considerazione l'intervallo 0.02-0.2, che identifica suoli nudi o con scarsa copertura vegetale (presumibilmente di erbacce infestanti o residui secchi seguenti un raccolto). L'NDVI del suolo nudo può raggiungere anche valori più alti in certe zone o in certi periodi, ma è stato comunque utilizzato il range di cui sopra per avere una maggiore sicurezza sui risultati, anche se la quantità di suolo nudo potrebbe essere sottostimata.

Land cover type	NDVI (-1, +1)
Dense vegetation	$0.500 \leq NDVI \leq 1$
Moderate green vegetation	$0.140 \leq NDVI < 0.500$
Sparse vegetation	$0.090 \leq NDVI < 0.140$
Bare soil	$0.025 \leq NDVI < 0.090$
Cloud	$0.002 \leq NDVI < 0.025$
Snow and ice	$-0.046 \leq NDVI < 0.002$
Water	$-1 \leq NDVI < -0.046$

Figura 4.25. Tabella dei valori di NDVI e dei rispettivi tipi di suolo. Fonte: Dalezios N. et al., "Agricultural drought indices: combining crop, climate and soil factors", *Handbook of Drought and Water Scarcity*, Vol.1, 2017

Su QGIS sono stati ottenuti i raster degli NDVI delle aree pianeggianti per ogni mese, scrivendo la formula corrispondente nello strumento *calcolatore raster* (Fig. 4.26).

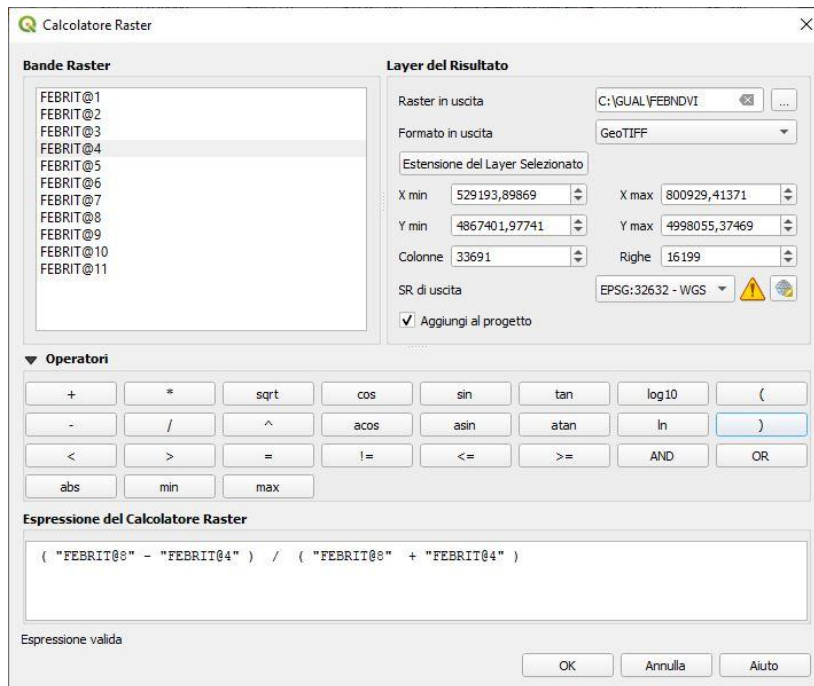


Figura 4.26. Calcolo dell'NDVI con QGIS.

b) Selezione dei valori di NDVI

In seguito sono stati selezionati i pixel aventi valori di NDVI utili al progetto, ovvero compresi tra 0.02 e 0.2 e quindi riconducibili a terreni nudi o con sole erbacce: per fare ciò, il calcolatore raster assegna la cifra 1 ai pixel ricadenti nell'intervallo e la cifra 0 a tutti gli altri (Fig. 4.27).

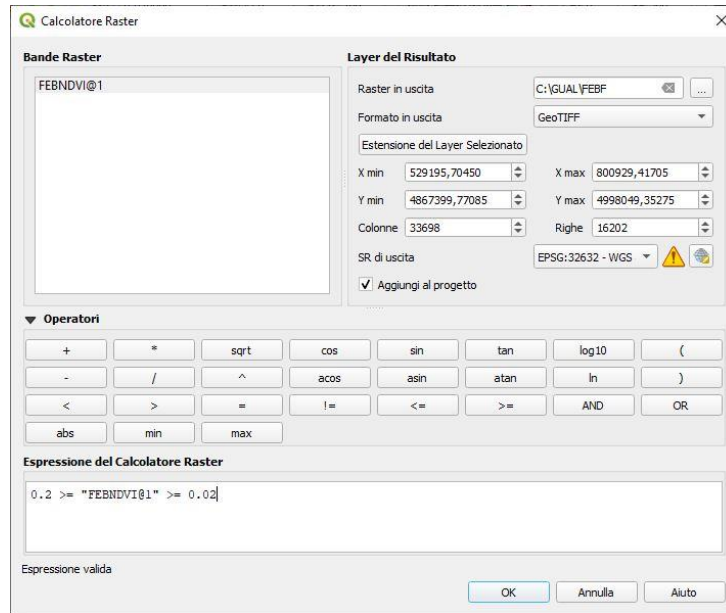


Figura 4.27. Selezione dei pixel su QGIS.

c) Individuazione dei terreni non coltivati

Dovendo individuare i suoli che rimangono nudi per almeno tre mesi (il tempo minimo per poter avere un raccolto), i raster NDVI filtrati sono stati sommati in gruppi da 4 mesi consecutivi cadauno (Fig. 4.28), ottenendo 7 prodotti (Tab. 4.2). Sono stati scelti i gruppi di 4 mesi per aumentare le possibilità di avere periodi di almeno 3 mesi completi.

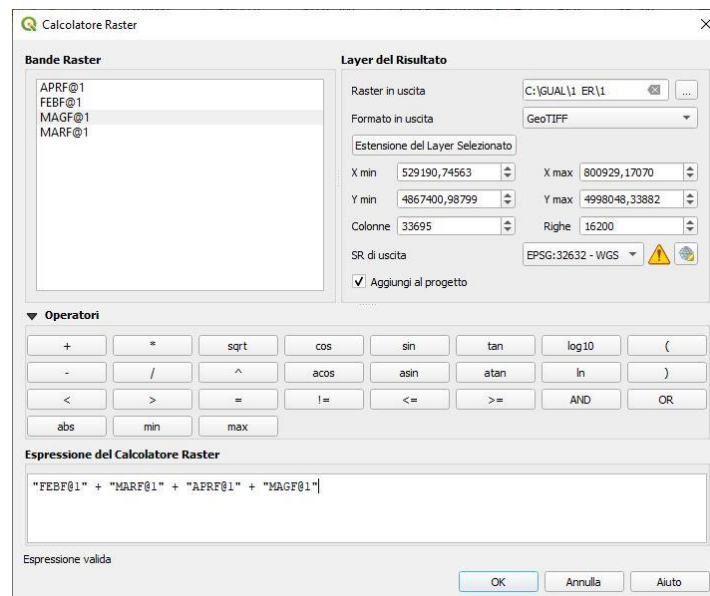


Figura 4.28. Somma dei raster filtrati.

MESI	PERIODO
FEBBRAIO - MARZO - APRILE - MAGGIO	1
MARZO - APRILE - MAGGIO - GIUGNO	2
APRILE - MAGGIO - GIUGNO - LUGLIO	3
MAGGIO - GIUGNO - LUGLIO - AGOSTO	4
GIUGNO - LUGLIO - AGOSTO - SETTEMBRE	5
LUGLIO - AGOSTO - SETTEMBRE - OTTOBRE	6
AGOSTO - SETTEMBRE - OTTOBRE - NOVEMBRE	7

Tabella 4.2. Gruppi di 4 mesi considerati e numeri identificativi dei periodi.

I pixel del raster-somma ai quali corrisponde la cifra 4 saranno presumibilmente quelli ricadenti su suoli che rimangono nudi per almeno tre mesi; pertanto, tali pixel sono stati selezionati con assegnazione della cifra 1 (Fig. 4.29).

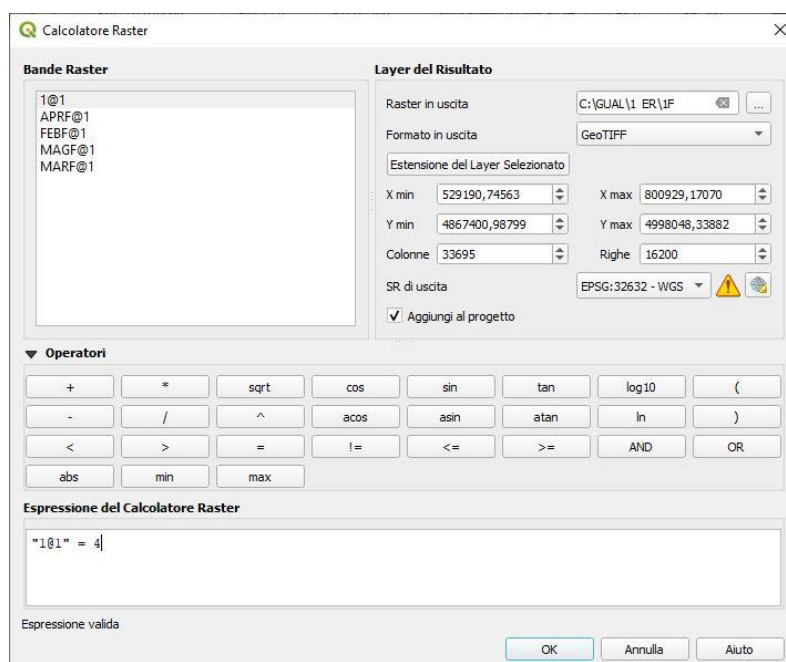


Fig. 4.29. Selezione dei pixel con valore 4.

d) Vettorializzazione

I raster risultanti sono stati convertiti in vettoriali. Quindi, tramite la tabella degli attributi, sono state selezionate le sole aree recanti la cifra 1 ed esportate come nuovi vettoriali (Figg. 4.30-4.31).

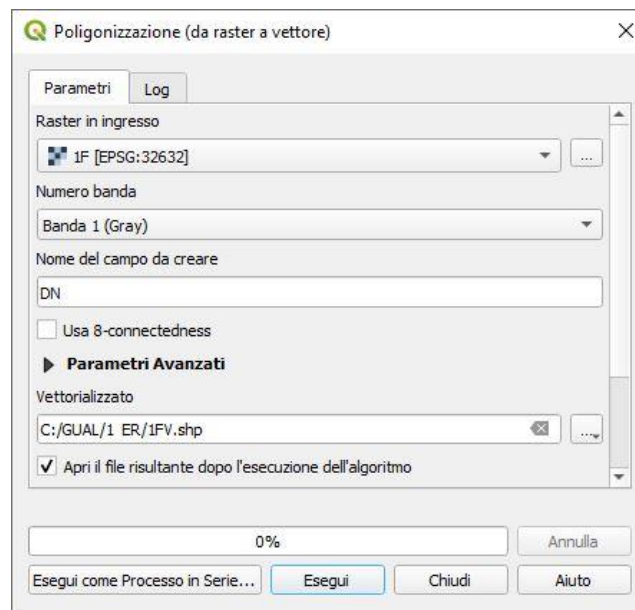


Figura 4.30. Conversione dei raster-somma filtrati in vettoriali.

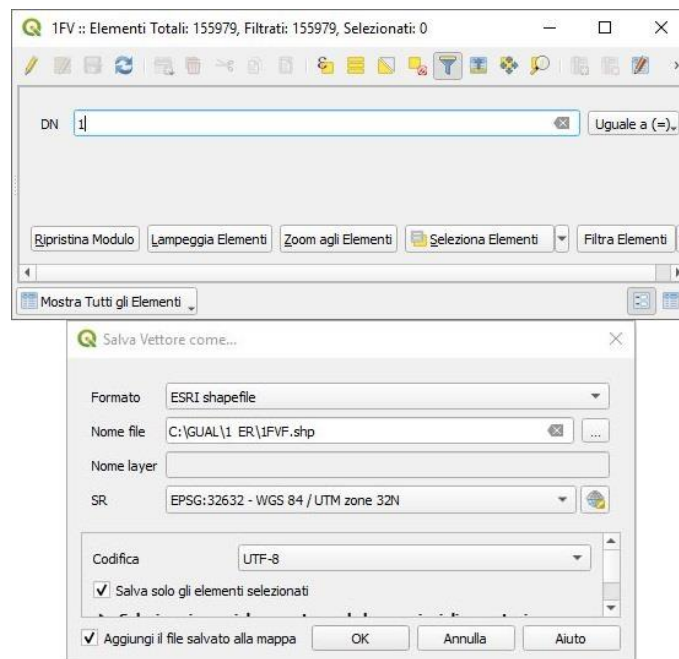


Figura 4.31. Selezione delle aree e creazione di nuovi vettoriali.

Ai poligoni risultanti sono stati assegnati tre nuovi campi (colonne della tabella degli attributi): il primo (ID) contenente un numero identificativo, il secondo (acronimo con iniziali dei mesi) un indice compreso tra 1 e 7 che indica il blocco di 4 mesi di appartenenza e il terzo (AREA) la superficie (Fig. 4.32).

ID	FMAM ▲	AREA
0	1	0,338
1	1	0,013
2	1	0,007
3	1	0,755
4	1	0,957
5	1	0,007
6	1	0,02
7	1	0,007
8	1	0,013
9	1	0,039

Figura 4.32. Nuovi campi in una tabella degli attributi.

In seguito sono stati rimossi i poligoni con area minore di 0.5 ha (non adatti ad una coltivazione redditizia), tramite selezione delle aree utili e creazione di un nuovo vettoriale.

All'interno dello shapefile del periodo 7 (Agosto-Novembre) è stato necessario rimuovere una piccola zona presso Ravenna a causa di nuvole che potevano alterare il risultato (per il mese di Novembre non erano disponibili immagini satellitari prive di nuvole). Le immagini seguenti raffigurano le mappe dei suoli nudi per tre mesi consecutivi, calcolati considerando complessivamente un periodo di quattro mesi (Figg. 4.33-4.39).

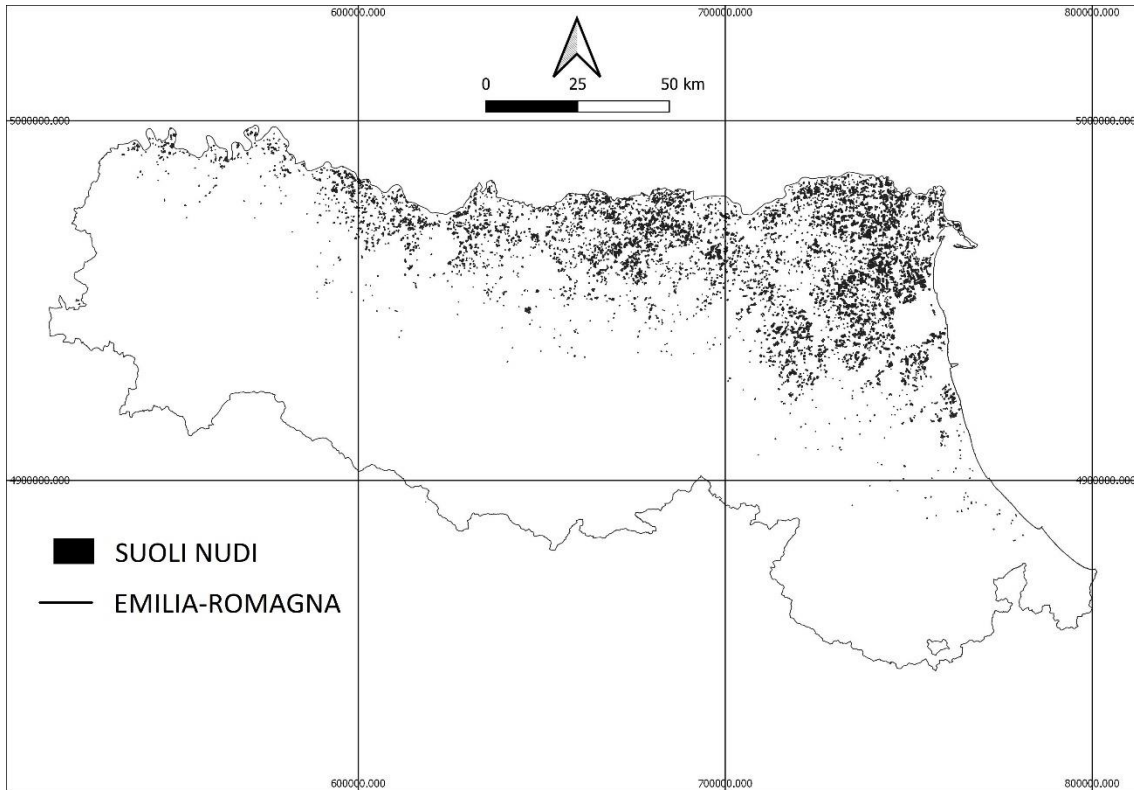


Figura 4.33. Mappa dei suoli nudi per il periodo 1 (Febbraio-Maggio).

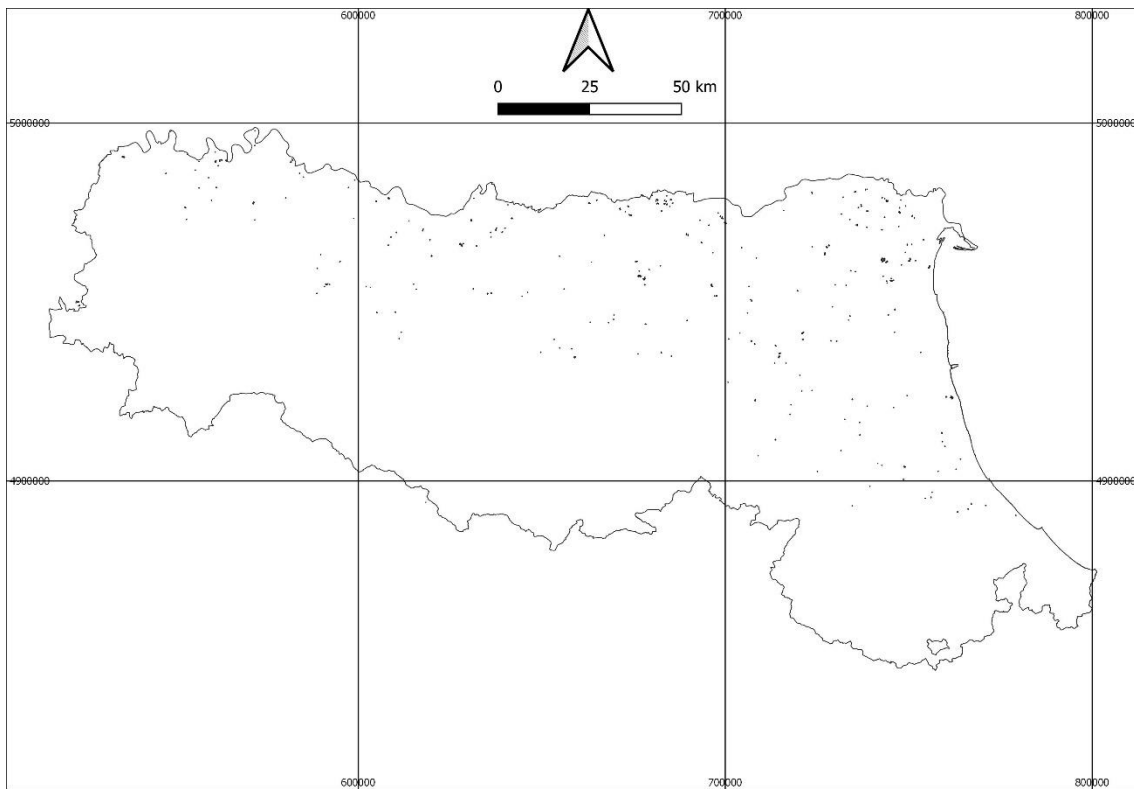


Figura 4.34. Mappa dei suoli nudi per il periodo 2 (Marzo-Giugno).

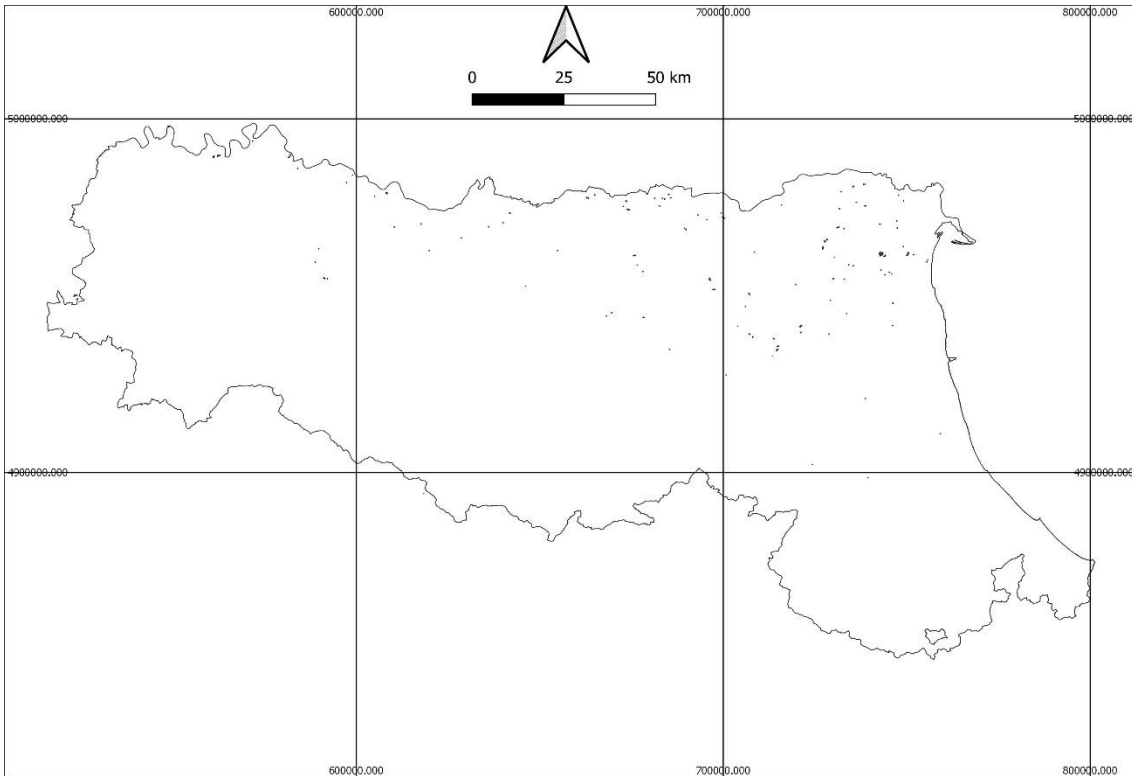


Figura 4.35. Mappa dei suoli nudi per il periodo 3 (Aprile-Luglio).

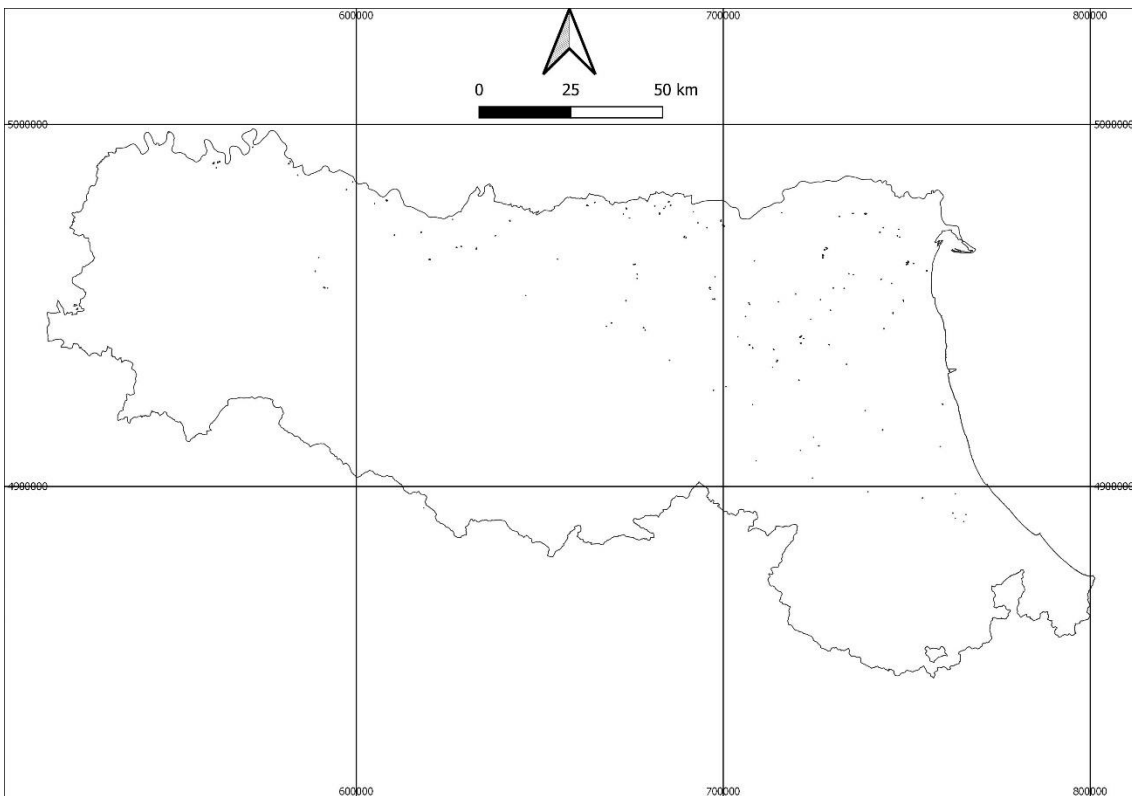


Figura 4.36. Mappa dei suoli nudi per il periodo 4 (Maggio-Agosto).

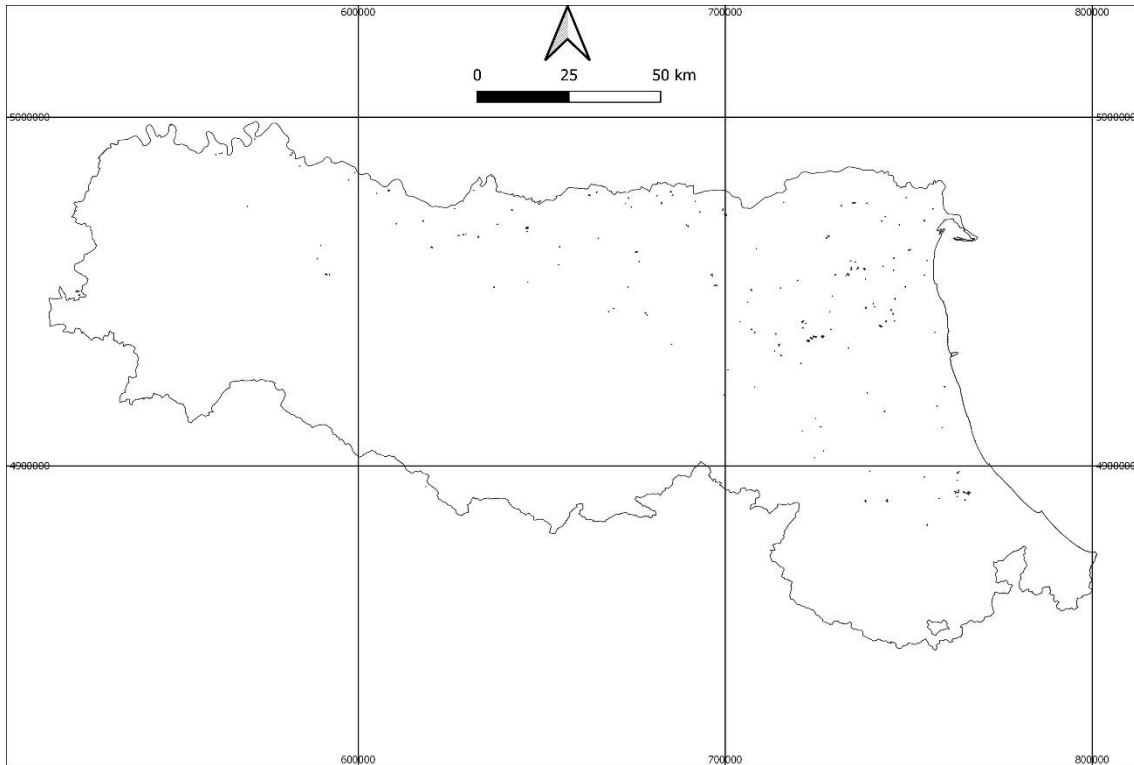


Figura 4.37. Mappa dei suoli nudi per il periodo 5 (Giugno-Settembre).

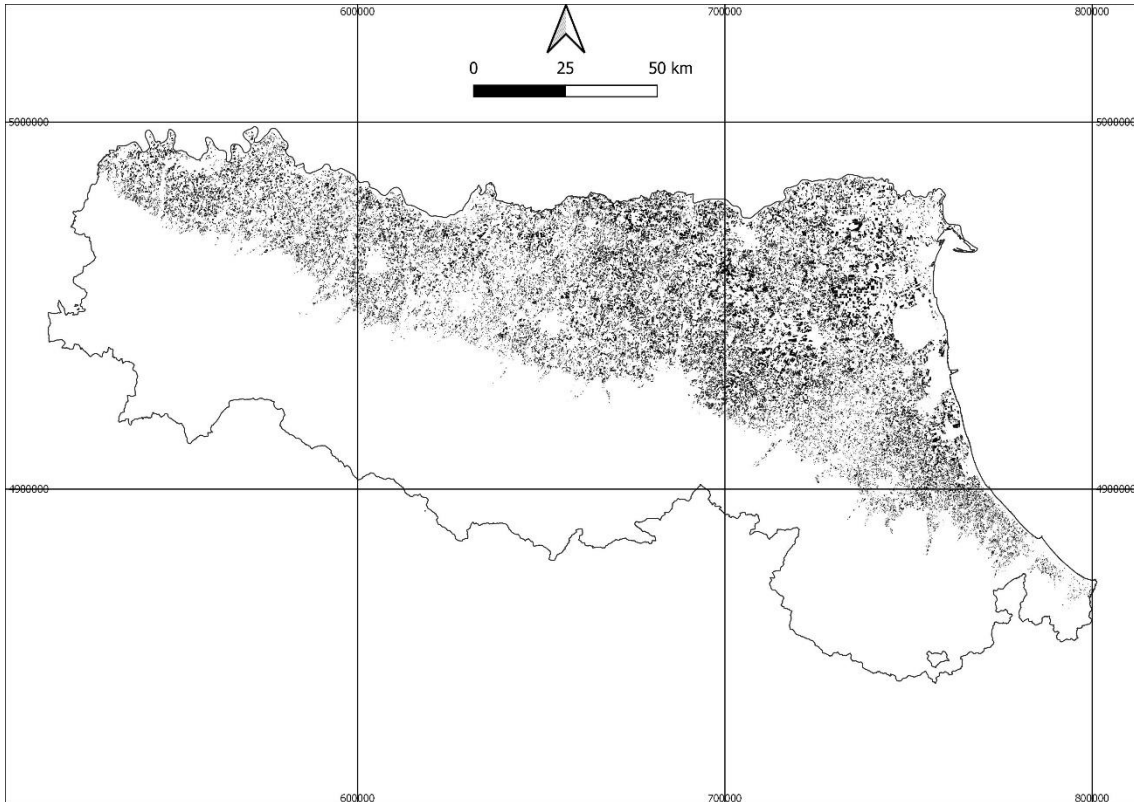


Figura 4.38. Mappa dei suoli nudi per il periodo 6 (Luglio-Ottobre).

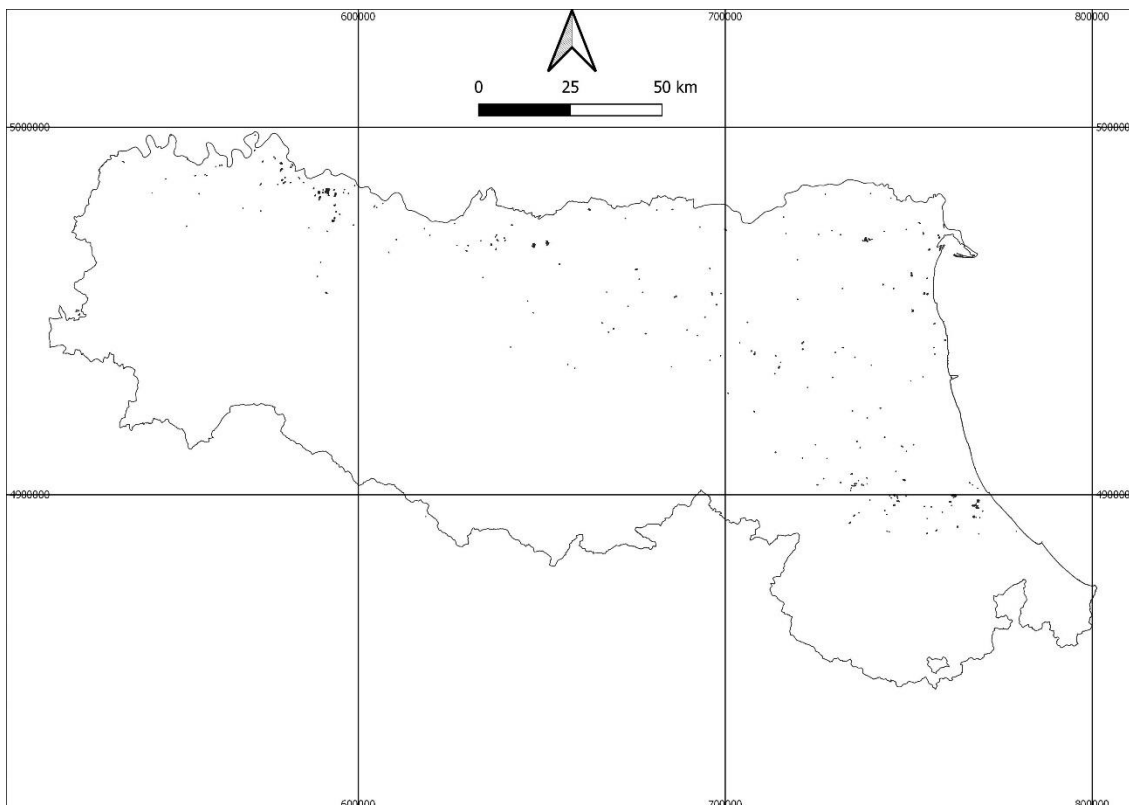


Figura 4.39. Mappa dei suoli nudi per il periodo 7 (Agosto-Novembre).

e) Statistiche sulle aree

I file vettoriali sono stati salvati anche nel formato XLSX, per poter effettuare calcoli tramite il programma Microsoft Excel (Fig. 4.40).

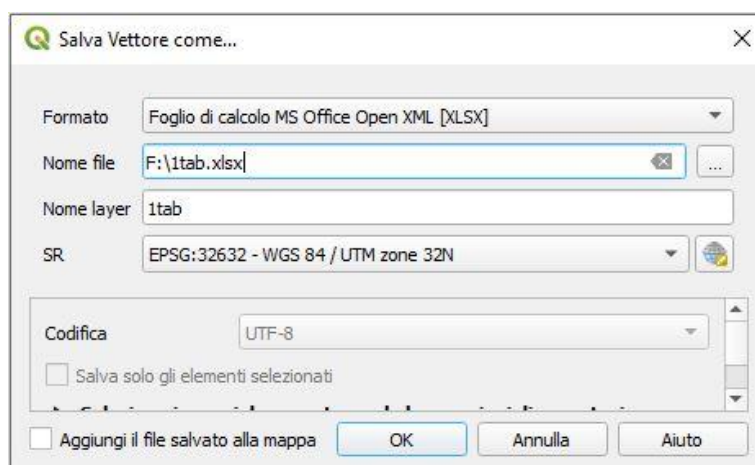


Figura 4.40. Vettoriale esportato come file di Excel.

I periodi 2, 3, 4, 5 e 7 presentano scarsità di suoli nudi: infatti le percentuali delle superfici di suolo nudo sulla superficie totale coltivata dell'area pianeggiante risultano rispettivamente 0,07%, 0,03%, 0,03%, 0,05% e 0,08%. I periodi con più suoli nudi, quindi più promettenti, risultano essere il primo (1: febbraio-maggio) e il sesto (6: luglio-ottobre): infatti hanno percentuali di suolo nudo sulla superficie totale coltivata rispettivamente del 3,86% e del 25,54%. Se si rapportano le superfici di suolo nudo con la superficie totale delle sole colture di interesse (vedi Paragrafo 4.1), le percentuali salgono a 4,17% e 27,54%. Questo risultato è verosimile perché i terreni nudi del primo periodo possono essere in attesa della semina di colture estive e quelli del sesto periodo possono essere il risultato della raccolta dei cereali invernali.

Sono state ricavate le statistiche riguardanti le aree di suolo nudo dei periodi 1 e 6. Nel primo, la somma delle aree corrisponde a 31116 ha e l'area media a 3,46 ha; nel sesto, la somma delle aree equivale a 205730 ettari e l'area media a 5,60 ettari. Le aree sono state classificate come piccole, medie o grandi considerando le aree piccole inferiori a 1 ha, quelle medie comprese tra 1 e 3 ha e quelle grandi maggiori di 3 ha. Dagli istogrammi di Excel si nota come prevalgano aree medie nel primo periodo e grandi nel sesto (Figg. 4.41-4.42).



Figura 4.41. Istogramma del primo periodo.

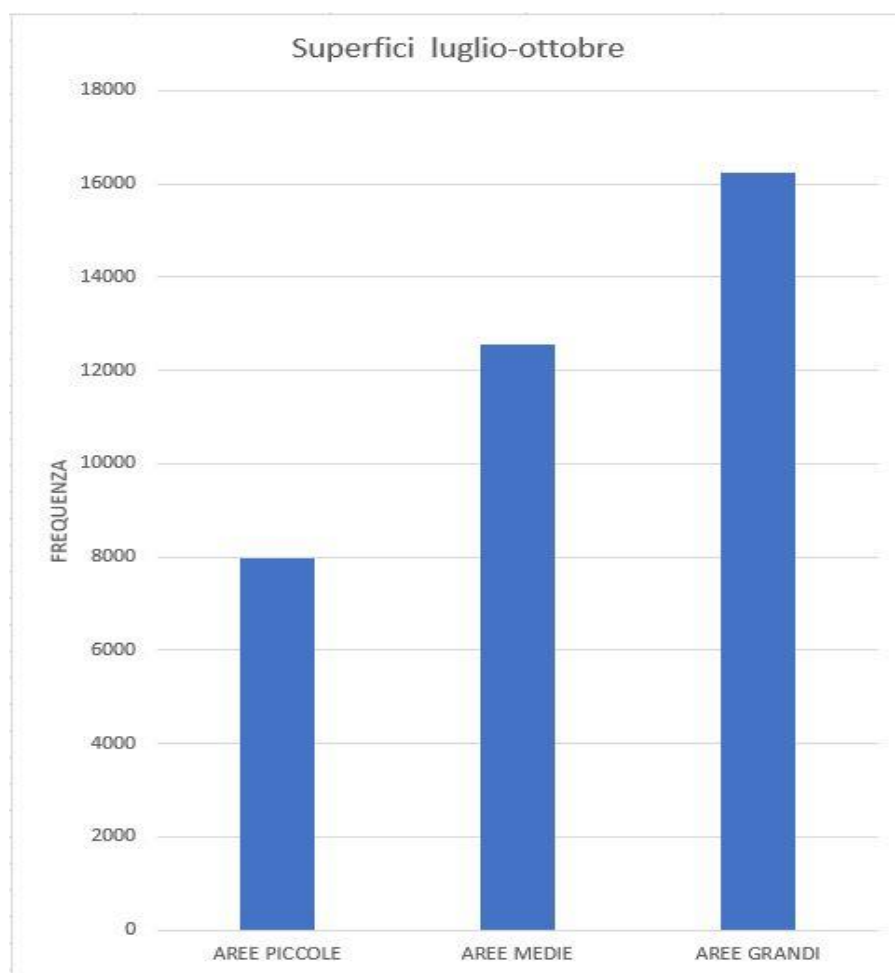


Figura 4.42. Istogramma del sesto periodo.

Sia nel periodo 1 che nel 6, le aree piccole, medie e grandi di suolo nudo risultano essere equamente distribuite all'interno della zona di interesse (Figg. 4.43-4.48).

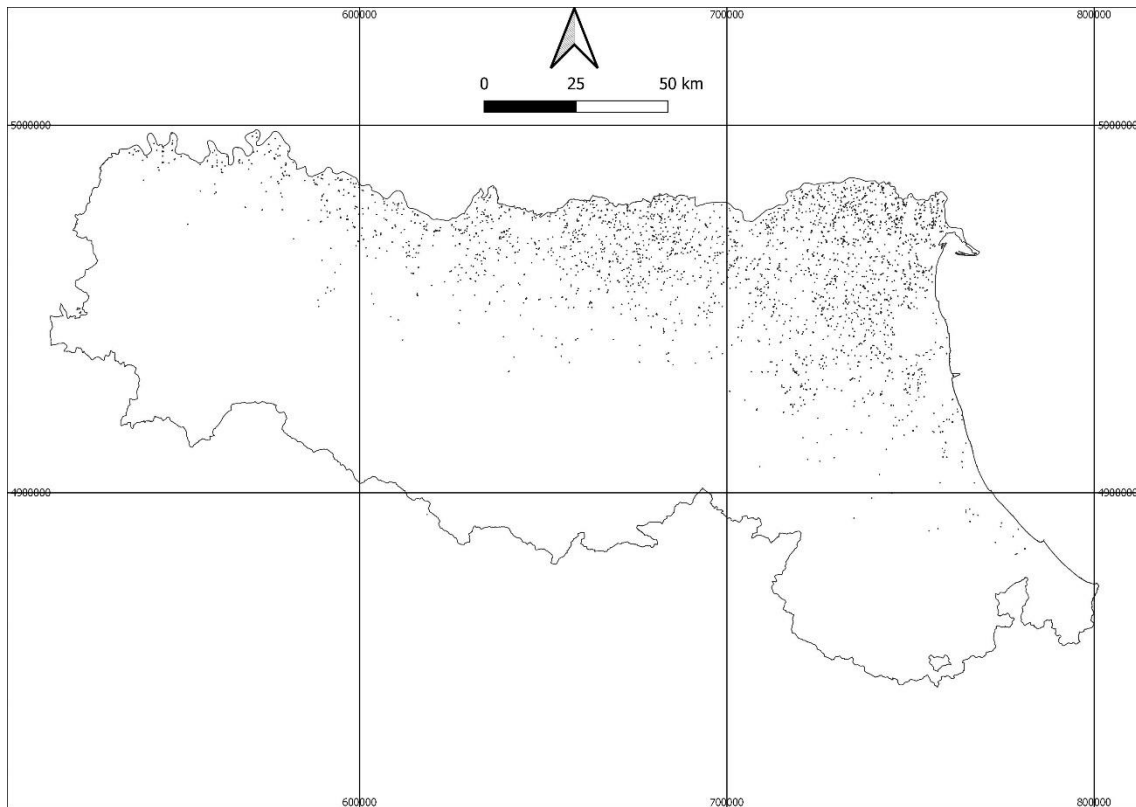


Figura 4.43. Aree piccole del primo periodo.

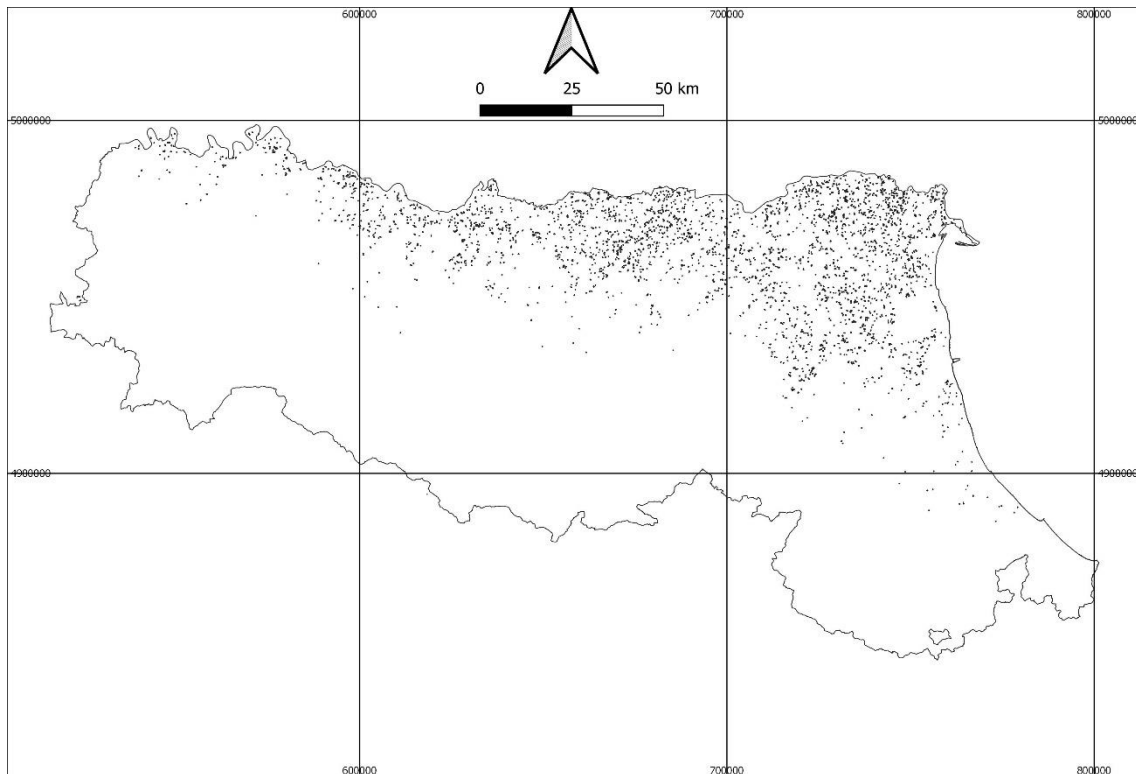


Figura 4.44. Aree medie del primo periodo.

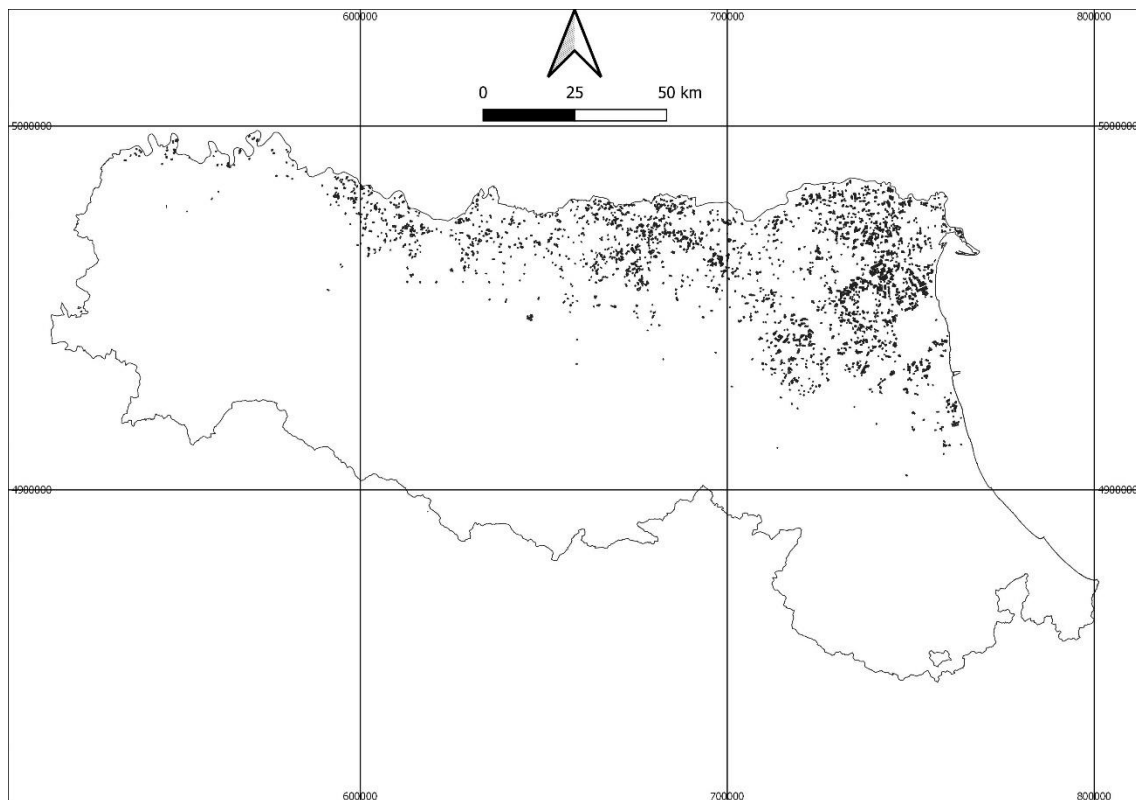


Figura 4.45. Aree grandi del primo periodo.

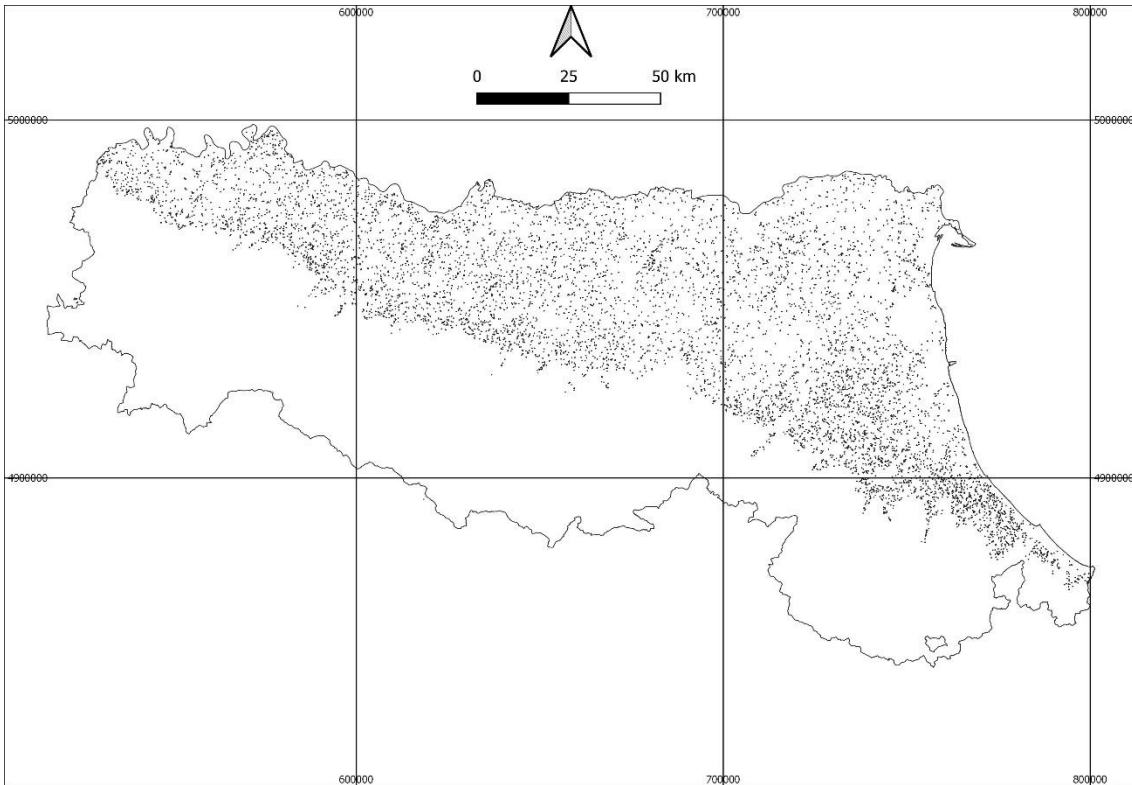


Figura 4.46. Aree piccole del sesto periodo.

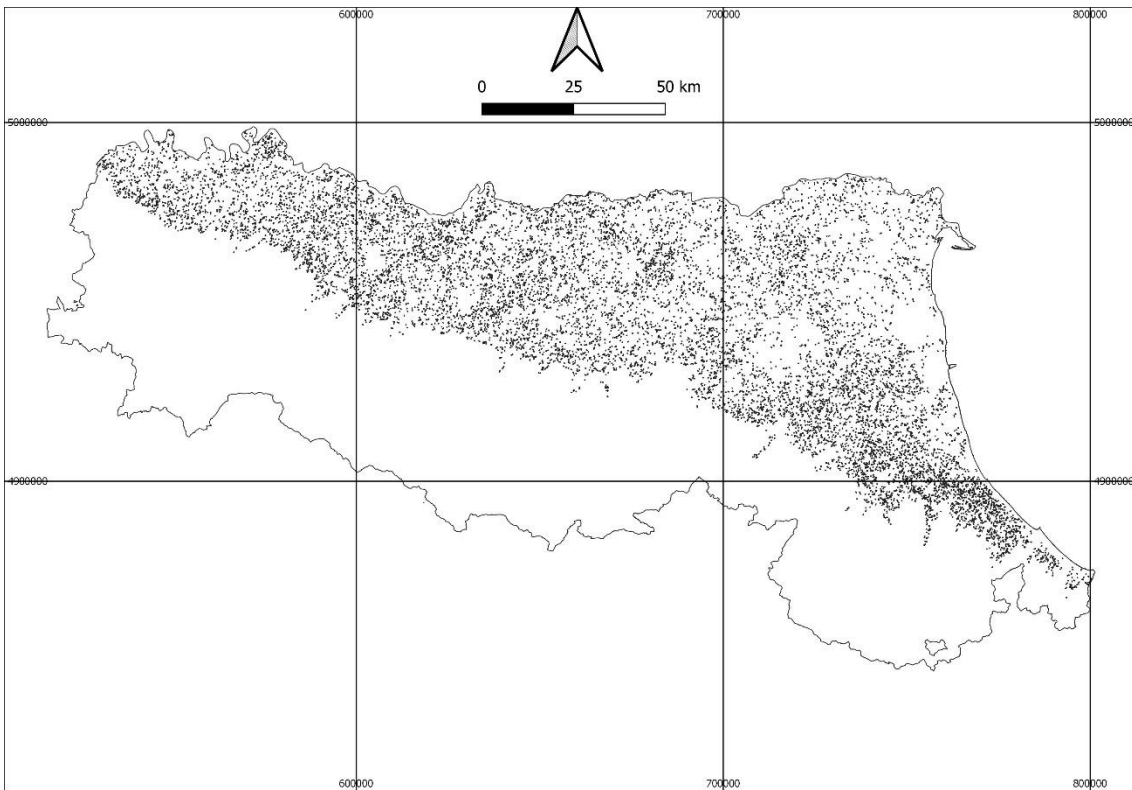


Figura 4.47. Aree medie del sesto periodo.

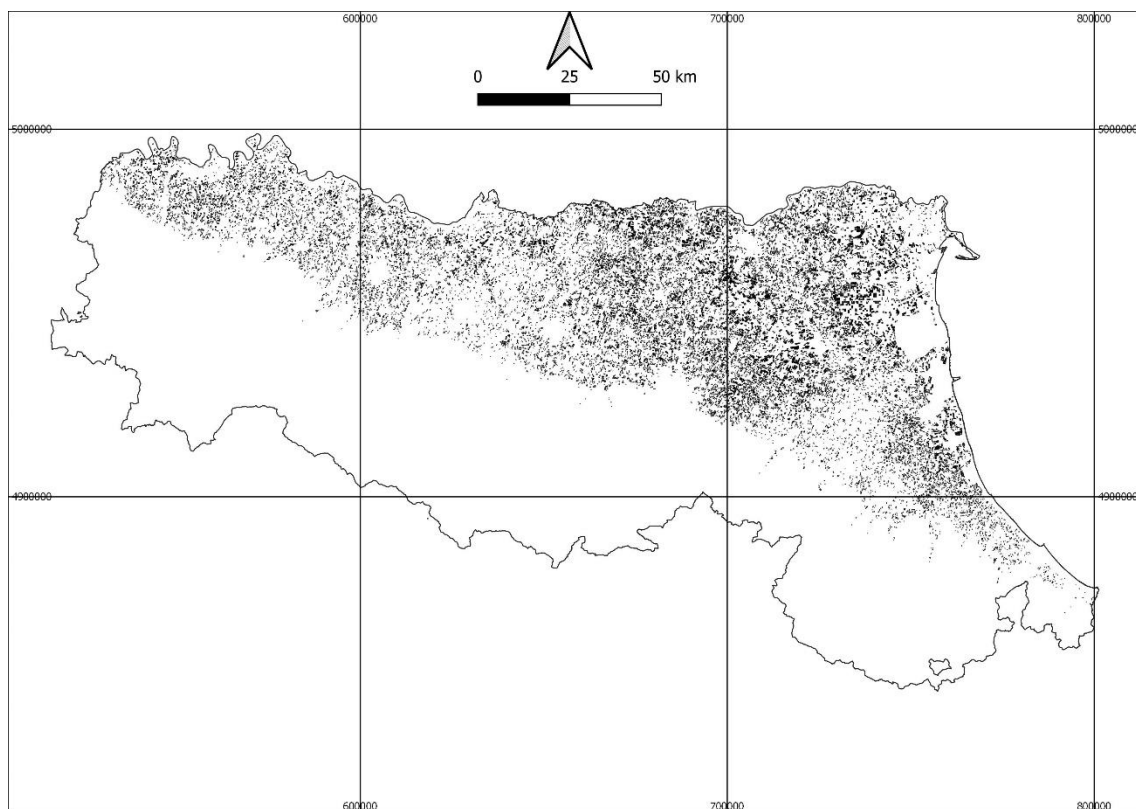


Figura 4.48. Aree grandi del sesto periodo.

Le aree piccole, inferiori a 1 ettaro, sono state rimosse perché poco utili per una ipotetica utilizzazione dei terreni (Figg. 4.49-4.50); di conseguenza, le superfici totali di suolo nudo sono diventate rispettivamente 29133 ettari per il periodo 1 e 200023 per il periodo 6; le percentuali di suolo nudo sull'area totale delle colture di interesse sono diventate rispettivamente 3,9% per il primo periodo e 26,77% per il sesto: la diminuzione è stata quindi molto scarsa.

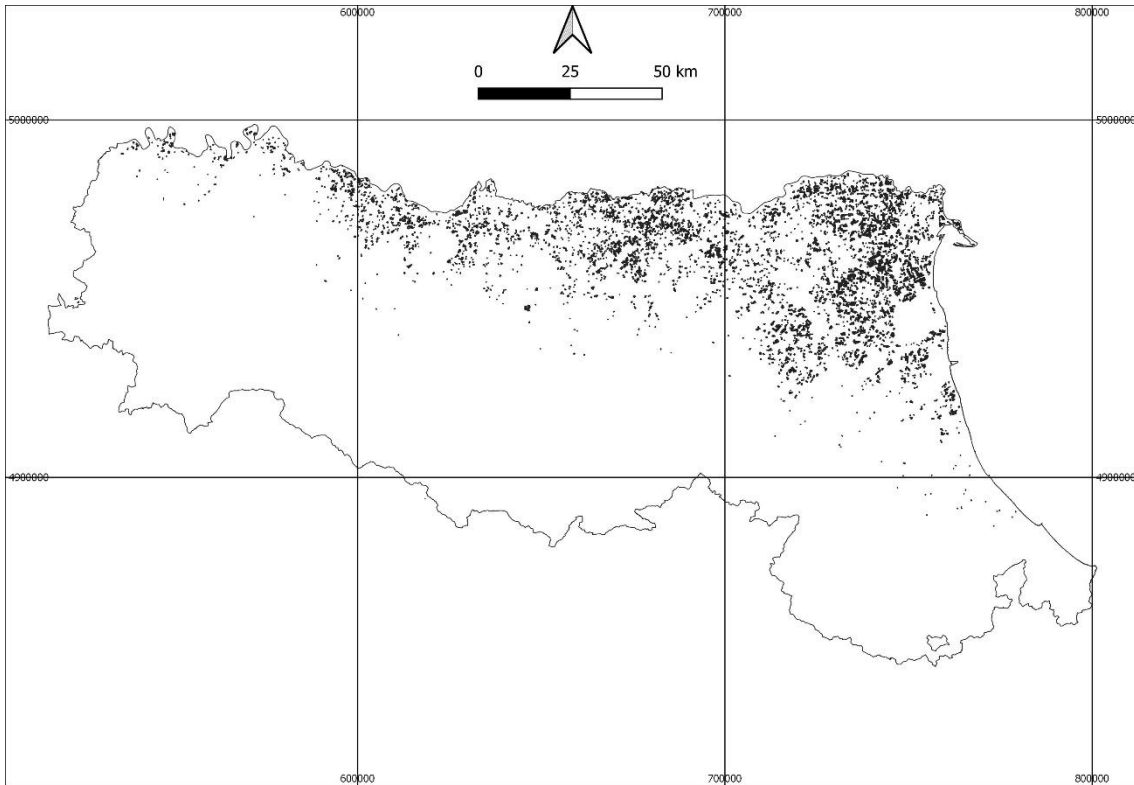


Fig. 4.49. Periodo 1 senza le aree piccole.

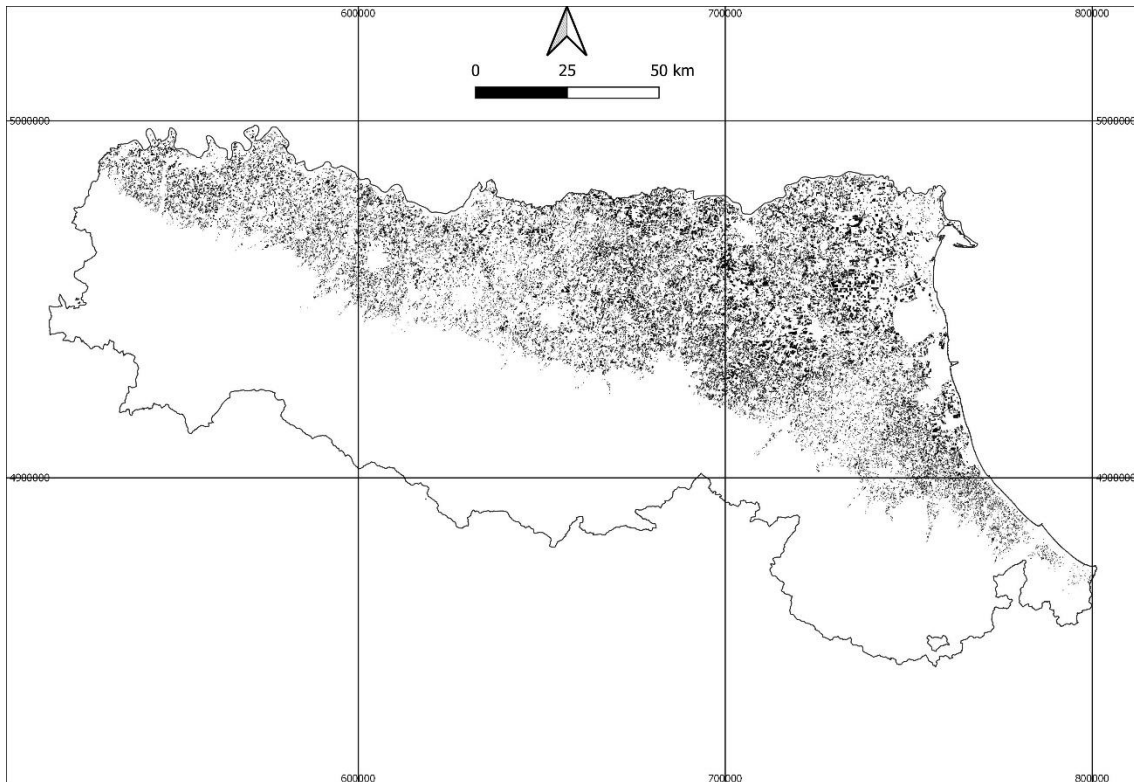


Fig. 4.50. Periodo 6 senza le aree piccole.

f) Validazione

Metodo I: confronto con i dati AGREA-CER su base catastale

Le informazioni riguardanti codice, coltivazione e area delle relative particelle catastali contenenti le colture di interesse (verità a terra), riportate nello shapefile della carta dell'uso del suolo, sono state aggiunte ai poligoni dei suoli nudi dei periodi 1 e 6 (Fig. 4.51).

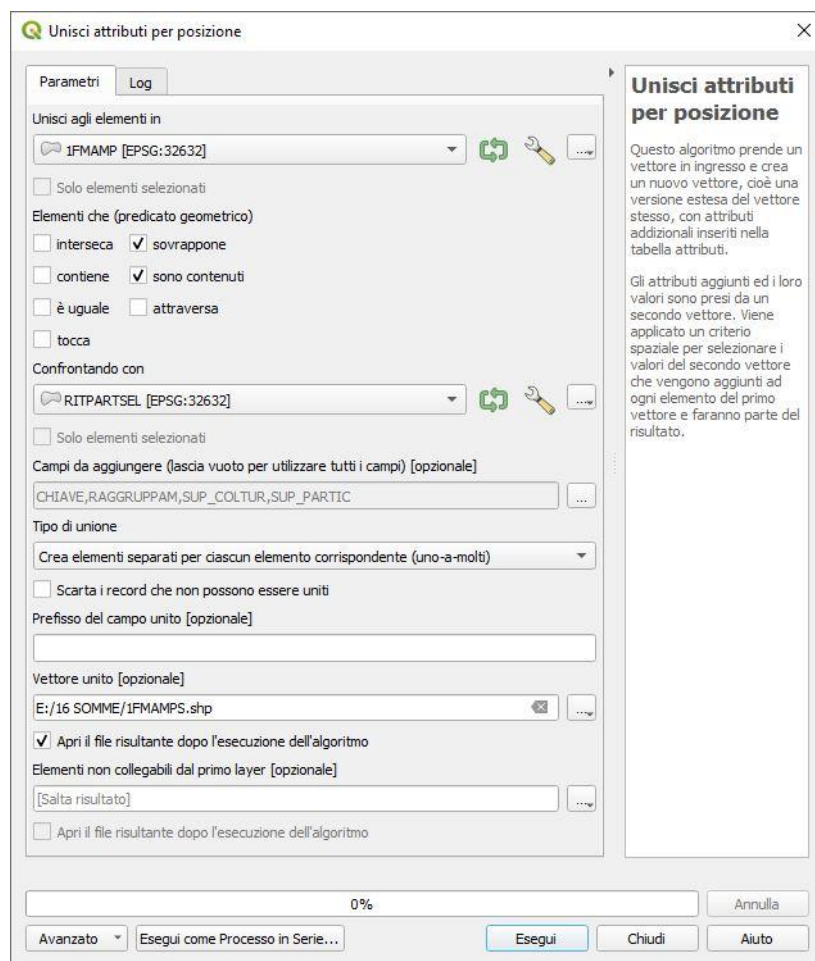


Fig. 4.51. Aggiunta dei dati colturali agli shapefile dei suoli nudi.

I vettoriali risultanti sono stati esportati come file di Excel e sono state ricavate le statistiche sulle colture dichiarate ricadenti nelle aree di suolo nudo del primo e del sesto periodo (Figg. 4.52-4.53).



Fig. 4.52. Colture più frequenti ricadenti nei suoli nudi del periodo 1.

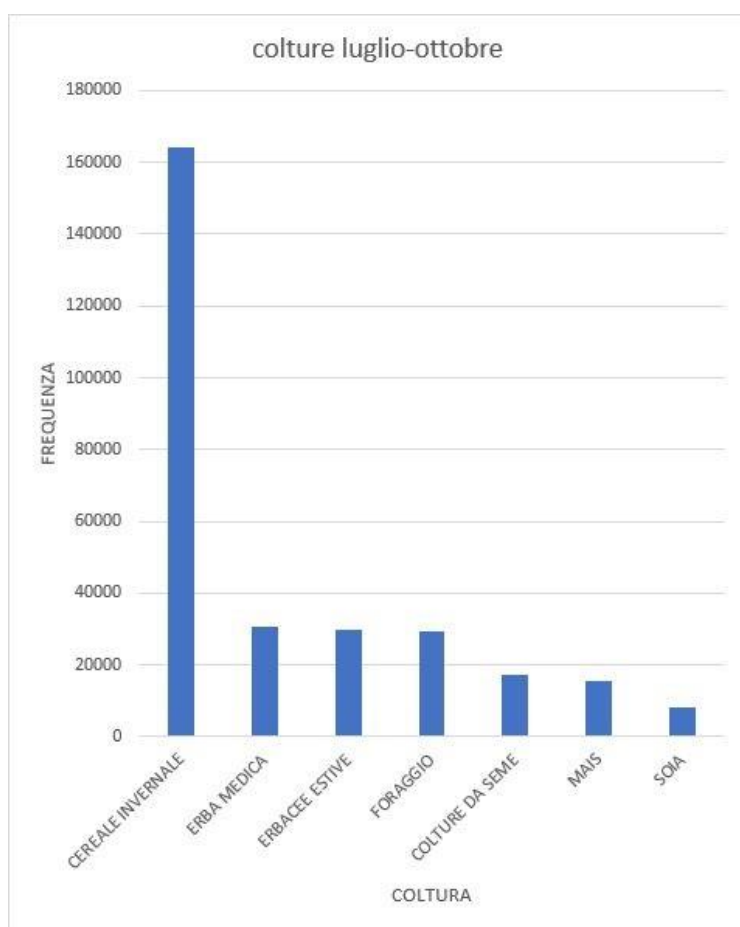


Fig. 4.53. Colture più frequenti ricadenti nei suoli nudi del periodo 6.

Spesso il suolo nudo occupava solo una piccola parte della particella, che in quel momento era quindi per gran parte della sua superficie coltivata: si sono quindi riscontrati casi nei quali al suolo nudo sono state associate colture che non potevano essere assenti in quel periodo, come nei casi delle particelle con cereali invernali nel primo periodo o con colture estive nel sesto periodo. Ciò può essere causato da piccole parti della particella in cui le piante non sono cresciute (Fig. 4.54) o da parti minori della particella dedicate ad una diversa coltura (Fig. 4.55). Pertanto nei grafici precedenti non saranno considerati il cereale invernale per il primo periodo e le colture diverse dal cereale invernale per il sesto periodo.

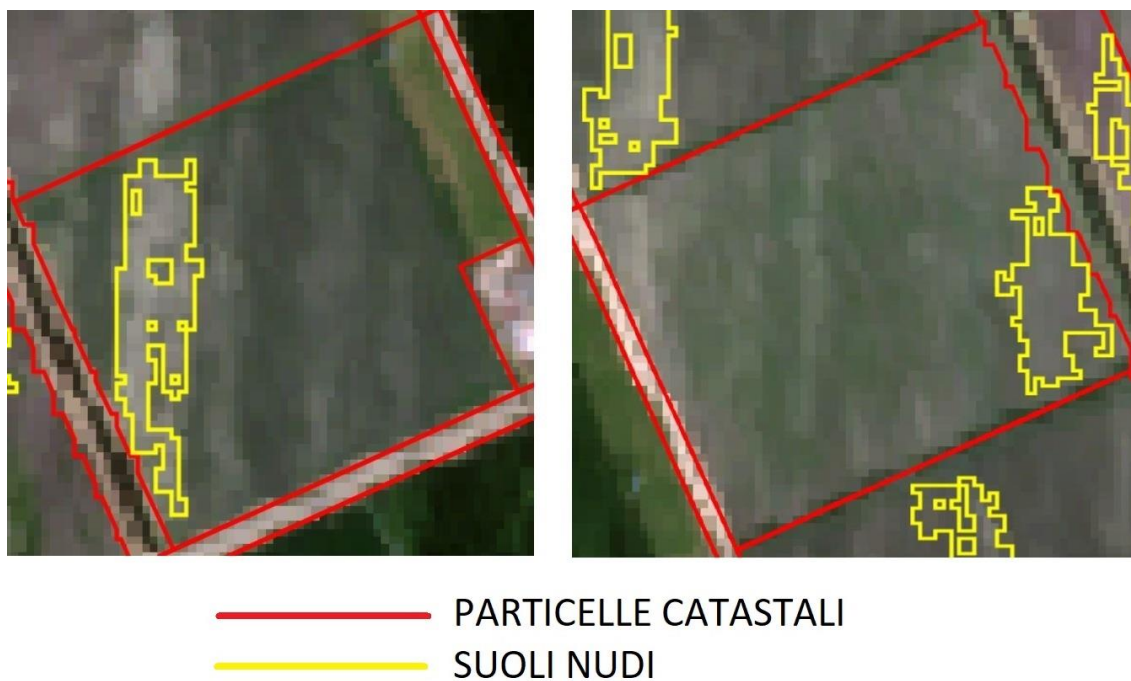


Figura 4.54. Esempi di terreni coltivati con piccole zone di suolo nudo. Visualizzazione con SNAP.

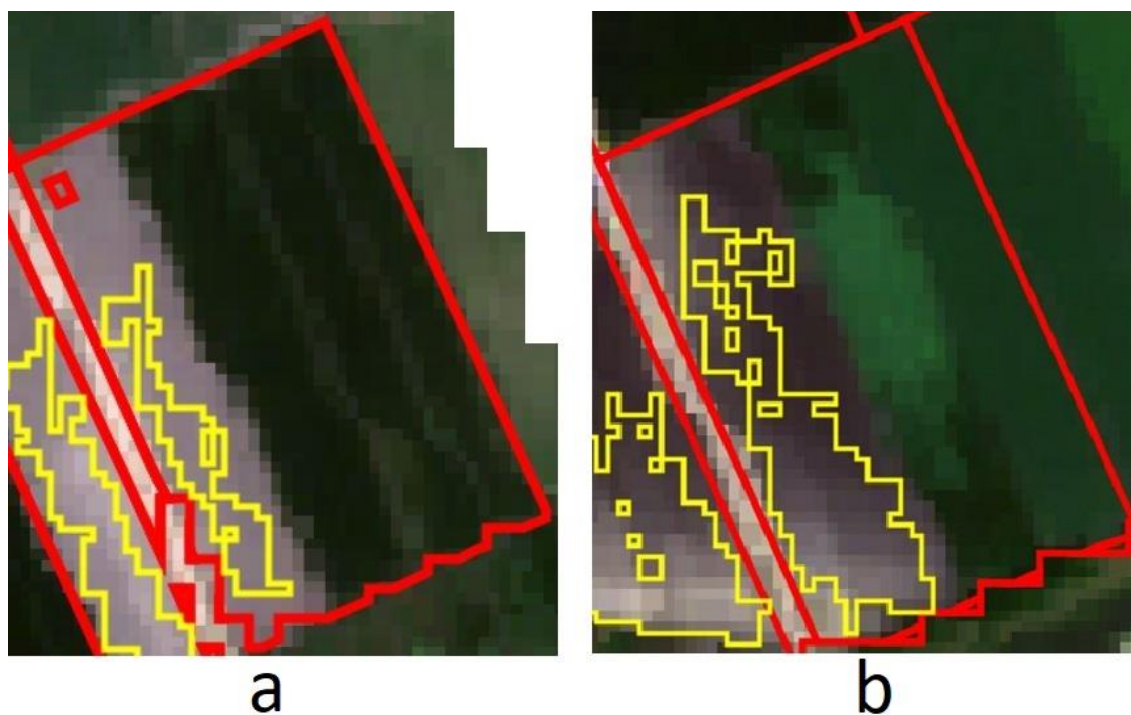


Fig. 4.55. Esempi di particelle con parti minori di suolo nudo.

Nella figura 4.55a, riferita al periodo febbraio-maggio, la particella contiene principalmente cereale invernale (che è sul campo in quel periodo, a dx), ma secondo i dati catastali ha anche una parte coltivata a soia, che è una coltura estiva (assente in quel periodo) quindi giustifica la presenza del suolo nudo. La particella di Fig. 4.55b è coltivata principalmente a cereale invernale, ma tra le colture dichiarate ha anche pisello, fagiolino e orticole (colture estive), che giustificano la presenza del suolo nudo.

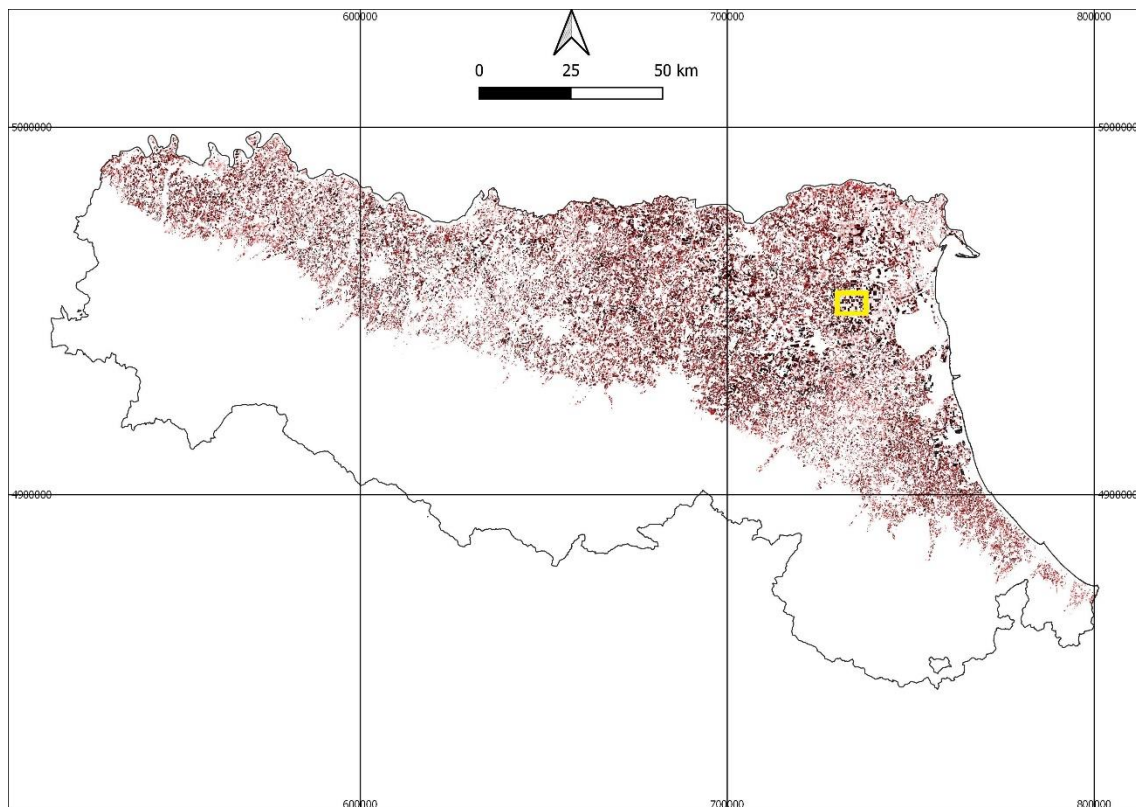
In altri casi, un terreno poteva essere quasi interamente nudo ma con tracce di vegetazione sui bordi o in piccole zone (Fig. 4.56).



Fig. 4.56. Esempio di terreno nudo con tracce di vegetazione.

Metodo II: confronto con dati relativi alle colture cereali-vernine

È stata effettuata una validazione basata sull'ipotesi che, per considerare corretto il risultato, i terreni con colture invernali debbano risultare nudi nel periodo estivo luglio-ottobre. Pertanto, le particelle coltivate a cereali invernali (frumento duro e tenero, segale, orzo) sono state selezionate ed esportate come nuovo vettoriale. Quindi lo shapefile dei suoli nudi del periodo 6 è stato tagliato seguendo il vettoriale delle colture invernali (Fig. 4.57) ed è stato creato un campo della tabella degli attributi con le nuove aree. Tramite Excel, l'area dei suoli nudi rilevati dai satelliti è stata confrontata con l'area dei terreni che in base ai dati catastali avrebbero dovuto essere nudi. La percentuale di sovrapposizione, che dovrebbe tendere al 100%, è risultata del 72,7%. In alcuni casi gli appezzamenti a colture invernali possono essere sfruttati per una seconda coltura estiva irrigua e non risultare come nudi nei mesi successivi. Questo può giustificare una parte della percentuale mancante. Nella figura 4.58 vi sono due particelle con cereale invernale come coltura dichiarata, che tuttavia non figurano tra i suoli nudi del periodo 6. Anche dalla foto satellitare di agosto si vede che è presente copertura vegetale, quindi presumibilmente vi sono delle seconde colture estive.



SUOLI NUDI
 PARTICELLE



Fig. 4.57. Shapefile del periodo 6 tagliato e sovrapposto alle particelle delle colture invernali, con dettaglio della sovrapposizione.

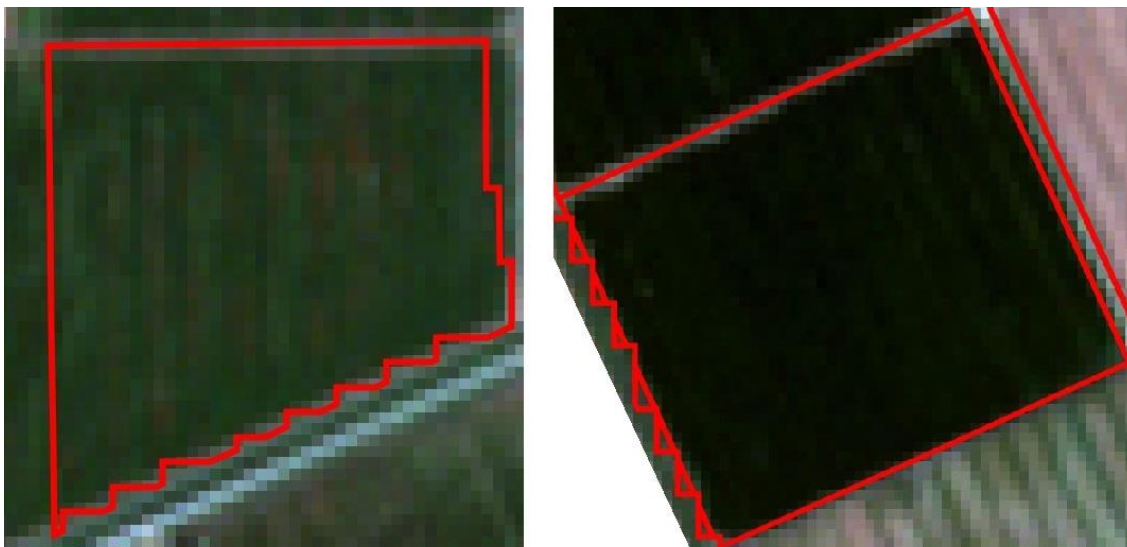


Fig. 4.58. Particelle dichiarate a cereale invernale con copertura nel periodo 6.

Metodo III: confronto con i dati ARPAE

È stata gentilmente fornita da ARPAE una serie di dati colturali ottenuti tramite rilevamenti sul campo effettuati tra 2020 e 2021 nella pianura dell'Emilia-Romagna. Essa consiste in una serie di fotografie di circa 900 terreni della zona, accompagnate dagli shapefile contenenti le posizioni dei terreni e le informazioni sul loro utilizzo nelle date degli scatti. Parte degli scatti è stata effettuata tra febbraio e aprile 2021, quindi nel periodo 1. Perciò si possono confrontare questi dati con quelli ricavati nel procedimento. Sono stati selezionati nel vettoriale di quel periodo (Fig. 4.59) i terreni identificati dalle fotografie come suoli nudi ed è stato creato un nuovo shapefile (Fig. 4.60). Su questo è stato tagliato lo shapefile dei suoli nudi individuati dal satellite nel periodo 1 ed è stato creato un campo con le nuove aree. I due shapefile sono stati esportati come file Excel. La percentuale di sovrapposizione (Fig. 4.61), che dovrebbe tendere a 100%, risulta del 27,6%. Questo può essere dovuto alla relativa scarsità di campioni (che fa diminuire la probabilità di coincidenza) e/o alla sottostima di cui al Paragrafo 4.2.a.

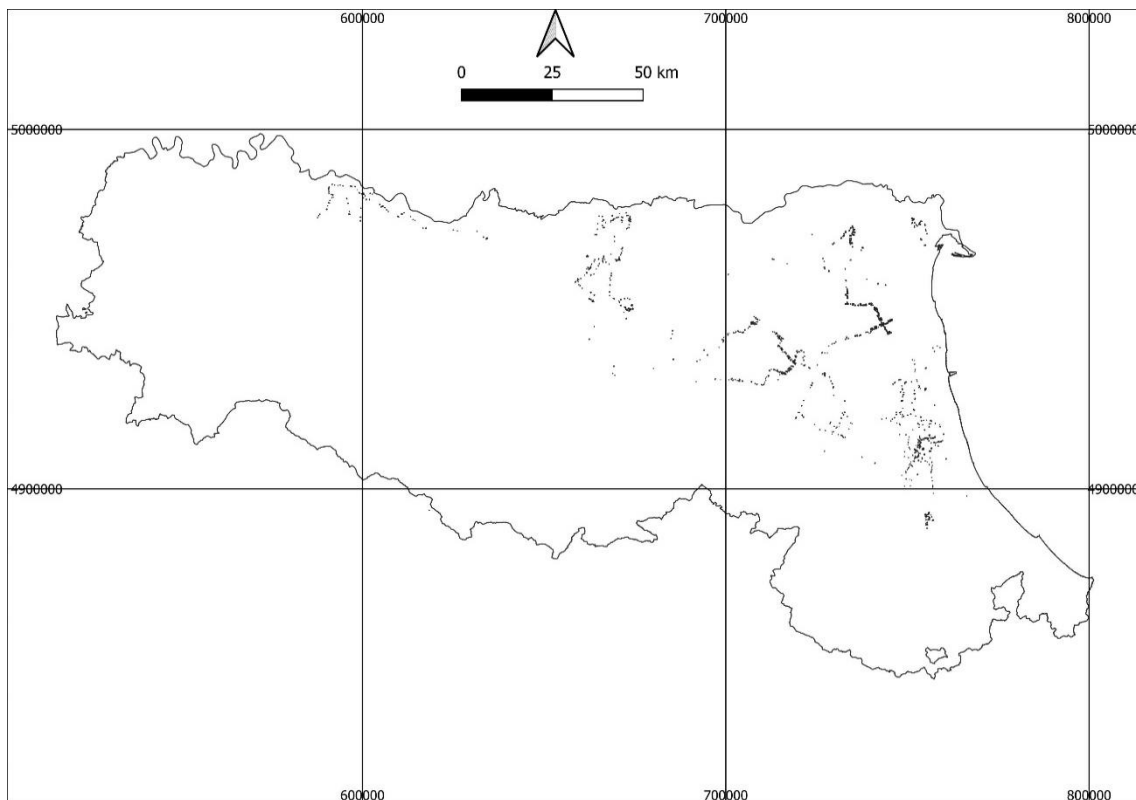


Figura 4.59. Terreni fotografati da ARPAE nel periodo 1.

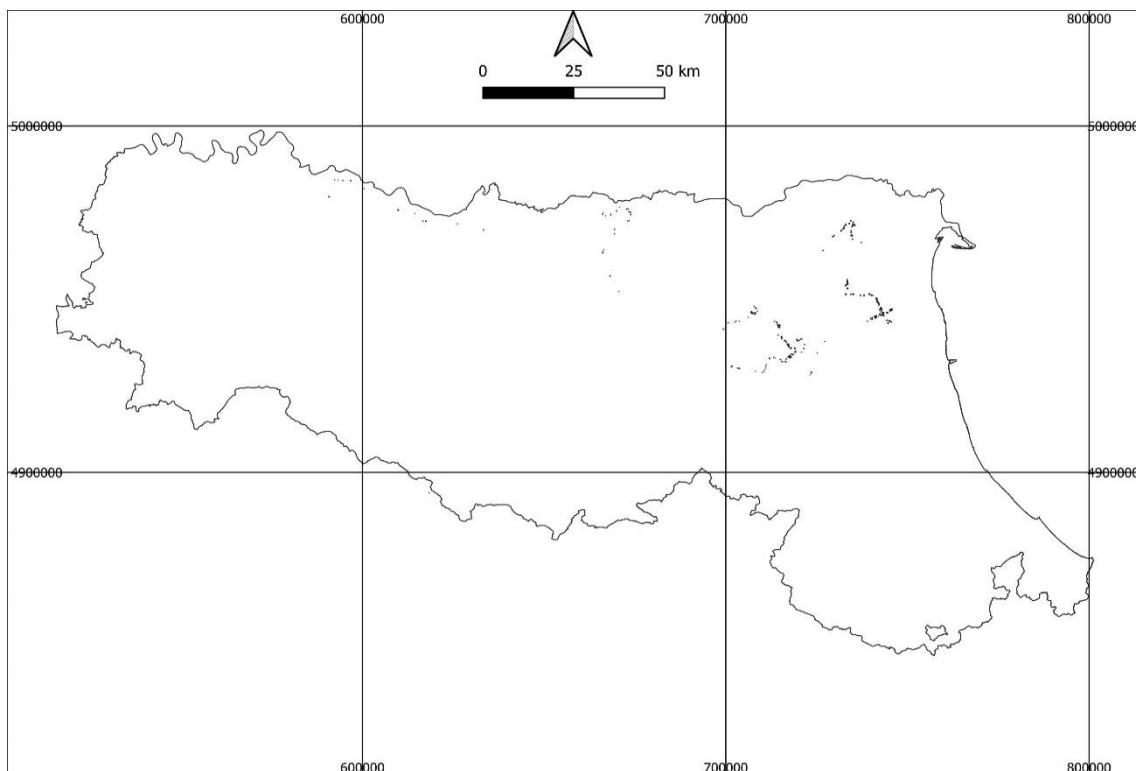


Figura 4.60. Suoli nudi identificati da ARPAE dalle foto del periodo 1.

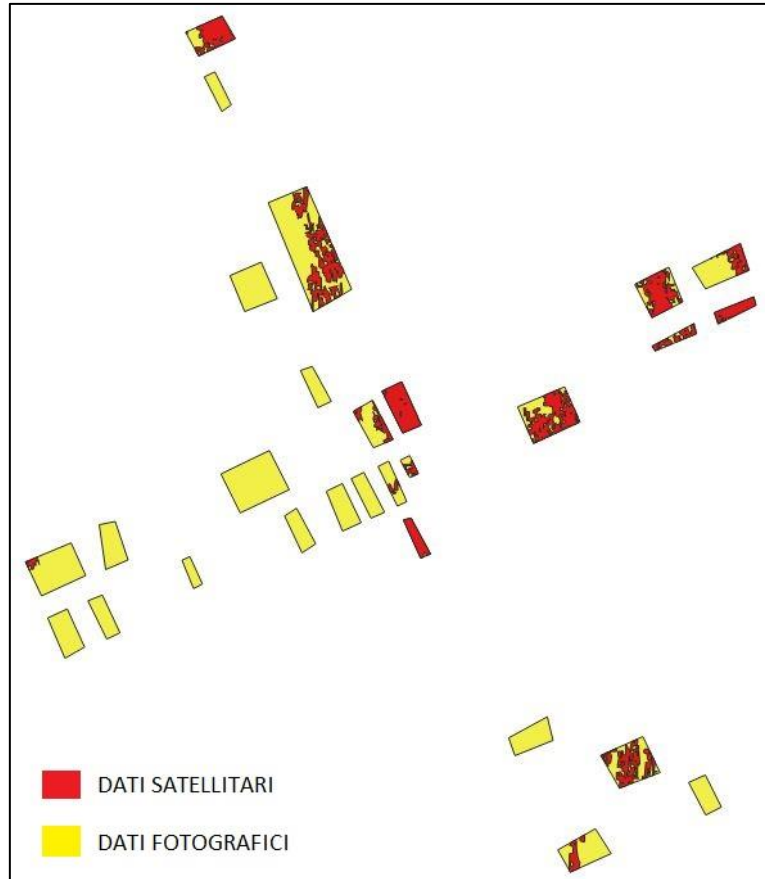


Figura 4.61. Dettaglio della sovrapposizione dei suoli nudi individuati dal satellite e sul campo.

CAPITOLO 5 – Possibili impieghi dei suoli nudi

5.1 – Biomasse

I suoli nudi tra due colture perdono i nutrienti per dilavamento, non producono biomassa (mancata efficienza), potrebbero essere ottimizzati per aumentare la sostanza organica nei suoli e per produrre biomassa. Per non lasciare i suoli privi di copertura tra due colture principali, se il tempo è sufficiente, si possono utilizzare colture intercalari (coltivazioni da reddito a rapido sviluppo), colture di copertura (non destinate alla raccolta ma al miglioramento della fertilità del suolo) o colture da sovescio (piante raccolte e interrate al fine di aumentare la fertilità del terreno tramite incremento di sostanza organica)⁷⁰. Nel nostro caso prenderemo in considerazione l'ipotesi di introdurre delle colture intercalari, coltivando specie rustiche atte ad ottenere biomasse destinate alla produzione di energia. Le piante raccolte possono dare origine a diversi biocarburanti (combustibili di derivazione vegetale) in seguito a vari tipi di trattamento. Questo riutilizzo sostenibile del territorio porterebbe un aumento della fertilità dei terreni (vedi Paragrafo 1.2) e una riduzione dell'inquinamento dell'aria derivata dalla sostituzione dei combustibili fossili con carburanti da fonti rinnovabili. Questi ultimi hanno emissioni nocive (anidride carbonica, particolato, ossidi di azoto) più basse rispetto ai carburanti tradizionali: ad esempio, il biometano ha emissioni di anidride carbonica inferiori del 20% rispetto a quelle della benzina⁷¹.

Le piante convertono l'energia solare in energia chimica tramite la fotosintesi, quindi le biomasse vegetali (materiali derivati dalle piante) contengono energia che può essere estratta attraverso una conversione che può essere di tre tipi: termochimica, biologica o fisica.

La conversione termochimica utilizza il calore e comprende i processi di combustione, pirolisi e gassificazione. La combustione converte l'energia chimica delle biomasse in

⁷⁰ www.blogincampo.it/informazioni_tecniche/articolo.asp?id=47

⁷¹ Comitato Termotecnico Italiano, "Biometano", 2005

calore tramite una reazione di ossidazione del carbonio con l'ossigeno che restituisce anidride carbonica e calore; richiede biomasse essiccate prive di umidità. La pirolisi permette di ottenere combustibili dalle biomasse tramite una parziale combustione applicando calore in carenza di ossigeno; i prodotti possono essere solidi, liquidi o gassosi (carbone vegetale, bio-olio o gas) a seconda che il processo sia prolungato, breve o medio. La gassificazione converte le biomasse in combustibili gassosi tramite calore elevato e carenza di ossigeno che provocano un'ossidazione incompleta; si ottiene un gas costituito da azoto, metano, idrogeno e monossido di carbonio, chiamato "syngas", ma si può ottenere anche idrogeno puro.

La conversione biologica utilizza processi biochimici e comprende fermentazione alcolica e digestione anaerobica. La fermentazione alcolica converte gli zuccheri delle biomasse in alcol etilico, un combustibile liquido chiamato anche "etanolo"; possono essere convertiti anche gli amidi precedentemente trasformati in zuccheri tramite reazioni; la fermentazione restituisce una miscela di alcool e acqua, che devono essere separati tramite distillazione. La digestione anaerobica è un processo di degradazione batterica delle biomasse che genera gas combustibili; la biomassa viene decomposta per idrolisi e deidrogenazione restituendo prima acido acetico e acido formico, poi metano e anidride carbonica.

La conversione fisica consiste nel ricavare olio combustibile dalla spremitura meccanica di granella ricca di olio; si possono anche aggiungere processi di estrazione chimica mediante solventi per aumentare la resa; l'olio può essere trattato per ottenere altri prodotti; i pannelli di granella spremuta possono servire come mangime⁷².

⁷² Candolo G., Meriggi P., "Le biomasse vegetali, tante energie da coltivare", *L'Informatore Agrario*, 2006, n. 1, pp. 30-34

5.1.1 - Biocarburanti

Le biomasse derivanti da colture dedicate vengono impiegate in quattro filiere principali: biodiesel, bioetanolo, biogas e biocombustibili. Questi prodotti possono servire per alimentare autotrazione, impianti di riscaldamento, produzione di elettricità o di calore.

Il biodiesel è un biocarburante liquido derivato dal trattamento dell'olio vegetale ottenuto per spremitura da colture oleaginose, ovvero contenenti una buona percentuale di olio. L'olio depurato viene sottoposto a transesterificazione, ovvero viene fatto reagire con alcool metilico per ottenere estere metilico (Fig. 5.1). Il biodiesel può alimentare motori Diesel di veicoli o impianti di riscaldamento, sostituendo totalmente o parzialmente il gasolio derivato dal petrolio. Può essere utilizzato anche l'olio vegetale puro, più economico, su motori o impianti adattati.



Fig. 5.1. Impianto per la produzione di biodiesel. *Fonte: b-e-net.it/portfolio/biodiesel*

Il bioetanolo è un biocarburante liquido ottenuto da fermentazione alcolica e distillazione di biomasse da colture zuccherino-amidacee o residui colturali e industriali (come paglia

o fusti di piante). Può alimentare motori di veicoli sostituendo totalmente o parzialmente la benzina derivata dal petrolio⁷³.

Successivamente sono comparsi anche i cosiddetti biocarburanti di seconda generazione, quali biodimetil etero e FT-Diesel, ovvero biocarburanti liquidi ricavati da biomasse di colture ligno-cellulosiche o residui agricoli e forestali tramite conversione termochimica o biologica. Possono alimentare motori o impianti sostituendo gasolio o GPL⁷⁴.

I biocombustibili derivano da biomasse di colture ligno-cellulosiche arboree e erbacee o di loro residui di potatura o raccolta. Esse vengono sottoposte a essiccazione, pirolisi o gassificazione e possono produrre calore o energia elettrica tramite combustione o alimentazione di impianti: comprendono legna, pellet, carbone vegetale, bio-olio, syngas.

Il biogas è una miscela di gas, per la maggior parte di metano, derivata dalla digestione anaerobica di biomasse da colture zuccherino-cellulosiche o scarti agricoli o liquami zootecnici o fanghi di depurazione delle acque o rifiuti organici (Fig. 5.2). Può anche derivare da una miscela di diverse materie prime, in questo caso si parla di codigestione. Il biogas purificato diventa biometano e può alimentare motori di veicoli o impianti di riscaldamento sostituendo il metano estratto dal sottosuolo⁷⁵. Il biometano si ottiene rimuovendo dal biogas i componenti indesiderati (umidità, polveri, ammoniaca, acido solfidrico) ed estraendo l'anidride carbonica in modo da ottenere una percentuale di metano superiore al 95%; ciò si effettua tramite assorbimento da parte di altre sostanze o filtrazione⁷⁶.

⁷³ Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto, "Colture energetiche e protezione del suolo", 2010

⁷⁴ Chiaramonti D., "Sono in arrivo i biocarburanti di seconda generazione", *L'Informatore Agrario*, 2011, n. 9, pp. 25-28

⁷⁵ Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto, "Colture energetiche e protezione del suolo", 2010

⁷⁶ Mezzadri M., "Come si ottiene il biometano raffinando il biogas", *L'Informatore Agrario*, 2014, n. 24, pp. 43-46



Fig. 5.2. Impianto per la produzione di biogas. Fonte: fulgea.it/efficientamento/biogas

5.2 – *Colture energetiche*

Le colture dedicate alla produzione di energia e biocarburanti sono chiamate “colture energetiche”. Diverse sono le specie di piante adatte a questo scopo: sorgo, mais, barbabietola, frumento, orzo, segale, triticale, soia, girasole, colza, canna, miscanto. Tali colture, per essere convenienti e sostenibili, devono avere delle rese adeguate con poche lavorazioni e senza l’utilizzo di grandi quantità di acqua o sostanze chimiche. Se utilizzate come colture intercalari, devono anche avere una crescita rapida durante i pochi mesi che intercorrono tra un raccolto e la semina successiva della coltura principale.

Le colture più adatte alla produzione di biodiesel sono colza, girasole e soia, i cui semi e frutti contengono una cospicua quantità di olio. Il colza è una coltura annuale, quindi non adatta come intercalare. La soia ha una percentuale di olio inferiore della metà rispetto alle altre due colture, quindi ha una resa più bassa. Il girasole (Fig. 5.3) è a ciclo primaverile-estivo, infatti in Pianura Padana viene generalmente seminato ad aprile e raccolto a settembre; è adattabile, non richiede molti interventi, ha sviluppo rapido e i suoi frutti contengono circa il 48% di olio; tuttavia è sensibile ai cambiamenti climatici, non può tornare sullo stesso terreno prima di 3 anni e non può avvicinarsi a soia o colza.



Figura 5.3. Piante di girasole. Fonte: www.informatoreagrario.it

Le colture più adatte alla produzione di bioetanolo sono barbabietola e canna da zucchero (colture zuccherine) o mais e orzo (colture amidacee). La canna da zucchero è perenne e l'orzo è annuale, quindi questi non sono adatti come intercalari. Il mais ha un rapporto resa-costi poco favorevole per questa produzione. La barbabietola si può coltivare a ciclo primaverile-estivo e ha una resa elevata, infatti contiene in media il 16% di zucchero; si può seminare tra marzo e giugno, si raccoglie dopo pochi mesi e spesso segue la coltura del frumento; tuttavia è sensibile alle infestanti, richiede molta acqua, necessita di molte lavorazioni e non può tornare sullo stesso terreno prima di due anni.

Le colture dedicate erbacee più adatte per la produzione di biocarburanti di seconda generazione o come biocombustibili sono miscanto, canna comune e sorgo da fibra. Il miscanto e la canna comune sono poliennali, quindi non adatte come intercalari. Il sorgo da fibra è a ciclo primaverile-estivo, ha una resa alta e necessita di poca acqua; può essere intercalato a cereali autunno-vernini, si semina in tarda primavera e si raccoglie a fine estate; tuttavia la biomassa è deperibile quindi la gestione è costosa⁷⁷.

⁷⁷ Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto, "Colture energetiche e protezione del suolo", 2010

Le colture dedicate più adatte alla produzione di biogas sono mais, sorgo e triticale, anche se ultimamente è stata usata anche la barbabietola. Il triticale è annuale, quindi non adatto come intercalare. Il mais e il sorgo sono entrambi a ciclo primaverile-estivo. Hanno entrambi una resa alta: il mais ha una resa leggermente migliore sia come coltura principale, sia in successione a cereali invernali (Fig. 5.4), ma ha bisogno di molta acqua; il sorgo è più resistente alla siccità e alle alte temperature e ha minori costi di coltivazione (Fig. 5.5)⁷⁸.

Campione	Produzione (t s.s./ha)	Biogas (Nm ³ /t s.s.)	Resa energetica (MWh _E /ha)
Mais 1° raccolto	21,48	649	21.907
Mais 2° raccolto	20,13	585	18.829
Mais 3° raccolto	17,63	591	16.605
Segale	8,68	505	7.046
Erba silo	10,87	498	8.530
Triticale	16,50	563	14.336
Sorgo	19,35	454	13.209

Fig. 5.4. Valori medi per coltura di tonnellate di sostanza secca per ettaro, di quantità di biogas prodotto per tonnellata e di elettricità prodotta in Megawattora per ettaro, in una serie di prove del 2008. Fonte: D'Imporzano G. et alii, "Valutazione tecnico-economica delle colture energetiche", *L'Informatore Agrario*, 2010, n. 32, pp. 17-20

⁷⁸ D'Imporzano G. et alii, "Valutazione tecnico-economica delle colture energetiche", *L'Informatore Agrario*, 2010, n. 32, pp. 17-20

5.3 – Simulazione sul territorio emiliano-romagnolo

È stata effettuata una simulazione della resa energetica potenziale derivata dall'utilizzo sostenibile dei numerosi suoli nudi individuati nel periodo 6. Il periodo 1 non è stato compreso in questa stima in quanto i terreni disponibili sono minori e potrebbero essere in attesa di una imminente semina di colture estive, inoltre in quel periodo può non esserci accesso all'acqua irrigua. È stata considerata l'ipotesi di introdurre il sorgo come coltura intercalare da destinare alla produzione di biogas tramite digestione anaerobica delle biomasse. Il sorgo è adatto a questo scopo perché ha un ciclo breve, ha una resa alta e richiede poca acqua e poche lavorazioni; quindi può crescere in pochi mesi e può essere economicamente redditizio. Inoltre l'Emilia-Romagna ha numerosi impianti per la produzione di biogas. La simulazione ha previsto dapprima un controllo della posizione dei suoli nudi rispetto agli impianti, poi un calcolo della potenziale resa energetica delle biomasse.

a) Suoli nudi e impianti da biogas

È stato scaricato dal sito della regione uno shapefile contenente la posizione dei 243 impianti per la produzione di biogas presenti nella regione Emilia-Romagna (Fig. 5.5).

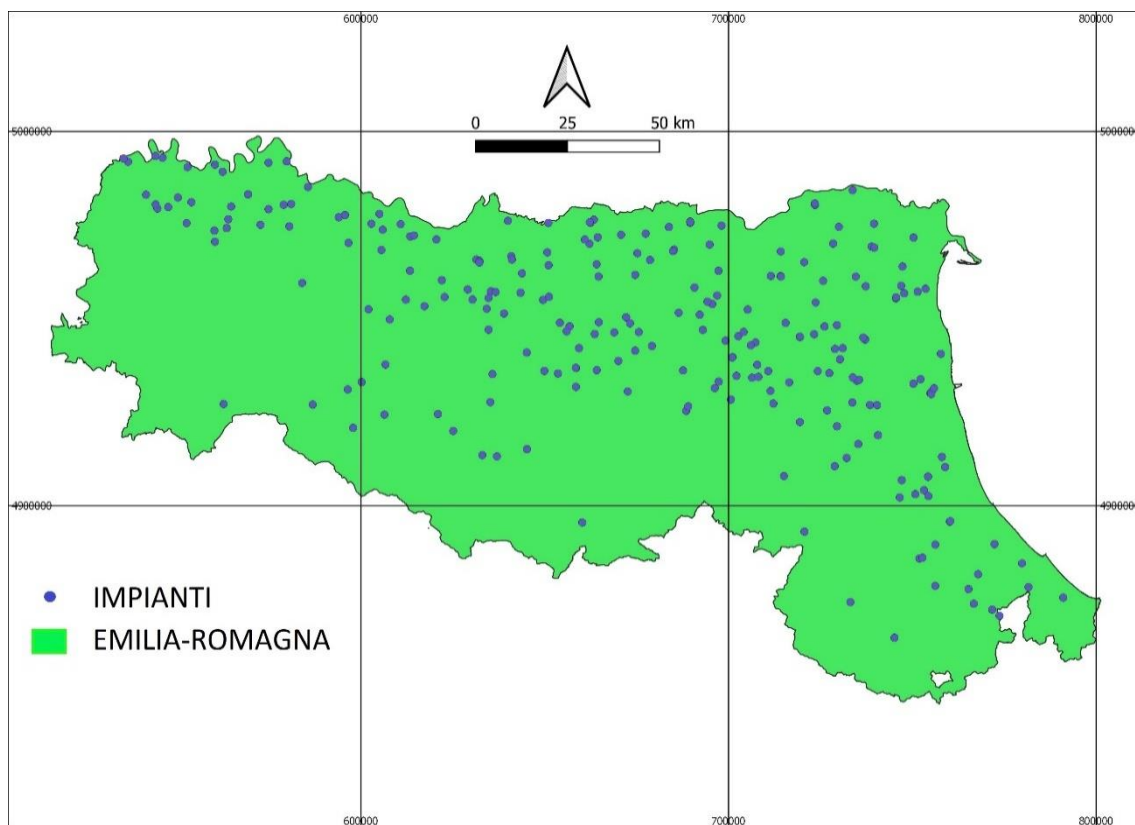


Fig. 5.5. Impianti di produzione di biogas in Emilia-Romagna.
 Fonte: dati.emilia-romagna.it/dataset/arpa_ene_impiani_biomasse_biogas

Tramite lo strumento “Buffer” di QGIS sono state identificate le zone ricadenti in un raggio di 10 e 20 km di distanza dagli impianti (Fig. 5.6).

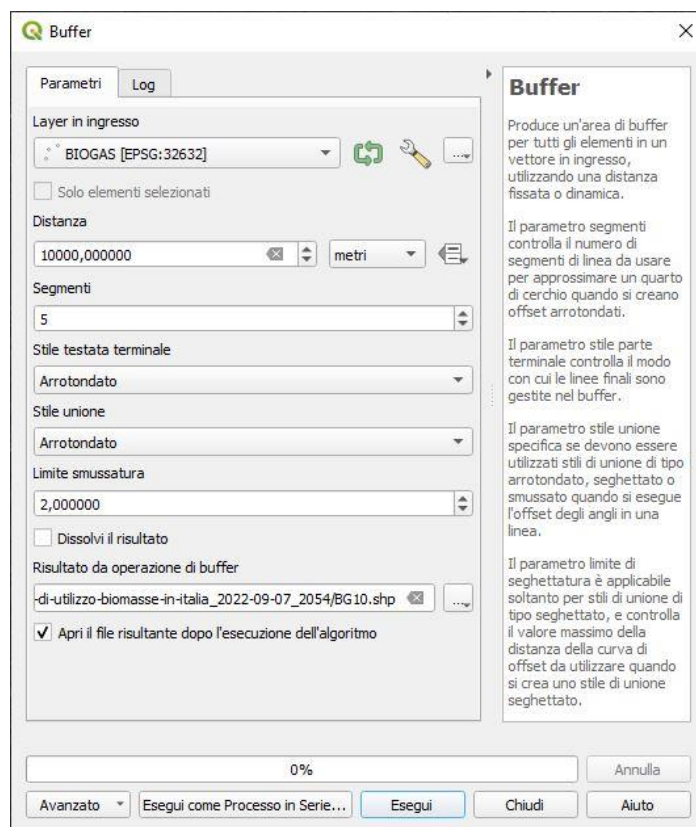


Fig. 5.6. Strumento Buffer in QGIS.

I suoli nudi del sesto periodo sono stati tagliati in modo da isolare quelli ricadenti in tali zone (Figg. 5.7-5.8); nei nuovi shapefile sono stati creati i campi con le nuove aree. Questi dati sono stati convertiti in file di Excel e sono state ricavate le statistiche: il 99,5% dei suoli nudi risulta posto entro i 10 km di distanza da un impianto, mentre il 100% è posto entro i 20 km di distanza. Quindi i terreni risultano essere vicini ad almeno un impianto.

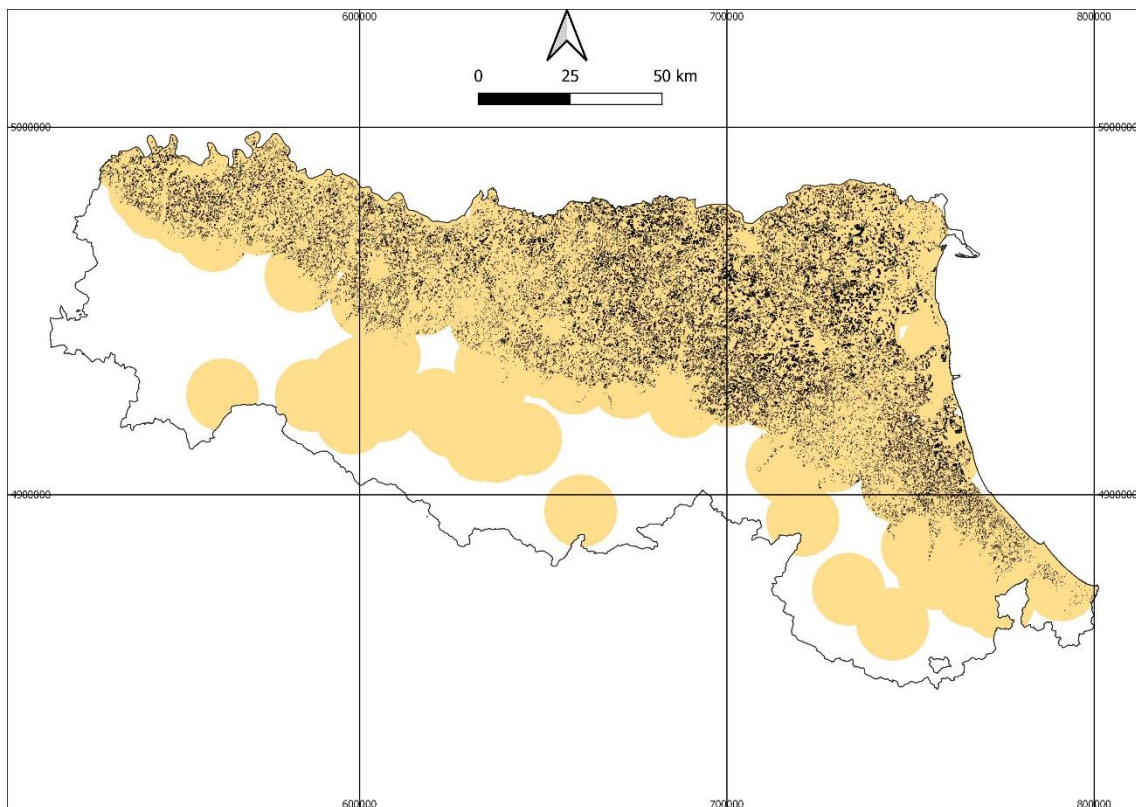


Fig. 5.7. Aree del periodo 6 nel raggio di 10 km da un impianto.

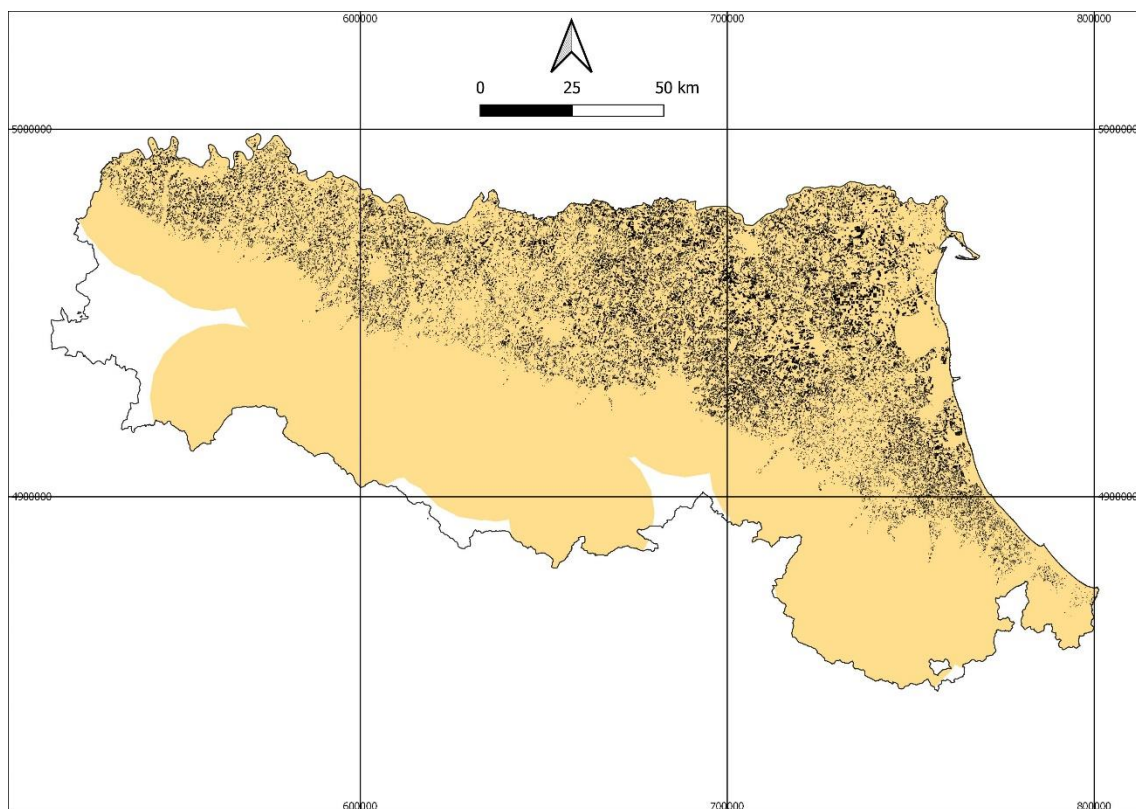


Fig. 5.8. Aree del periodo 6 nel raggio di 20 km da un impianto.

In seguito, tramite unione per posizione, le aree di suolo nudo sono state associate alle rispettive zone intorno agli impianti e sono stati ricavati i file di Excel corrispondenti. Entro i 10 km di distanza ogni impianto risulta avere mediamente 5313 ettari di suolo nudo, il 13% ha meno di metà del terreno rispetto alla media, il 17% supera la media di oltre la metà e il 70% è vicino alla media (Fig. 5.9). Con raggio di 20 km, dopo diversi tentativi il software QGIS non è mai riuscito ad effettuare l'unione per via delle dimensioni eccessive dell'output. Nel complesso i terreni risultano essere equamente distribuiti rispetto agli impianti.

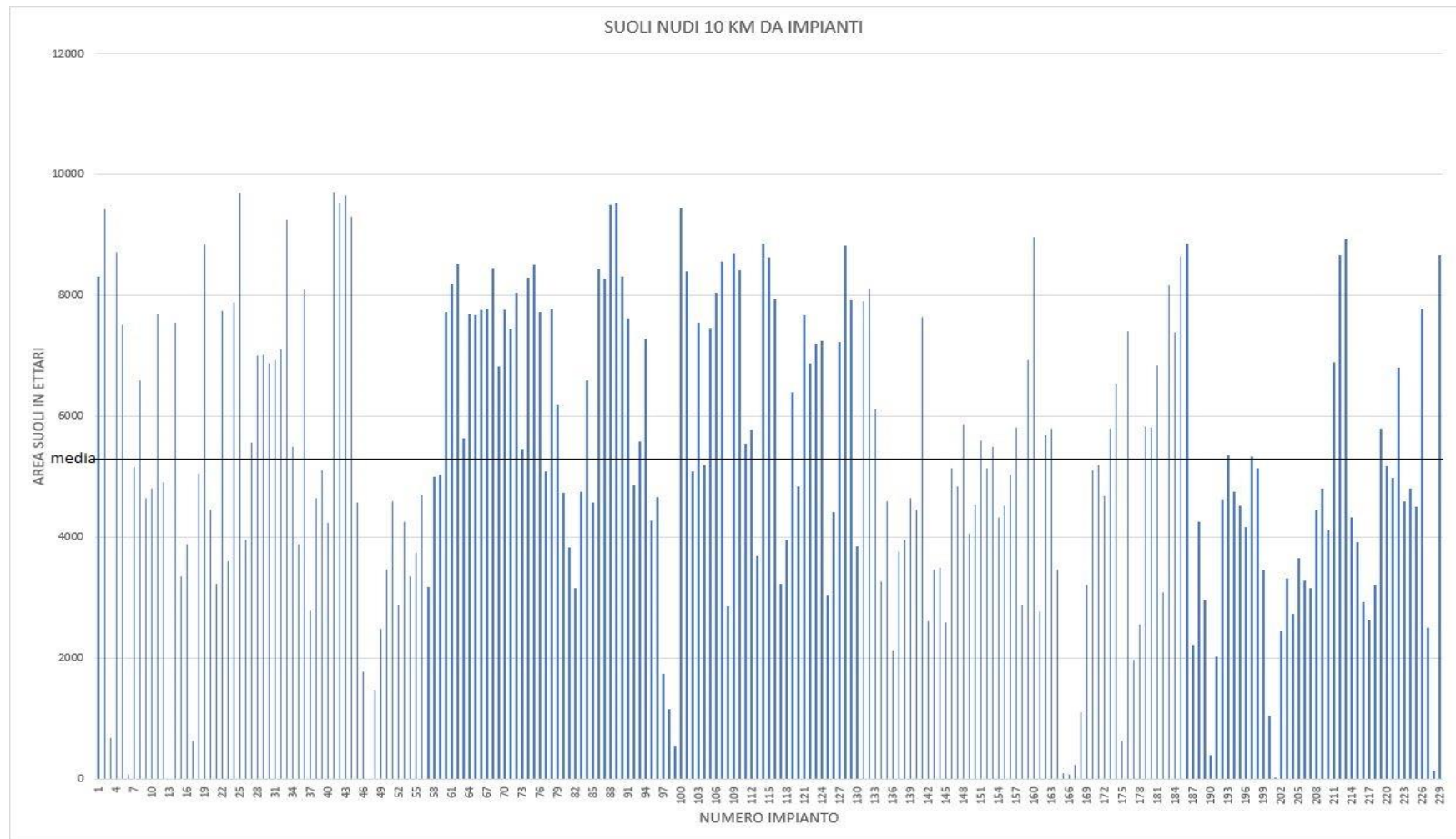


Figura 5.9. Superficie in ettari dei suoli nudi, del periodo 6, che ricadono all'interno di un intorno di 10 km da ciascun impianto.

b) Resa energetica potenziale

Tramite Excel, sono stati effettuati i calcoli riguardanti la resa energetica potenziale delle biomasse derivate dal sorgo coltivato. La somma delle aree dei suoli nudi disponibili equivale a 200023 ettari. La resa energetica media del sorgo equivale a 15500 MJ/t (Megajoule per tonnellata) che, considerando una resa media di 22 tonnellate per ettaro⁷⁹, corrispondono a 0,094 Gigawattora per ettaro. Pertanto la resa totale ipotetica equivale a 18802 Gigawattora. Il consumo energetico della regione Emilia-Romagna nel settore dei trasporti pubblici alimentati a prodotti petroliferi o gas per l'anno 2017 equivale a 42112 Gigawattora⁸⁰. Pertanto, secondo questa simulazione, il 44% di tali trasporti potrebbe essere alimentato da biometano derivato dal sorgo (Fig. 5.10) coltivato sui terreni nudi della regione e trattato negli impianti della regione.



Fig. 5.10. Piante di sorgo. Fonte: www.labiolca.it

⁷⁹ Cimatti M., *Identificazione e mappatura di suoli nudi attraverso immagini telerilevate*, Tesi di laurea in Principi di Gestione del Territorio, Università di Bologna, A.A. 2019-2020

⁸⁰ Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale dell'Emilia-Romagna, "Il sistema energetico dell'Emilia-Romagna", 2020

CONCLUSIONI

Le politiche agricole europee, nazionali e regionali da circa trent'anni promuovono una gestione sostenibile del territorio volta a limitare i danni all'ambiente per contrastare i cambiamenti climatici, seguendo le direttive dettate dagli accordi internazionali sul clima. Le politiche annoverano tra i metodi promossi: la riduzione dell'uso di sostanze chimiche come fertilizzanti e diserbanti, per limitare l'inquinamento di aria e acqua da nitrati, ammoniaca e altre sostanze dannose; la diminuzione della quantità di acqua utilizzata, per limitare lo spreco di risorse; il mantenimento della fertilità dei terreni, per limitare la quantità di acqua e sostanze chimiche necessaria; la coltivazione di piante da biomassa ad uso energetico, per avere una fonte di energia rinnovabile. Questi criteri possono essere supportati dalla metodologia di individuazione dei terreni nudi basata sull'indice NDVI, e potenzialmente soddisfatti dalla proposta relativa alla loro valorizzazione sostenibile, entrambe descritte nel presente lavoro. Infatti la coltivazione di piante da biomassa energetica, come il sorgo da biogas, su suoli che restano nudi tra un raccolto e la semina successiva della coltura principale permetterebbe di avere una fonte di energia rinnovabile, evitando lo spreco di risorse causato dai terreni lasciati temporaneamente incolti. Inoltre, permetterebbe di coltivare i terreni tutto l'anno, arricchendoli di sostanze nutritive e mantenendo così la fertilità: in questo modo nelle coltivazioni successive sarebbero necessarie meno sostanze chimiche e meno acqua. Le biomasse derivate dalle colture energetiche possono dare origine a diversi biocarburanti, come il biometano, in modo da sostituire una parte dei combustibili fossili utilizzati, ad esempio, nei trasporti su strada; in questo modo si avrebbe anche una riduzione dell'inquinamento dell'aria grazie alle emissioni nocive più basse proprie dei carburanti di derivazione vegetale.

L'utilizzo sostenibile dei suoli disponibili è inoltre in linea con le direttive relative al consumo di suolo di questo periodo. Ad esempio, la Legge Regionale dell'Emilia-Romagna n. 24/2017 prevede di limitare al massimo il consumo di nuovo suolo per costruzioni, promuovendo invece il recupero e il miglioramento dell'edilizia esistente; identifica il suolo come bene comune necessario alla mitigazione dei cambiamenti climatici e del dissesto idrogeologico; promuove la tutela e la valorizzazione del suolo agricolo. Il presente lavoro prevede appunto di valorizzare i terreni agricoli disponibili e ha tra gli obiettivi il contrasto al cambiamento climatico e al dissesto idrogeologico: infatti

mira ad abbassare le emissioni nocive e a mantenere la copertura vegetale dei terreni, che riduce il rischio di erosione trattenendo l'acqua piovana.

I risultati del lavoro sono stati nel complesso positivi. Tramite i dati satellitari sono stati individuati numerosi suoli nudi nella pianura dell'Emilia-Romagna nel 2021, specie nel periodo estivo, il quale segue la raccolta dei cereali invernali, molto diffusi nella regione. In tale periodo sono stati identificati circa 200000 ettari di suolo nudo, pari a circa il 25% dell'area di studio, ovvero l'insieme dei terreni coltivati situati nella zona pianeggiante della regione. I principali vantaggi del metodo adottato sono l'accesso libero e la fruibilità dei dati satellitari multispettrali richiesti; la possibilità di ricorrere a soli software open source; la rapidità di calcolo dell'indice di vegetazione utilizzato, l'NDVI, per la selezione dei terreni non coltivati; la comprensibilità dei risultati anche per non esperti di remote sensing e le opportunità di valorizzazione sostenibile dei suoli nudi che la procedura può creare. Tra i limiti riscontrati durante il procedimento vi sono: l'eventuale sottostima della superficie totale di suolo nudo dovuta al *range* restrittivo considerato per i valori dell'indice di vegetazione, anche se scelto per aumentare l'affidabilità dei risultati; la copertura nuvolosa che può rendere alcuni dati satellitari, o parte di essi, non utilizzabili; la pesantezza dei *file* che possono notevolmente rallentare i processi di elaborazione e richiedere capacità di memoria considerevoli.

È stata poi effettuata una simulazione della resa energetica potenziale del biocarburante ottenuto sfruttando tali terreni. Si è ipotizzato di coltivare il sorgo, che ha un ciclo colturale breve e una resa elevata a fronte della quantità limitata di sostanze chimiche e acqua richiesta; dopo la raccolta può essere trattato per produrre biogas (precursore del biometano) tramite processi di digestione anaerobica, anche all'interno dei numerosi impianti appositi presenti in regione e ben distribuiti rispetto ai terreni. È stata calcolata la quantità di energia che potrebbe essere generata dal biogas così ottenuto, la quale risulta essere di circa 18000 Gigawattora: per fare un paragone, questo valore è pari al 44% circa dell'energia utilizzata annualmente dai trasporti pubblici a combustibile fossile della regione. Pertanto la resa energetica potenziale risulta essere relativamente alta, il che rende questo riutilizzo sostenibile del territorio potenzialmente conveniente dal punto di vista economico, oltre che favorevole per l'ambiente.

Gli obiettivi e i risultati di questa tesi sono coerenti con le attuali politiche agricole, ambientali e dell'uso del suolo. Le politiche future dovranno essere sempre più attente all'ambiente a causa dell'emergenza climatica in atto, sia a livello mondiale che a livello locale, e dovranno cercare sempre nuove soluzioni in tal senso, in particolare per quanto riguarda l'abbassamento delle emissioni e l'energia rinnovabile. Oltre a ciò, in tempi di crisi energetica come quella attuale, si rende necessaria la ricerca di fonti alternative e rinnovabili.

Alla luce di quanto detto in precedenza, i risultati del presente lavoro potrebbero essere utili per le future politiche di gestione del territorio regionale. Il metodo proposto relativo al 2021 potrebbe potenzialmente fornire applicazioni da usare in tempo reale. È stato infatti dimostrato che l'utilizzo dei suoli nudi tramite colture energetiche può essere una soluzione conveniente e sostenibile, quindi potenzialmente ogni anno si potrebbe prevedere di sfruttare i numerosi suoli nudi estivi, provenienti principalmente dal raccolto di cereali autunno-vernini, per colture da destinare alla produzione di biogas tramite i numerosi impianti della regione. Infine, dovrebbe essere poi studiata la gestione dal punto di vista pratico-organizzativo, una volta accertata la sua diversa fattibilità nelle varie zone del territorio regionale.

BIBLIOGRAFIA

Comunità Economica Europea, Regolamento (CEE) 2078/92, 1992

Parlamento Europeo, Direttiva 2003/30/CE, 2003

Comunità Europea, Regolamento (CE) N. 1782/2003, 2003

Parlamento Europeo, Regolamento (UE) N. 1305/2013, 2013

Parlamento Europeo, Regolamento (UE) N. 1307/2013, 2013

Parlamento Europeo, Regolamento (UE) 2021/2115, 2021

Parlamento Europeo, Regolamento (UE) 2021/2116, 2021

Négre F., “Gli strumenti della PAC e le loro riforme”, Note Tematiche sull’Unione Europea, 2022

Frascarelli A., “L’evoluzione della PAC e le imprese agricole: sessant’anni di adattamento”, *Agriregionieuropa*, 50, 2017

MIPAAF, “*Greening* e pratiche agricole equivalenti: un’analisi sulle possibili ripercussioni del pagamento verde in Italia”, 2014

Pupo D’Andrea M., “Le novità della PAC 2023-2027”, *Agriregionieuropa*, 57, 2021

Parlamento Italiano, Legge 23 dicembre 1999, n. 488, Art. 59, 1999

Parlamento Italiano, Legge 23 dicembre 2000, n. 388, Art. 123, 2000

Parlamento Italiano, Legge 7 marzo 2003, n. 38, 2003

Comunità Europea, Regolamento (CE) n. 1698/2005, 2005

MIPAAF, Piano Strategico Nazionale per lo Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007

- MIPAAF, Programma di Sviluppo Rurale Nazionale 2014-2022, 2013
- MIPAAF, Relazione sul Piano Strategico Nazionale PAC 2023-2027, 2021
- Regione Emilia-Romagna, Piano Regionale di Sviluppo Rurale 2000-2006, 2000
- Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2007-2013, 2007
- Regione Emilia-Romagna, Programma di Sviluppo Rurale 2014-2022, 2013
- Regione Emilia-Romagna, Rapporto sull'agricoltura biologica in Emilia-Romagna, 2019
- Longhena M., *La patria: geografia d'Italia – Emilia*, Torino, UTET, 1926
- Toschi U., *Le regioni d'Italia – Emilia-Romagna*, Torino, UTET, 1961
- Regione Emilia-Romagna, Statistiche agrarie anno 2020, 2020
- May G. A., Petersen G.W., “Spectral signature selection for mapping unvegetated soils”, *Remote Sensing of Environment*, 4, 1975, pp. 211-220
- Gausman H. W. et alii, “Reflectance differences between crop residues and bare soils”, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 39, n. 4, 1975, pp.752-755
- Desmet A. et alii, “Influence of some soil factors on the reflectance of bare soils”, *Pedologie*, XXXVIII-3, 1988, pp. 227-247
- Dematté J. et alii, “Methodology for bare soil detection and discrimination by Landsat TM Image”, *The Open Remote Sensing Journal*, 2009, n. 5, pp. 24-35
- Lesaignoux et alii, “Influence of surface soil moisture on spectral reflectance of bare soil in the 0.4 - 15 μm domain”, HAL, 2009
- Fabre S. et alii, “Estimation of soil moisture content from the spectral reflectance of bare soils in the 0.4-2.5 μm domain”, *Sensors*, 2015, n. 15, pp. 3262-3281

Yue J. et alii, “Using broadband crop residue angle index to estimate the fractional cover of vegetation, crop residue and bare soil in cropland systems”, *Remote Sensing of Environment*, n. 237, 2020, pp. 1-16

Liu Y. et alii, “A normalized difference bare soil index for remote sensing to improve bare soil mapping accuracy in urban and rural areas”, *Catena*, n. 214, 2022

Moriondo M. et alii, “A simple model of regional wheat yield based on NDVI data”, *European Journal of Agronomy*, 2007, n. 26, pp. 266-274

Dalezios N. et alii, “Agricultural drought indices: combining crop, climate and soil factors”, *Handbook of Drought and Water Scarcity*, Vol.1, 2017

Comitato Termotecnico Italiano, “Biometano”, 2005

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Veneto, “Colture energetiche e protezione del suolo”, 2010

Candolo G., Meriggi P., “Le biomasse vegetali, tante energie da coltivare”, *L'Informatore Agrario*, 2006, n. 1, pp. 30-34

Chiaromonte D., “Sono in arrivo i biocarburanti di seconda generazione”, *L'Informatore Agrario*, 2011, n. 9, pp. 25-28

Mezzadri M., “Come si ottiene il biometano raffinando il biogas”, *L'Informatore Agrario*, 2014, n. 24, pp. 43-46

D'Imporzano G. et alii, “Valutazione tecnico-economica delle colture energetiche”, *L'Informatore Agrario*, 2010, n. 32, pp. 17-20

Cimatti M., *Identificazione e mappatura di suoli nudi attraverso immagini telerilevate*, Tesi di laurea in Principi di Gestione del Territorio, Università di Bologna, A.A. 2019-2020

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale dell'Emilia-Romagna, "Il sistema energetico dell'Emilia-Romagna", 2020

Regione Emilia-Romagna, Legge Regionale n. 24/2017, 2017

SITOGRAFIA

www.globalgoals.org

scihub.copernicus.eu/dhus/#/home

ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy

www.pianetapsr.it/

www.chiara.eco/il-2020-pioggie-fuori-norma-in-emilia-romagna/

www.centrometeoemiliaromagna.com/clima/emilia-romagna-bollettino-clima-e-siccita-marzo-2020#pid=1

www.plis.it/tecnologie_a_tutela_della_vita_e_dell'_occupazione/agri2.htm

www.products.pcc.eu/it/blog/prodotti-fitosanitari-chimici-classificazione/

www.treccani.it/enciclopedia/fertilizzanti

www.treccani.it/enciclopedia/agricoltura-biologica

www.arpa.veneto.it/arpavinforma/indicatori-ambientali/indicatori_ambientali/geosfera

www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/suolo/conoscenza-dei-suoli/carte-applicative/rischio-di-erosione

www.sociale.corriere.it

geoportale.regione.emilia-romagna.it/approfondimenti/database-uso-del-suolo

www.comuni-italiani.it/08/fiumi/

statistica.regione.emilia-romagna.it/metadati/glossario/f/foraggiere-avvicendate

ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/parchi-natura2000/aree-protette/aree-protette-in-er/aree-protette-1

www.emiliaromagnameteo.com/sasso-fratino

www.specialeitalia.com/emilia-romagna-agricoltura.html

www.agroforestry.it/coltura-promiscua-vite/

earthobservations.org/geo_community.php

earthobservations.org/geoss.php

iia.cnr.it/project/eurogeoss/

www.copernicus.eu/it/informazioni-su-copernicus

www.copernicus.eu/it/servizi

atmosphere.copernicus.eu

climate.copernicus.eu

sentinels.copernicus.eu

www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus

insitu.copernicus.eu

www.copernicus.eu/en/contributing-missions

www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_IT

www.istat.it/it/archivio/222527

www.informatoreagrario.it

www.oataitalia.it/le-culture-di-copertura-cover-crop

www.blogincampo.it/informazioni_tecniche/articolo.asp?id=47

b-e-net.it/portfolio/biodiesel

fulgea.it/efficientamento/biogas

www.labiolca.it

dati.emilia-romagna.it/dataset/arpa_ene_impianti_biomasse_biogas