



## Comune di: **MACOMER**

PROVINCIA ORISTANO

### **PROGETTO PRELIMINARE PER L'ALLESTIMENTO DI UN PIANO DI BIOMONITORAGGIO DELLE EMISSIONI GASSOSE A MEZZO DI**

**LICHENI EPIFITI E/O ALTRI**

**NELL'AREA INDUSTRIALE di TOSSILO - MACOMER**

## **CIM "CONSORZIO PER LA ZONA INDUSTRIALE DI MACOMER"**

Sede località Tossilo – 08015 MACOMER (NU)



RELAZIONE TECNICA

*Coordinatore*

*Dottore Biologo Francesco Aru*

Valutazione Impatto Ambientale. Analisi e soluzioni ambientali. Landscape Ecology. Pedologia e scienze del suolo. Classificazione, Pianificazione e Gestione dei sistemi agro-silvo-venatorio-pastorali e della vegetazione forestale. Monitoraggio fauna selvatica. Metodiche di Biomonitoraggio Ambientale. Bioremediation. Consulenza agraria e fitopatologia. Metodiche agrobiologiche. Certificazioni ambientali ISO/EMAS/ECOLABEL. Sicurezza sul lavoro. Certificazione HACCP. Formazione professionale.

Studio tecnico: Via Roma n. 11, Villacidro

0903 Tel. e fax 0709315453 - cell. 3406518502

- P. I. 02192000921 -

Mail: [arufranco@gmail.com](mailto:arufranco@gmail.com) – PEC: [francesco.aru@pec.enpab.it](mailto:francesco.aru@pec.enpab.it)

**A.T.P. "C.C.W.R." progettazioni e soluzioni ambientali, sviluppo equo ed ecosostenibile**

Prof. Angelo Aru, agronomo già ordinario geopedologia, dipartimento di scienze della terra Università Cagliari -

Ph.D. Biologo Francesco Aru: ingegneria ambientale e metodologie legate all'ambiente ed al territorio;

Dott. geol. Daniele Tomasi: geopedologo ed esperto di processi di degrado e di desertificazione.

Dott.ssa Agnese Deidda Biologa – Dott.ssa in Scienze Biologiche Alessia Aru (collaboratrici)





Il presente progetto preliminare inerente l'allestimento di un Piano di BioMonitoraggio delle emissioni gassose a mezzo di licheni epifiti e/o altri, nell'Area della Zona Industriale di Tossilo "MACOMER" viene redatta a seguito di specifico incarico conferito dalla società **AREA IMPIANTI SPA**, con sede in via Leonino Da Zara n. 3A, 35020 Albignasego (PD), in data 22 maggio 2024, per conto del: CIM "CONSORZIO PER LA ZONA INDUSTRIALE DI MACOMER" con Sede nella località Tossilo – 08015 MACOMER (NU).

## **PIANO DA ATTUARE NELL'AMBITO DEL PROGETTO DI REALIZZAZIONE DELLA NUOVA LINEA DI TERMOVALORIZZAZIONE DA 30 MW PRESSO IL SISTEMA DI TRATTAMENTO RIFIUTI DI MACOMER**

Le finalità specifiche del seguente elaborato sono:

1. L'inquadramento territoriale e lo stato dei luoghi, ai fini di valutare la congruità delle metodiche di biomonitoraggio approntate;
2. la fattibilità e applicabilità in relazione al contesto territoriale, alle opere esistenti e connesse, analizzando nello specifico sia il contesto agrario, sia il contesto forestale, sia il contesto geomorfologico, sia il contesto degli impianti già esistenti e ubicati nel territorio;
3. l'allestimento di un Piano di Biomonitoraggio consono sia al contesto territoriale che alla professionalità delle maestranze, in grado di poter essere applicato in tempi relativamente brevi e con costi non eccessivamente sostenuti.

## **INTRODUZIONE**

La direttiva 2008/99/CE del Parlamento e del Consiglio Europeo stabilisce misure per la protezione dell'ambiente attraverso il Diritto Penale. In Italia questa Direttiva trova la sua prima applicazione con il Decreto Legislativo 121/2011 relativo alla protezione delle specie animali e vegetali in via di estinzione o minacciate nonché ad alcuni habitat importanti. Tuttavia, è solo con la legge 68/2015 che la legislazione italiana ha introdotto nel Codice Penale una parte (titolo VI bis) specificamente dedicata ai reati contro l'ambiente, composta da dodici articoli, tra cui cinque nuovi articoli dedicati alla protezione dell'ambiente e dell'ecosistema. In questo contesto, è particolarmente rilevante l'articolo 452 bis intitolato "*inquinamento ambientale*": con questo articolo il legislatore ha specificato che sono punibili coloro che causano danni e deterioramenti, significativi e misurabili, di (i) *acqua, aria o suolo*, (ii) *ecosistema, biodiversità, flora o fauna*. Pertanto, mentre prima del

2015 l'ambiente è stato difeso solo al fine di preservare la sicurezza e la salute umana, con la legge

68/2015 l'ambiente in quanto tale ha acquisito per la prima volta in Italia il Diritto ad essere

Protett

o.

Secondo la Direttiva Europea 2008/50/CE (recepita dal D.Lgs.155/2010) che disciplina il controllo della salubrità dell'aria, le sostanze di cui monitorare la concentrazione nell'aria a livello del suolo sono: monossido di carbonio (CO), biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub> NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), particolato sottile (PM10 e PM2.5), piombo, benzene, arsenico, cadmio, mercurio, nichel e benzo[a]pirene (idrocarburi policiclici aromatici).

Per la misurazione vengono prevalentemente utilizzate centraline automatiche, fisse o mobili, dotate di analizzatori che in genere operano in continuo, oppure procedendo con l'analisi in laboratorio dei depositi sui filtri delle centraline di campionamento non dotate di analizzatori.





**A.T.P. "C.C.W.R." progettazioni e soluzioni ambientali, sviluppo equo ed ecosostenibile**

Questa metodica consente un rilevamento continuo, tuttavia l'elevato costo delle attrezzature impone un numero limitato di punti di rilevamento, per cui l'estensione del territorio monitorato sarà ridotta, oppure la griglia dei punti di rilevamento avrà delle maglie molto larghe e quindi una densità bassa. Inoltre, il numero di sostanze rilevabili attraverso tali centraline è contenuto, per cui altre sostanze vanno determinate indirettamente tramite l'analisi chimica del particolato. Oltretutto con questa metodica non vi sono indicazioni efficaci e dirette sulla salubrità eco-sistemica, relativamente alle interazioni aria-suolo-acqua-vegetazione-zoofauna.



**A.T.P. "C.C.W.R." progettazioni e soluzioni ambientali, sviluppo equo ed ecosostenibile**

*Ph.D. Biologo Francesco Aru: ingegneria ambientale e metodologie legate all'ambiente ed al territorio;  
Dott. geol. Daniele Tomasi: geopedologo ed esperto di processi di degrado e di desertificazione.*



Al fine di avere un quadro più completo della situazione ambientale di un territorio, risulta quindi interessante l'affiancamento del rilevamento biologico, basato sulla reazione di organismi viventi alla presenza di sostanze chimiche inquinanti. Questa tipologia di rilevamento presenta costi inferiori, semplicità di realizzazione, una maggior densità di punti di campionamento e indicazioni ecologiche di grande interesse, rivelandosi quindi uno strumento efficace per il controllo sia della qualità dell'aria che della salubrità ambientale.

Uno degli organismi viventi maggiormente utilizzato nel monitoraggio biologico è il lichene, poiché presenta delle caratteristiche favorevoli (elevato rapporto superficie/volume, struttura vegetale particolare (simbiosi/consorzio), semplice organizzazione anatomica, assenza di cuticola. In particolare sono adoperati i licheni epifiti, che reagiscono alla presenza di inquinanti nell'aria accumulandoli all'interno dei propri tessuti, oppure con la modifica delle proprie strutture e funzioni. Questi processi si verificano anche quando i contaminanti sono presenti nell'atmosfera in bassissime concentrazioni.

Quando il processo che si verifica è la modifica dell'organismo, **i licheni sono definiti "bioindicatori"**, quando invece il processo che si verifica consiste nell'assorbimento delle sostanze inquinanti, **i licheni sono definiti "bioaccumulatori"**.

Oltre che per le sostanze di interesse della Direttiva citata, i licheni sono in generale bioaccumulatori di metalli pesanti, di radionuclidi, di non-metalli (come lo zolfo e il fluoro), di idrocarburi policiclici aromatici (IPA), di policlorobifenili (PCBs), diossine e furani.

## L'AREA D'INTERESSE

L'agglomerato industriale di Tossilo (fig.1) si trova in prossimità del centro abitato di Macomer, esteso a sud-est dell'area urbana per una estensione di circa 390 ettari.

Nella sua parte settentrionale è presente l'impianto di: "TERMOVALORIZZAZIONE PRESSO IL SISTEMA DI TRATTAMENTO RIFIUTI DI MACOMER/TOSSILO", le cui emissioni saranno l'oggetto del piano di Biomonitoraggio.



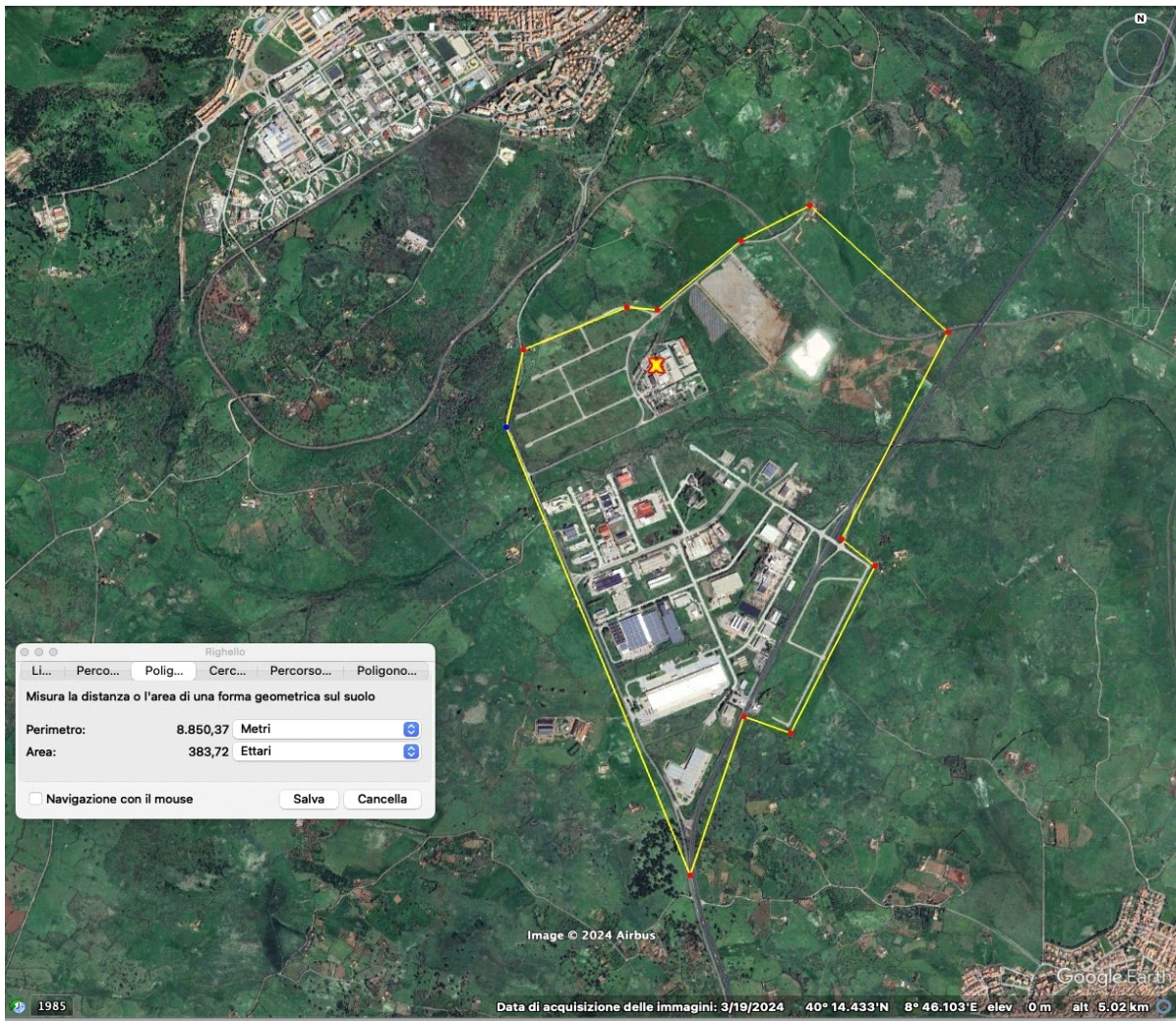


Fig.01. Ortofoto satellitare dell'area industriale di Tossilo, Macomer, la X di colore giallo indica la posizione del camino del termovalorizzatore.



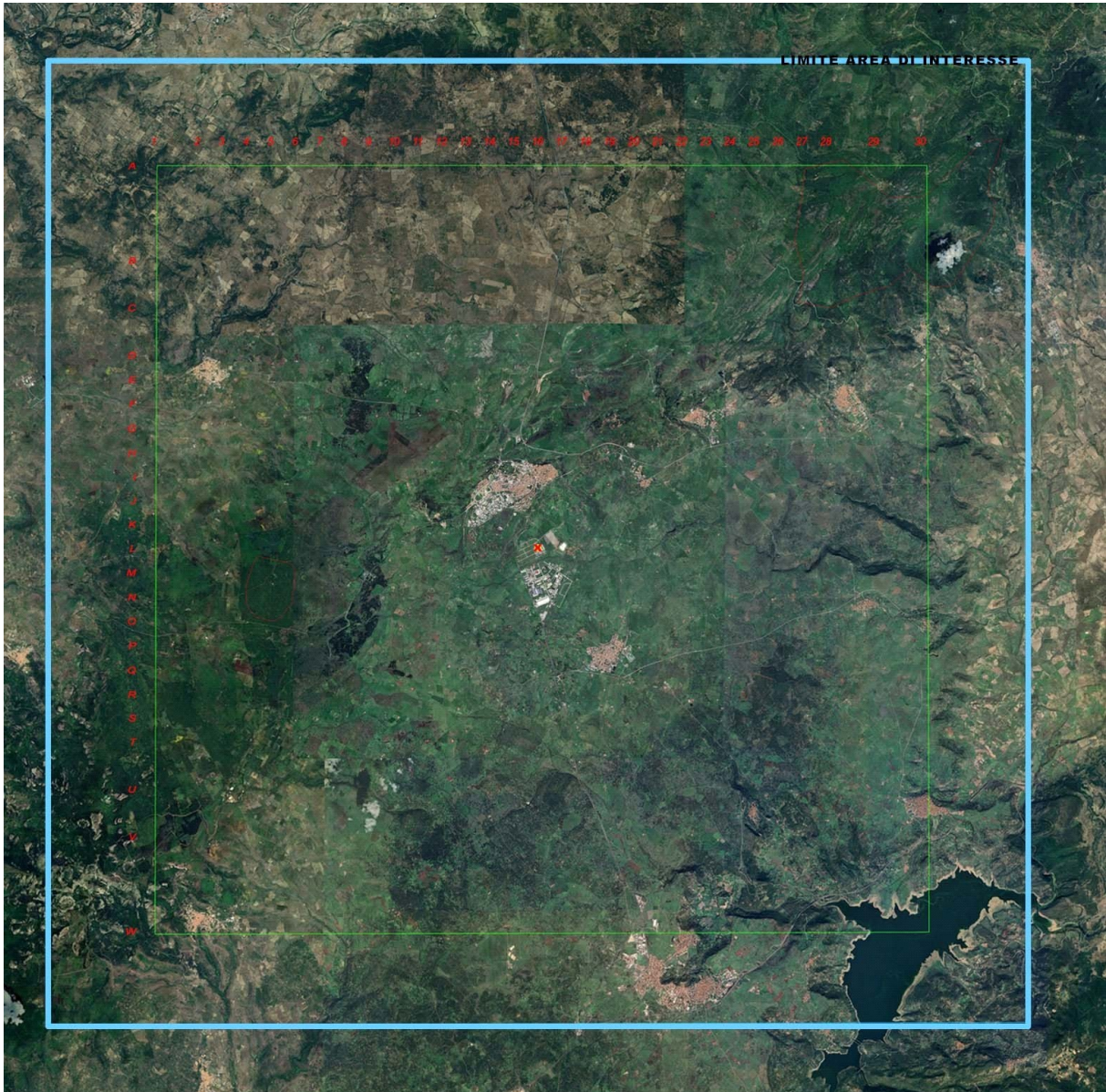


Fig.02. Ortofoto satellitare del territorio circostante l'area industriale di Tossilo, Macomer, con l'indicazione dei limiti dell'area di monitoraggio quadrato verde, con lato di 24 km. In azzurro l'area d'interesse e controllo con lato di 37 km.

ASPETTI  
GEOGRAFICI

ASPETTI GEOPEDOLOGICI





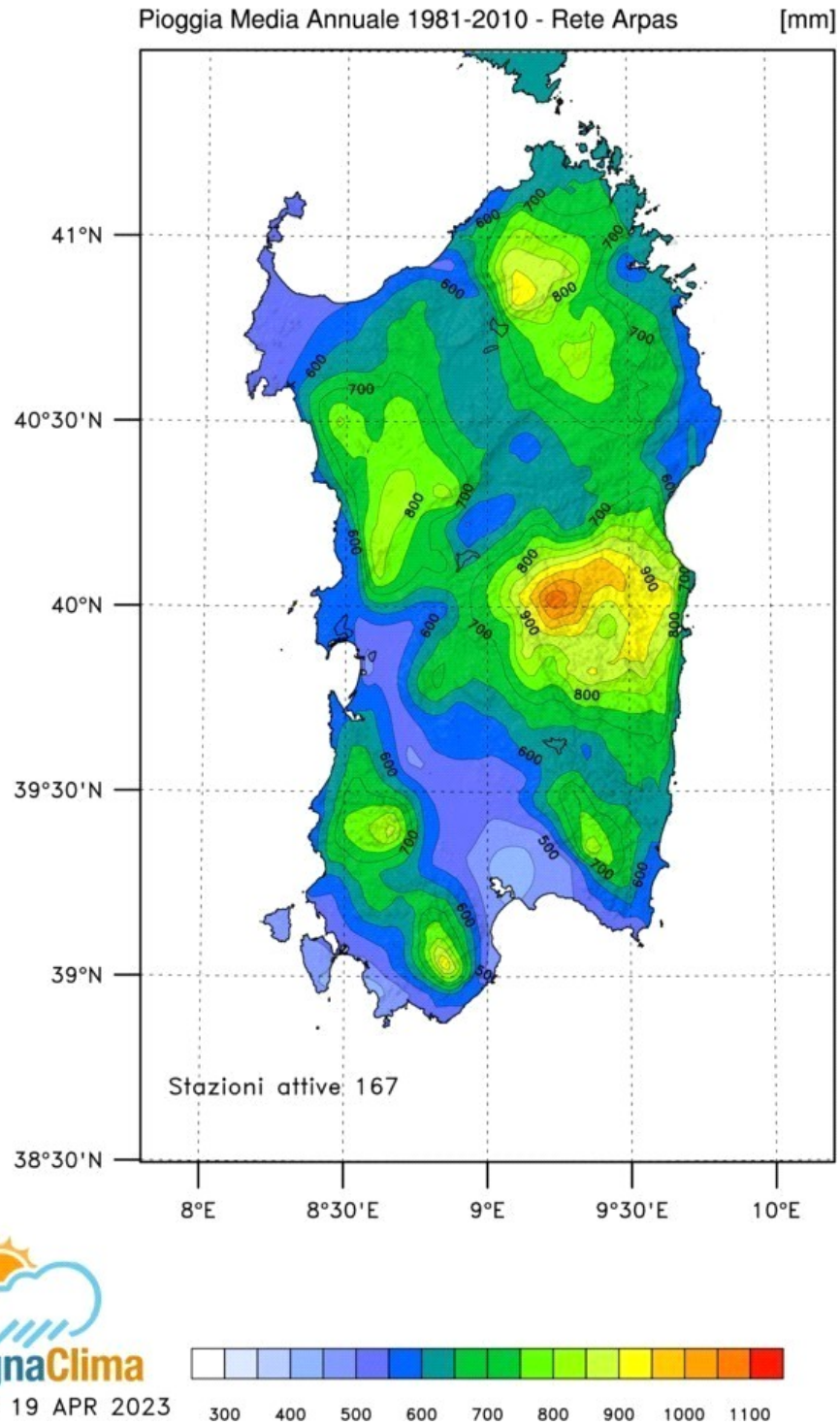


Fig. 16. precipitazioni medie nelle aree territoriali sarde, rilevamenti dal 1981 al 2010 (fonte ARPAS)



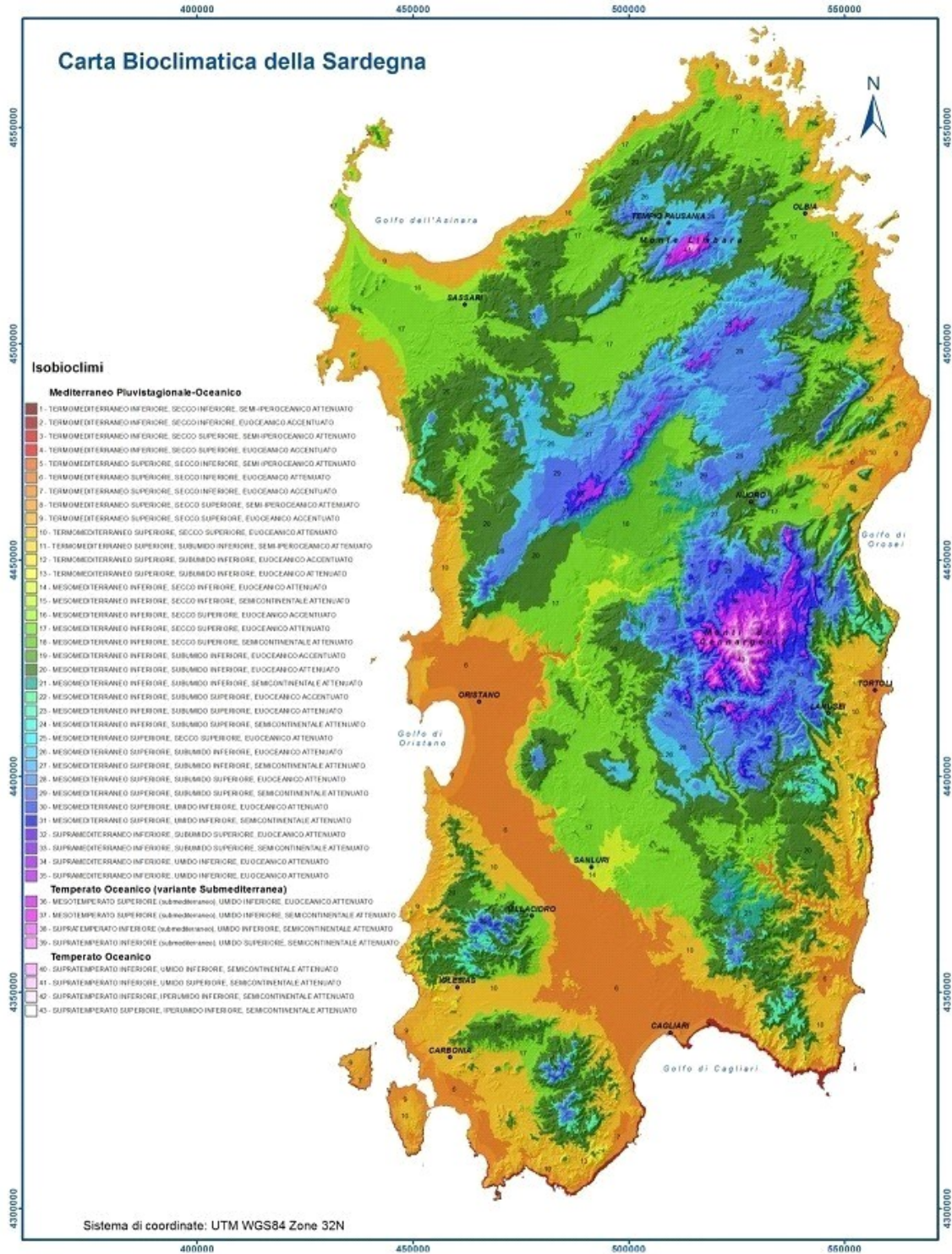


Fig. 17 . Carta bioclimatica della Sardegna, Olmedo area 17  
MESOMEDITERRANEO INFERIORE, SECCO SUPERIORE,  
EUOCEANICO ATTENUATO





L'analisi bioclimatica del territorio regionale è stata effettuata seguendo il modello bioclimatico denominato "Worldwide Bioclimatic Classification System" (WBCS) proposto da Rivas-Martinez, (Rivas-Martinez, 2011). Si tratta di una classificazione numerica che mette in relazione le grandezze numeriche dei fattori climatici





## INQUADRAMENTO FLORISTICO

### VEGETAZIONALE IL FINE

Lo scopo del presente progetto d'indagine e ricerca è quello di valutare l'ipotetico impatto ambientale

subito dal territorio a seguito della presenza di una linea di incenerimento rifiuti nell'area Industriale di Tossilo - Macomer, ottenere quindi dei parametri qualitativo/comparativi da poter utilizzare a seguito della messa in esercizio della nuova linea di termovalorizzazione da 30 MW, allo stato attuale in fase finale di allestimento. Il crescente degrado del territorio impone, con sempre maggiore urgenza, la necessità di attuare un quadro sistematico di controllo dei livelli di inquinamento e della qualità dell'ambiente. In quest'ambito si collocano le attività di biomonitoraggio, cioè il rilevamento delle alterazioni ambientali effettuato mediante l'uso di organismi viventi.

Esso si basa sul presupposto che qualsiasi fattore di disturbo che modifichi le condizioni ambientali produce degli effetti sugli organismi viventi e sulle loro comunità. La valutazione di tali effetti fornisce un'informazione diretta sul processo di deterioramento della qualità ambientale in quel determinato contesto territoriale.

### IL BIOMONITORAGGIO AMBIENTALE

Il monitoraggio dell'inquinamento tramite parametri biologici (biomonitoraggio) si basa sulle variazioni ecologiche indotte dall'inquinamento nell'ambiente (Manning & Feder, 1980); queste si riflettono sugli organismi in tre modi principali:

1. Modificazioni morfo-strutturali.
2. Accumulo di sostanze inquinanti.
3. Variazione della composizione faunistica e/o floristica in un dato ambiente.

Nella maggior parte dei casi dette modificazioni non dipendono tanto, salvo fenomeni eccezionali di natura catastrofica, da fenomeni acuti d'inquinamento, quanto dall'inquinamento medio entro periodi più o meno lunghi, a seconda del tipo di organismi.

Considerando che una stima corretta dell'inquinamento atmosferico deve essere basata su valori medi riferiti a un arco di tempo sufficientemente ampio, la valutazione del grado di inquinamento tramite bioindicatori riflette la situazione generale in modo più fedele di quella derivante da poche misure dirette di tipo puntiforme nel tempo e nello spazio. In altre parole, gli organismi vengono utilizzati quali "centraline permanenti" naturali.

La scelta di un organismo, o di un gruppo di organismi adatti ad essere usati per il biomonitoraggio ambientale dipende da numerosi fattori, tra cui i principali sono:

1. Accertata sensibilità all'inquinamento.
2. Scarsa mobilità nell'ambito dell'area d'indagine.
3. Presenza diffusa nel territorio da esaminare.
4. Eventuale capacità di accumulo di sostanze inquinanti.





Inoltre, è da tener presente che diversi organismi sono più sensibili a certi tipi di inquinanti piuttosto che ad altri, quindi a volte la scelta dipende anche dal tipo di inquinante che si vuole rilevare.

Il monitoraggio ambientale tramite bioindicatori possiede degli evidenti vantaggi rispetto a quello di tipo diretto effettuato tramite centraline. Nella maggior parte dei casi, però, è inadatto al monitoraggio di casi acuti d'inquinamento, dati i tempi di risposta relativamente lenti di molti organismi.

Tra i bioindicatori della qualità dell'aria i licheni occupano sicuramente un ruolo fondamentale, per tale motivo vengono proposti in questo lavoro quali fonte di monitoraggio.





## PRINCIPIO DI UTILIZZO DEI LICHENI

Il vantaggio di utilizzare i licheni per il monitoraggio dei diversi inquinanti deriva dalle peculiarità fisiologiche ed ecologiche proprie di questi organismi.

Tra cui evidenziamo:

1. Sono una associazione "simbiotica" tra un fungo ed una o più alghe, fotosinteticamente attivi solo allo stato idratato.
2. **Mancano di apparato radicale e per il loro metabolismo si avvalgono delle deposizioni secche ed umide provenienti dall'atmosfera.**
3. **Mancano di una cuticola superficiale con conseguente più facile assorbimento degli elementi nutritivi e dei contaminanti gassosi e/o particellato.**
4. Impossibilità di liberarsi delle parti vecchie o danneggiate, ciò fa sì che i talli lichenici non siano in grado di liberarsi delle sostanze contaminanti.
5. I processi di assorbimento hanno luogo su tutta la superficie del tallo; da ciò la capacità di accumulare a livelli apprezzabili contaminanti clorurati, fluoruri, ecc.
6. Possiedono scarsi meccanismi di selezione nei confronti delle sostanze presenti nell'ambiente.
7. In generale ampia distribuzione e accertata fissità al substrato che ne fanno dei testimoni affidabili delle condizioni dell'area in cui vivono.
8. Lento accrescimento e grande longevità, che gli permettono di fornire informazioni inerenti a lunghi periodi.
9. Le varie specie di licheni hanno tolleranze ecologiche piuttosto ristrette e ben definite.
10. Le varie specie licheniche presentano tolleranze diverse a differenti tipi di inquinanti.
11. Hanno una fortissima sensibilità alle modificazioni di tipo microclimatico.

Tutte queste proprietà possono essere utilizzate per determinare i tassi di inquinamento da metalli pesanti, fluoruri, radionuclidi, ecc., misurandone la concentrazione nei talli lichenici campionati nell'area oggetto di studio.

Infatti la scarsità di licheni delle aree inquinate (deserti lichenici) è dovuto al danneggiamento delle cellule algali, da parte degli inquinanti, con conseguente depressione dei processi di fotosintesi clorofilliana.

Palesemente ne consegue che le tecniche di biomonitoraggio permettono di identificare lo stato di alcuni parametri ambientali sulla base degli effetti da essi indotti sul tallo o su indici (IBL) di presenza/assenza/copertura di questi organismi sensibili.

Questi effetti si manifestano a due livelli, che corrispondono a due categorie di tecniche.

1. Modificazioni morfologiche, fisiologiche o genetiche a livello di organismo, di popolazione o di comunità: tecniche di bioindicazione, che stimano gli effetti di variazioni ambientali su componenti sensibili degli ecosistemi. La biodiversità dei licheni ha dimostrato di essere un eccellente bioindicatore dell'inquinamento prodotto da sostanze fitotossiche.

2. Accumulo di sostanze: tecniche di bioaccumulo, che misurano le concentrazioni di sostanze in organismi in grado di assorbirle ed accumularle dall'ambiente. Le tecniche di bioaccumulo correntemente utilizzate permettono di valutare alterazioni ambientali dovute a deposizioni di inquinanti persistenti aerotrasportati. L'esperienza più vasta è di





più lungo periodo è riferita al bioaccumulo di inquinanti inorganici, quali elementi in traccia, sia in licheni epifiti che in muschi epigei.

Nel passato sono stati utilizzati licheni e muschi come bioaccumulatori per lo studio delle deposizioni di radionuclidi e fluoruri. Più recentemente, tali tecniche sono state sperimentate positivamente per il bioaccumulo di inquinanti organici come ammoniaca, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), dibenzo- p-diossine (PCDD) e i dibenzo-p-furani (PCDF).

A livello concettuale le differenze tra tecniche di bioindicazione e di bioaccumulo non sono sostanziali, anche se le prime si basano su misure biologiche, le seconde su analisi chimiche: entrambe rientrano nella definizione del termine "biomonitoraggio" proposta da Nimis (1999a): *"analisi di componenti degli ecosistemi reattivi all'inquinamento, per la stima di deviazioni da situazioni normali"*.

Per concludere, possiamo affermare che il monitoraggio biologico si è dimostrato molto utile nella valutazione dell'inquinamento atmosferico da elementi in traccia (Manning & Feder, 1980): in particolare, l'uso di licheni per la valutazione dei livelli atmosferici e dei pattern di deposizione di elementi in traccia è ben consolidato (Bačkor e Loppi, 2009). I tentativi di correlare gli elementi accumulati dai licheni con le concentrazioni atmosferiche, hanno suggerito che i licheni riflettono principalmente deposizioni secche e umide (Pilegaard, 1979; Sloof, 1995; Godinho et al., 2008; Loppi & Paoli, 2015). Tuttavia, alcuni studi hanno indicato che i licheni accumulano preferenzialmente elementi contenuti nel particolato (Glenn et al., 1991; Bari et al., 2001; Costa et al., 2002). Di conseguenza, i licheni sono sempre più utilizzati come uno strumento importante nel contenzioso legale ambientale (Tretiach et al., 2011; Purvis et al., 2013; Contardo et al., 2019).

## STRATEGIE DI CAMPIONAMENTO

Le indagini di biomonitoraggio hanno diversi obiettivi e, quindi, diverse scale territoriali: sono possibili studi su ampia scala, **studi di gradiente a distanze crescenti da una presunta fonte emittente**, studi before-after. Obiettivi, scale territoriali e strategie di campionamento sono interrelati, e non ha senso specificare rigidamente un'unica strategia valida per tutti i casi.

La scala territoriale può essere di tipo locale-puntiforme, o interessare aree vaste. L'inquinamento da metalli può avvenire sotto forma di particolato più o meno pesante, e quindi con ricadute su aree più o meno ristrette rispetto alla fonte, per cui un campionamento su un'area vasta, con scarsa densità di punti di misurazione, può rivelarsi inadeguato. Nella delimitazione dell'area di studio e nella scelta della densità di campionamento vanno considerati ove possibile i tassi di dispersione di specifici metalli a partire dalla fonte di emissione.

Per un adeguato trattamento statistico dei dati, per facilitare il confronto tra studi diversi e per ridurre la soggettività dell'operatore, è consigliabile, ove possibile, un campionamento basato su criteri probabilistici, fondato sulla definizione esplicita della popolazione statistica di riferimento e degli obiettivi campionari. Si propone, ma sarà da meglio valutare a seguito dello studio della reale situazione di campo, una suddivisione del territorio in Unità Geografiche Operazionali (OGUs) identificate secondo un disegno sistematico, utilizzata a scala nazionale.

Sono da preferire griglie di campionamento già utilizzate e testate su scala nazionale e/o internazionale. Un esempio è il sistema di campionamento utilizzato per l'inventario





Nazionale Forestale (IFN), costituito da una rete di punti in una maglia di 3x3 km. La rete europea EU-UN/ECE per il rilevamento dei danni alle foreste causati dall'inquinamento atmosferico sotto gli auspici della "EU Scheme on the protection of forests against atmospheric pollution" e "CLRTAP - Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution" ha adottato un sistema di rilevamento costituito da una maglia di 15x18 km. Una rete di base di 3x3 km consente diverse densità di campionamento, sia regolari (3x3, 6x6 km, etc.), che a maggiore densità nel senso della latitudine (3x6, 3x9 km, etc.), o della longitudine (6x3, 9x3 km, etc.), a seconda delle esigenze. **Nel caso specifico, vista l'area ristretta oggetto delle analisi, si è preferito il sistema di indagine per UC** scegliendo un grigliato di circa 1x1 km (0,750x0,750 km) con andamento dinamico, più idoneo per indagini su scala territoriale ristretta, aree comunali, urbane, ecc., la cui idoneità verrà testata dopo un adeguato studio del territorio e un primo campionamento.

In questo contesto l'Unità di Campionamento (UC) è la porzione del dominio di studio (es. plot circolare) in cui i campioni lichenici vengono raccolti sia per i nativi, o esposti per i trapianti.

Per obiettivi o per situazioni territoriali particolari non vanno esclusi altri tipi di campionamento (lungo transetti per studi di gradiente, campionamento preferenziale, etc.).

In particolare, un campionamento preferenziale – spesso ingiustamente discriminato - può risultare adeguato:

1. quando l'obiettivo si limita alla descrizione della situazione in un'area molto circoscritta;
2. quando l'obiettivo richiede un'alta densità di campionamento in un'area con generale scarsità di biomonitori autoctoni (il che richiede un'accurata ed esaustiva esplorazione del territorio);
3. quando l'obiettivo è la comparazione di una serie di siti a rischio precedentemente individuati sulla base di altre informazioni (ad esempio misure derivanti da campionatori passivi o centraline);
4. quando l'obiettivo è un nuovo campionamento in un'area originariamente campionata in modo preferenziale, per evidenziare eventuali variazioni temporali.

Non esiste un metodo per stimare una densità di campionamento ottimale, valida per tutte le aree e per tutti gli obiettivi. Per stabilire la densità di campionamento vanno considerati questi fattori principali:

1. risorse disponibili (massimo numero possibile di punti-stazione);
2. caratteristiche geomorfologico-orografiche e climatiche dell'area di studio;
3. disponibilità e distribuzione spaziale di biomonitori autoctoni;
4. variabilità del dato nell'area di interesse, desumibile da evidenze pregresse o studi pilota;
5. informazioni sulle principali fonti di emissione, e sui tassi e modelli di dispersione di specifici inquinanti nell'ambiente.

La densità dei punti di misura può variare nell'ambito della stessa area, una densità maggiore può essere opportuna in aree geomorfologicamente irregolari o in parti del territorio con la maggior variazione geografica dei dati. In questi casi sarà opportuno eseguire:

1. in una prima fase un campionamento sistematico su scala più ampia;
2. l'elaborazione dei dati relativi a questo campionamento;
3. un ulteriore campionamento su scala più ridotta, nelle aree con la maggiore variazione geografica dei dati.





Gli studi di biomonitoraggio permettono densità di campionamento molto maggiori rispetto alle reti di rilevamento strumentale. In molti studi di bioindicazione con organismi sensibili a sostanze che hanno ampi patterns di diffusione atmosferica, una densità relativamente bassa può essere accettabile. **In studi di bioaccumulo, invece, vanno considerati i possibili tassi di dispersione di specifici inquinanti a partire dalle sorgenti di emissione.** I patterns di diffusione e trasporto della maggior parte degli inquinanti immessi in atmosfera da attività antropica, dipendono dalle dimensioni del particolato e dall'altezza dal suolo delle fonti, e spesso si esauriscono su aree ristrette: una scarsa densità di punti di misura può facilmente rivelarsi inadeguata.

## IL PIANO DI RICERCA

La scelta della tipologia del metodo di campionamento sarà determinata in base alle caratteristiche dell'area di studio, al tipo di sorgente emissiva e/o in base alla stima della massima accuratezza raggiungibile in relazione ai costi fissi (Elzinga et al., 2001).

Il gruppo di ricerca, ultimati gli studi preliminari e i necessari sopralluoghi di verifica, si riserva l'arbitrio di inserire in progetto il migliore e più idoneo sistema di biomonitoraggio/bioaccumulo, che potrà essere basato sull'utilizzo sia di licheni nativi, sia di trapianti lichenici che lichen-bags.

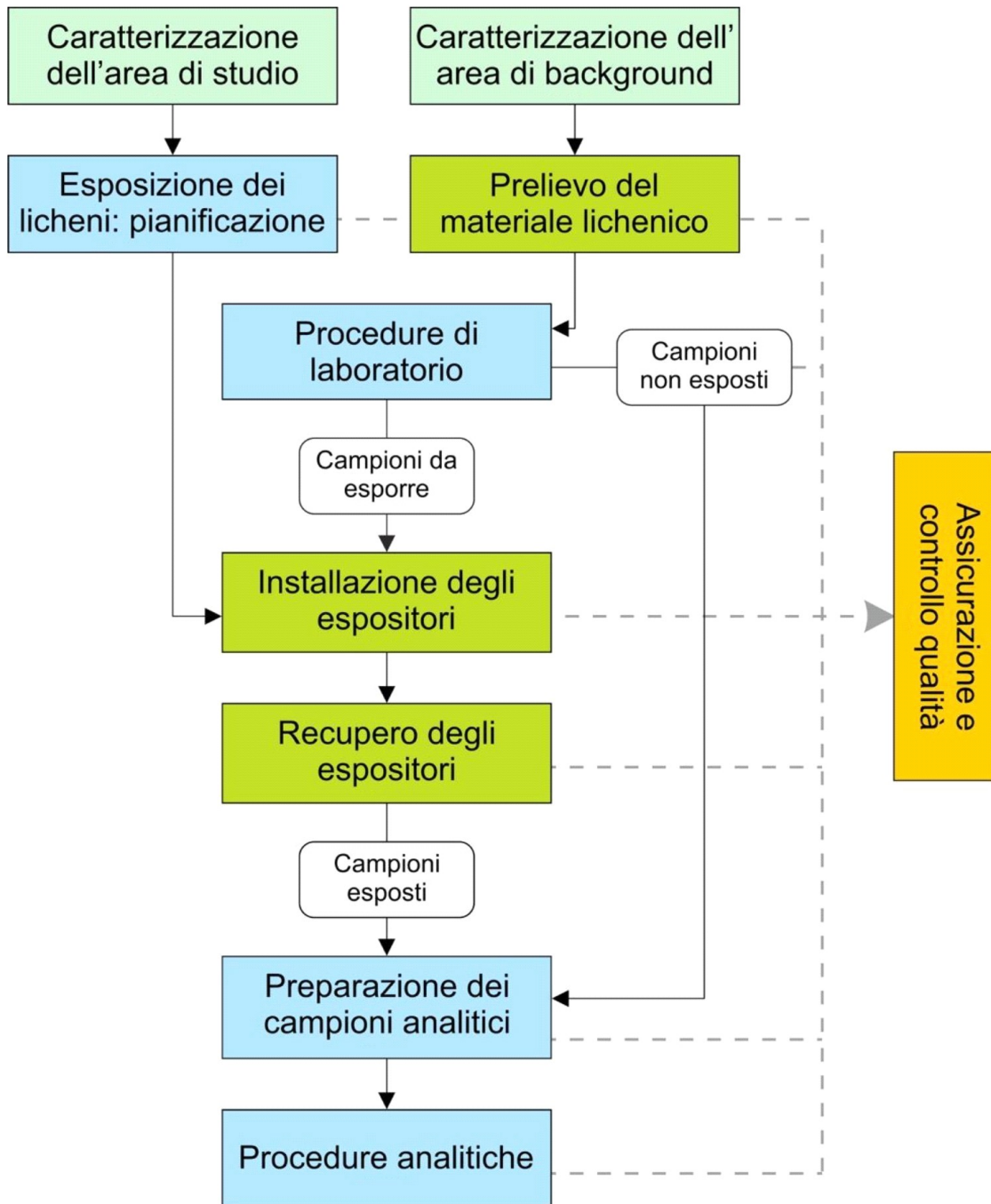
Allo stato attuale delle conoscenze, parrebbero non esserci le condizioni necessarie per avviare uno studio basato su Indici di Biodiversità/Naturalità (I.N.) (I.A.) Lichenica.

Per tale motivo, nel seguente elaborato, si svilupperà in modo particolare e dettagliato la metodica del BIOACCUMULO. Una volta ultimate le ricognizioni preliminari, volte a valutare se sia disponibile una quantità sufficiente di materiale lichenico delle specie selezionate, verificato il numero di alberi standard presenti, se confermata l'impossibilità nell'utilizzazione di licheni nativi, si adotterà la metodica della determinazione del: BIOACCUMULO DI ELEMENTI MEDIANTE TRAPIANTI LICHENICI.





Di seguito viene indicato il diagramma di flusso indicante le fasi di uno studio di biomonitoraggio mediante trapianti lichenici:



- Attività indoor / di campo
- Attività indoor / laboratorio
- Attività di campo

Diagramma di flusso delle fasi di uno studio di biomonitoraggio mediante trapianti lichenici.





## DISEGNO DI CAMPIONAMENTO

Nel metodo dei trapianti lichenici, i campioni vengono esposti nell'area di studio per un periodo di tempo definito seguendo un disegno di campionamento probabilistico definito a priori.

Al fine di ottenere un campionamento rappresentativo, le UC devono essere posizionate in base ad un piano d'indagine appropriato atto a minimizzare i tempi e i costi senza però perdere informazioni statistiche rilevanti. Per l'esposizione dei campioni lichenici nel dominio di studio è consentita qualsiasi strategia di campionamento probabilistico. Tra gli approcci più utilizzati e da noi sottoposti ad analisi, citiamo:

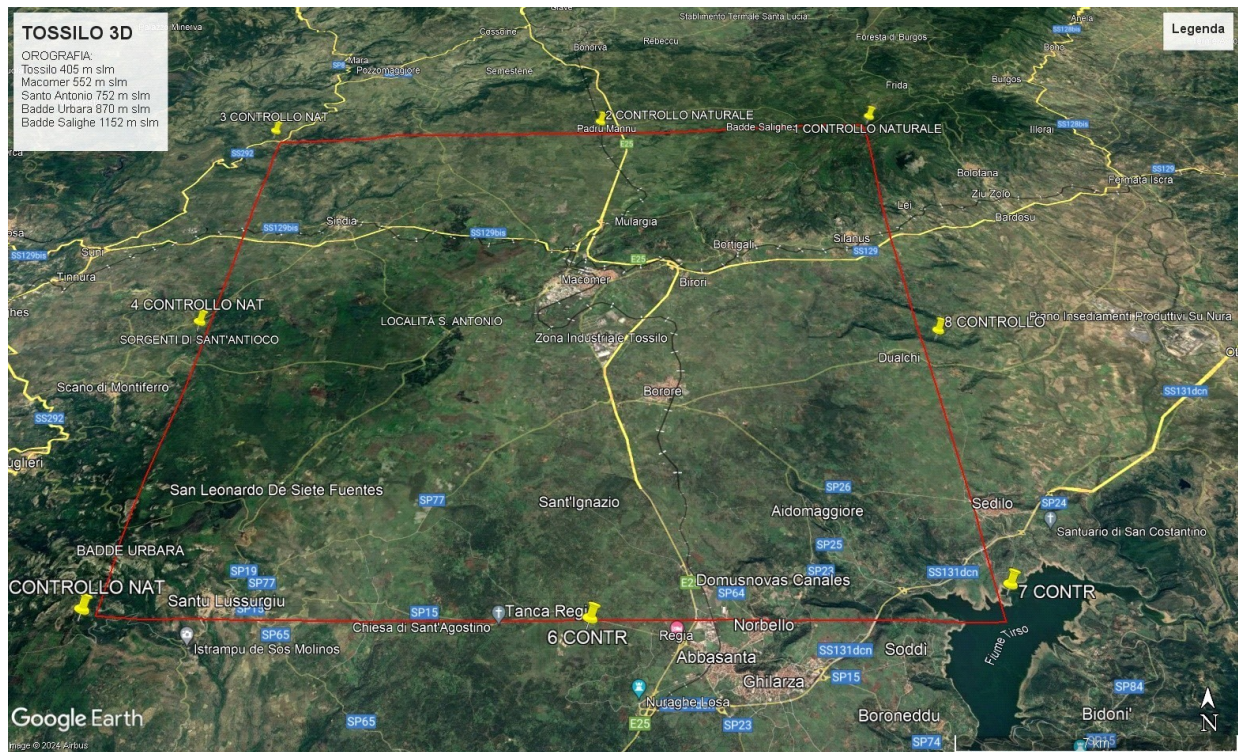
- il campionamento sistematico;
- sistematico lungo transetti lineari;
- casuale semplice;
- casuale stratificato;
- a grappoli.

I siti espositivi (cioè le Unità di Campionamento, UC) sono stati identificati attraverso una coppia di coordinate geografiche corrispondenti ai punti d'intersezione del grigliato, in alternativa, al centro di un plot circolare posto all'interno del quadrato (fig. n.??). Sia le UC che i relativi campioni dovranno essere catalogati con un codice di identificazione alfanumerico univoco.

La griglia di campionamento è stata progettata per consentire varie scelte sulla tipologia del metodo di campionamento, che sarà determinato una volta ultimato lo studio sulle caratteristiche dell'area, in base al tipo di sorgente emissiva (che sappiamo puntiforme) e/o in base alla stima della massima accuratezza raggiungibile in relazione ai costi fissi (Elzinga et al., 2001).

L'accurata analisi dei fattori climatici e microclimatici, con particolare riferimento ai venti dominanti e all'orografia, ha fatto ipotizzare la formazione di masse d'aria calda sull'altipiano di Tossilo che potrebbero risalire lungo i margini montuosi circostanti posti a N – NNE - SSW - W della piana, favorendo la diffusione degli inquinanti, vedi orografia





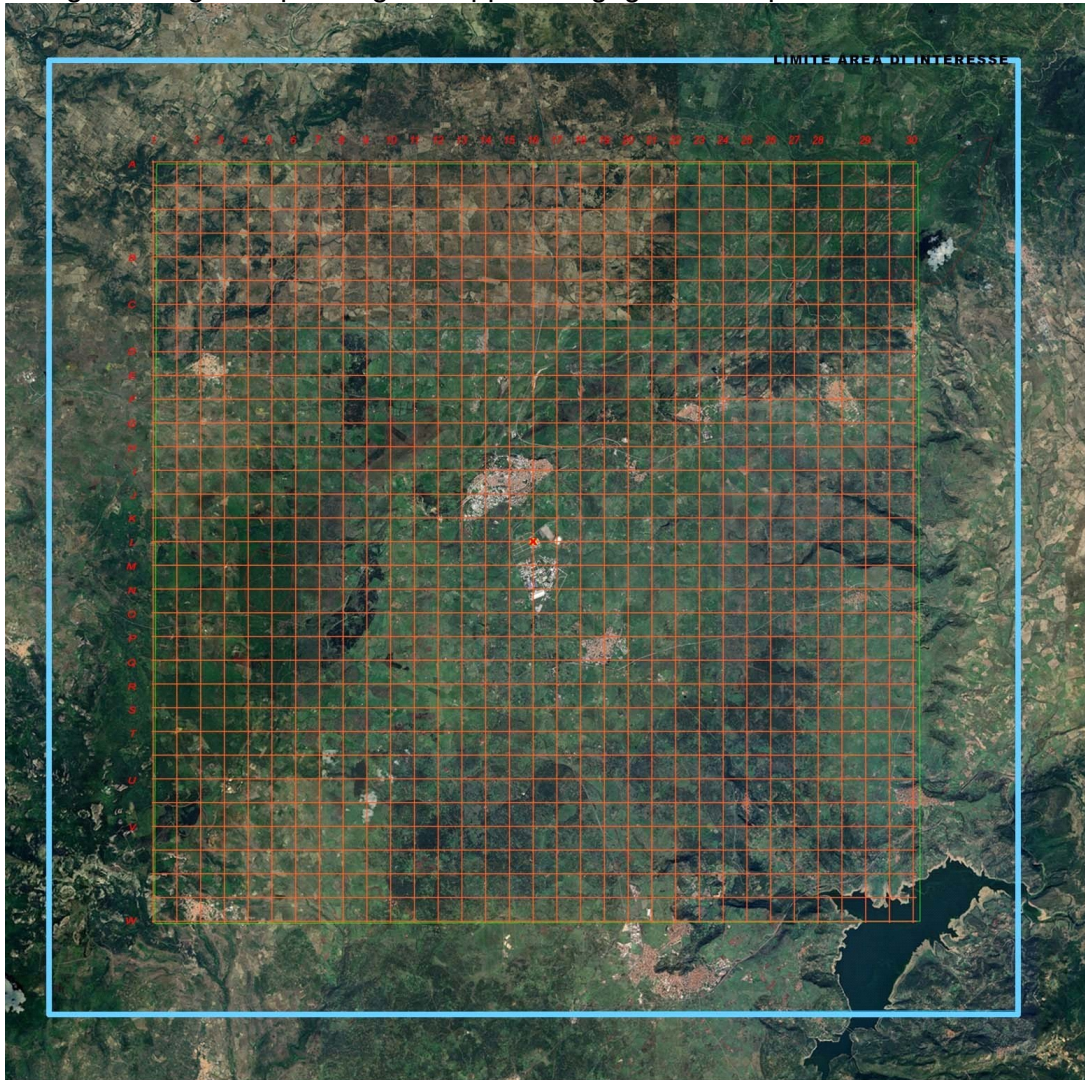
*Ortofoto 3D indicante l'orografia del territorio*

A tal fine, per poter rilevare ogni ipotetica variabile, la griglia di monitoraggio è stata dilatata ben oltre le aree di ricaduta degli inquinanti ottenute attraverso i modelli elaborati dal CINIGEO.





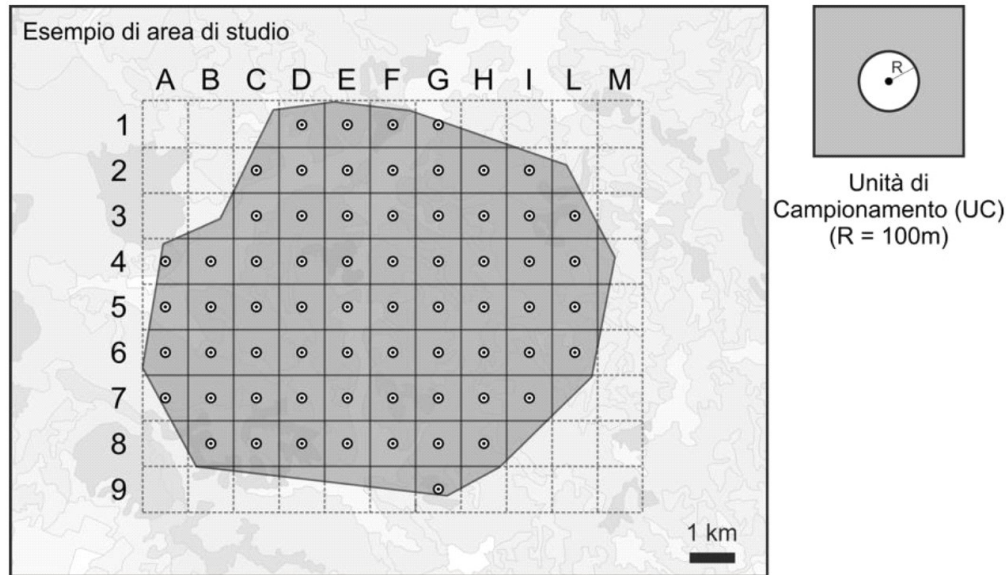
Di seguito vengono riportati gli sviluppi delle griglie di campionamento:



La soprastante fig. rappresenta una ortofoto satellitare che inquadra il territorio circostante l'area industriale di Tossilo - Macomer, con l'indicazione dei limiti dell'area di monitoraggio (quadrato verde), con lato di 24x24 km. In azzurro l'area d'interesse e "ipotetico controllo" con lato di 37x37 km.

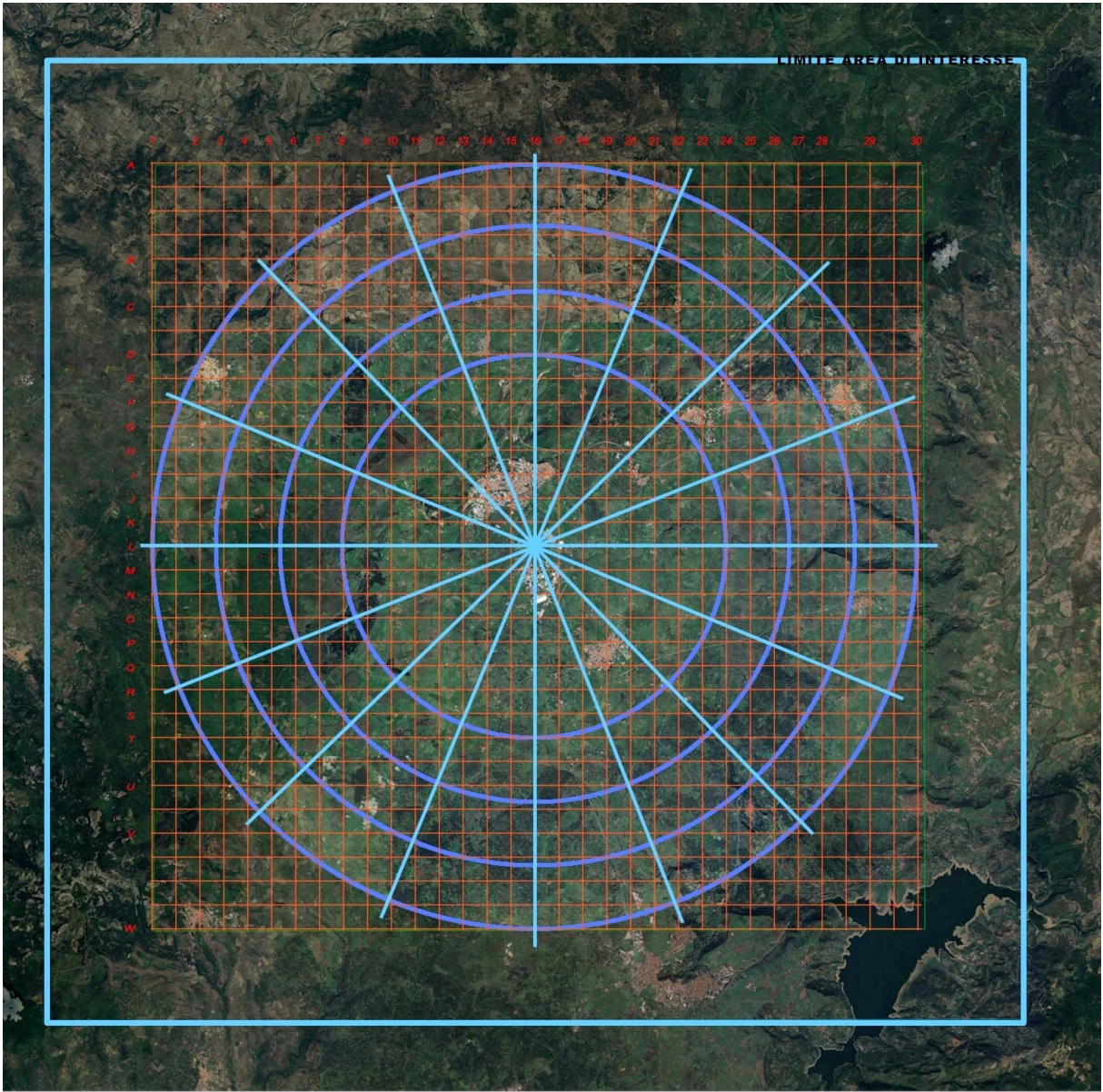
All'interno del quadrato verde, per suddividere l'area in UC, è stata inserita una griglia con linee perpendicolari distanti 0,750 km, centrate sul punto di emissione corrispondente al camino del termovalorizzatore, evidenziato in rosso in figura. Gli incroci delle linee nel grigliato identificano punti e delimitano aree quadrate, vedi fig. n. ??, che risultano essere identificate nello spazio e, conseguentemente, georeferenziate e utilizzate per l'identificazione delle UC. Tale grigliato consente l'esatto posizionamento geospaziale, nei punti di incrocio o al centro del quadrato, dei forofiti con gli espositori lichenici.





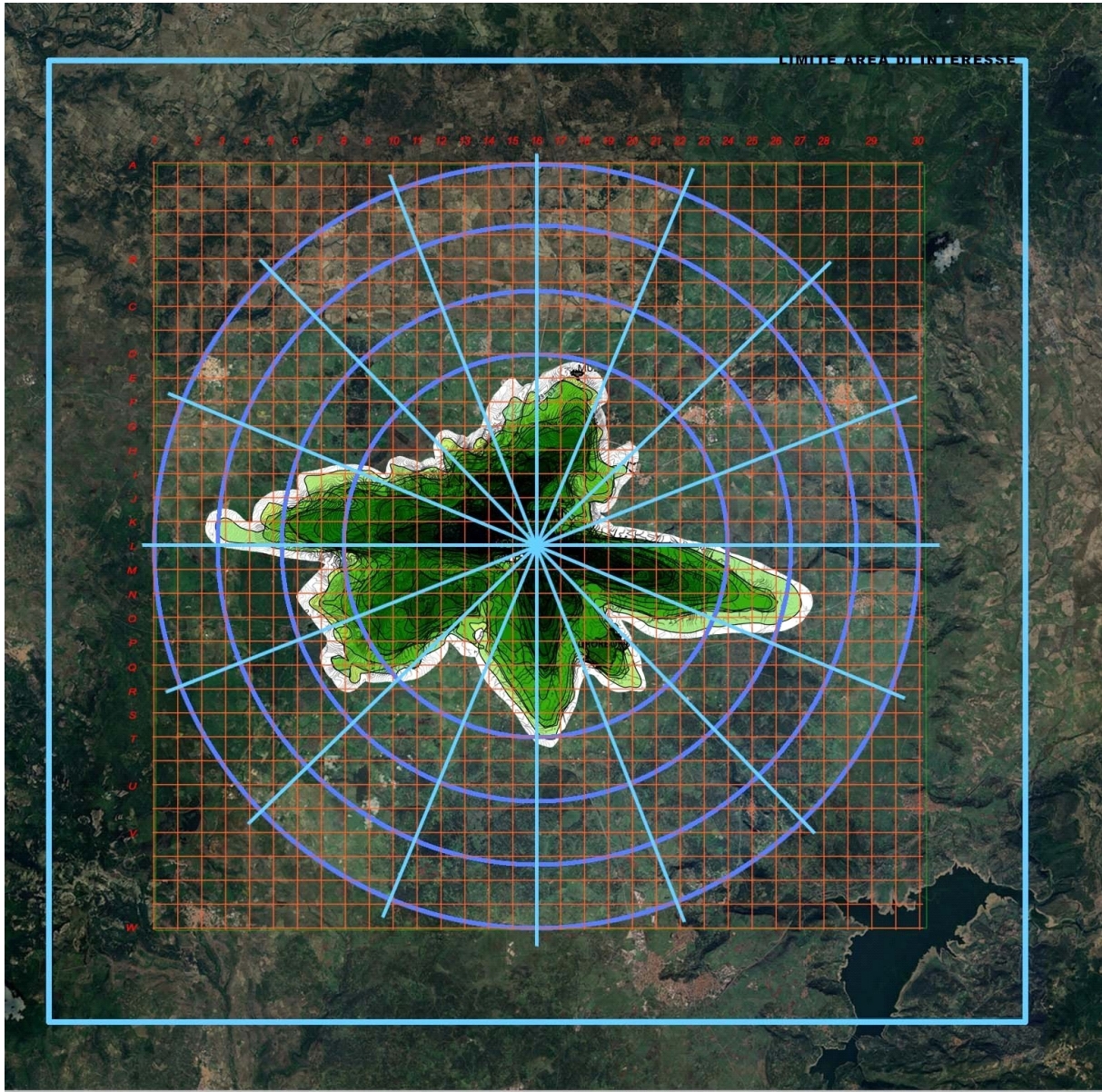
L'ortofoto seguente, rispetto all'immagine precedente è una sovrapposizione di quattro anelli concentrici distanti tra loro 2 km e centrati sul punto di emissione corrispondente al camino, con l'anello più esterno coincidente col perimetro dell'area di 24 km di lato. Tale elaborazione permette di allestire e utilizzare una metodica di *campionamento sistematico* lungo transetti lineari, evidenziati in celeste nell'ortofoto. La metodica consentirebbe di ridurre numericamente la sistemazione di forofiti artificiali in caso di assenza di quelli naturali, per posizionare biomonitors esterni all'area del modello di diffusione degli inquinanti.





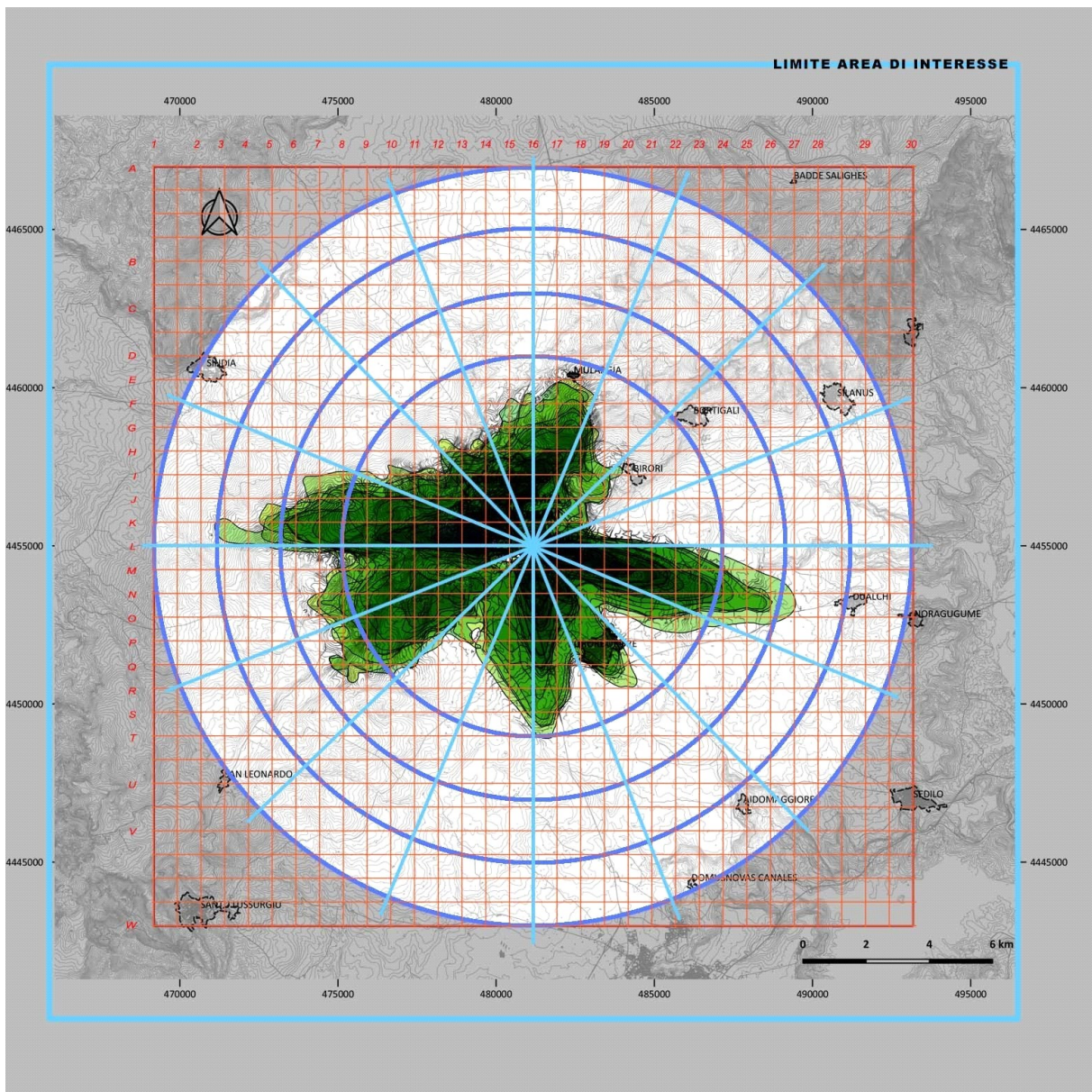
Nell’ortofoto sottostante, nella griglia delle UC sono state inserite le aree di ricaduta degli inquinanti ottenute dai dieci modelli di simulazione sulla diffusione degli inquinanti elaborati da CINIGEO.





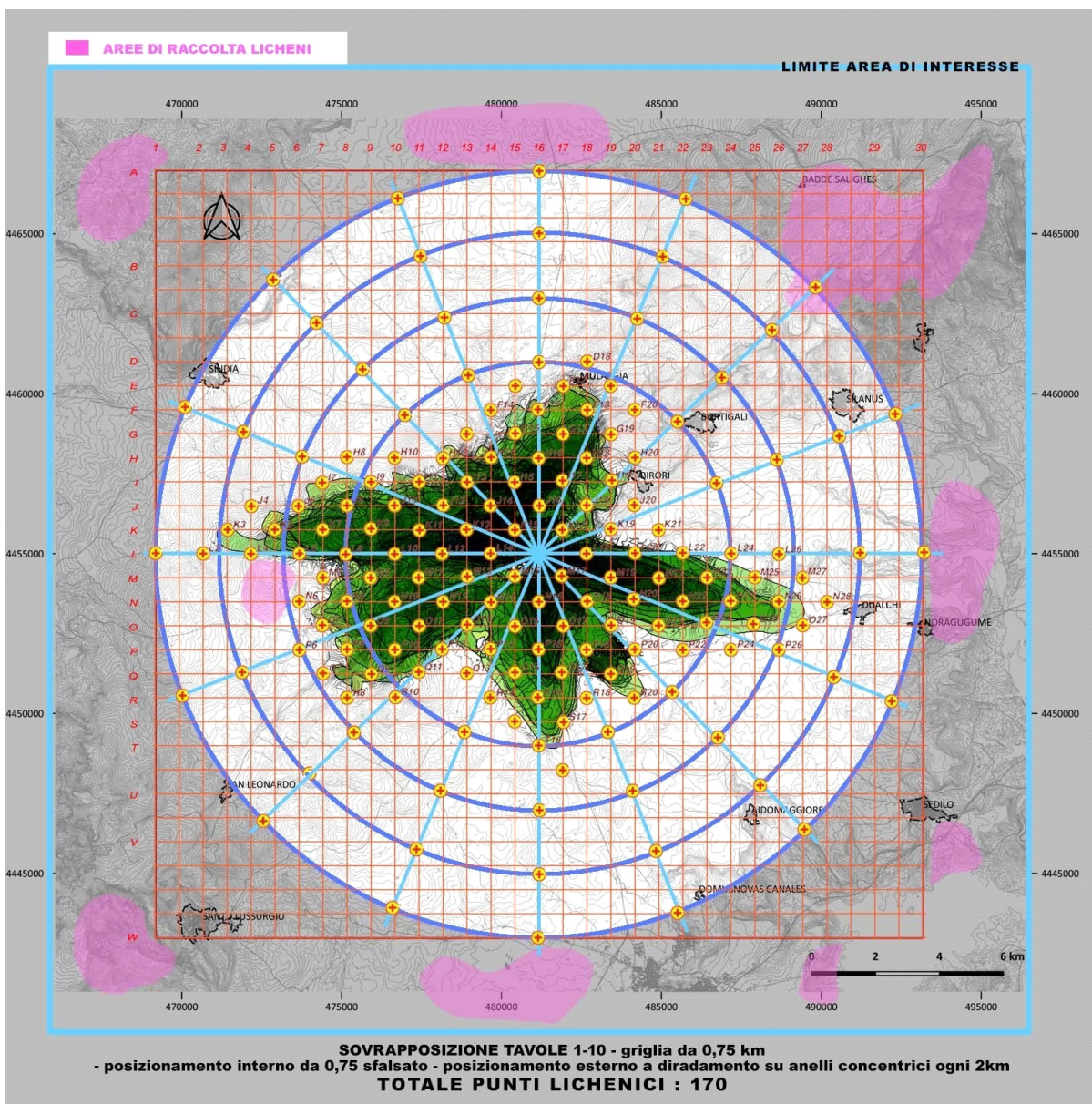
Sostituzione, nella immagine precedente, dell'ortofoto satellitare riportata in fig., con una mappa su base DBGT-RAS.





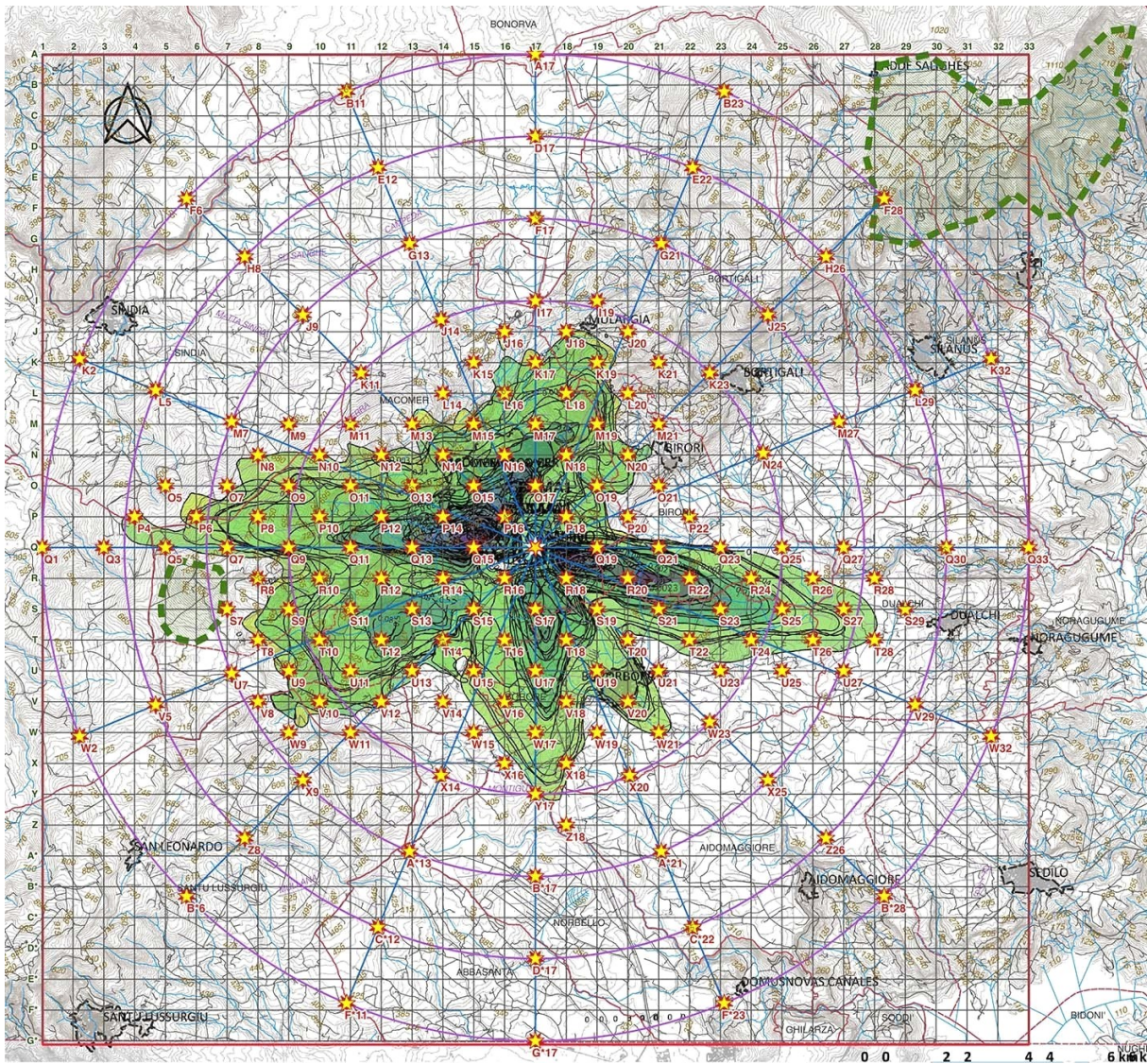
Di seguito si evidenzia il posizionamento, rispetto alle precedenti immagini, di 170 UC con i biomonitor, utilizzando i transetti radiali con distanza di 2 km per i punti esterni e i punti della griglia con distanza sfalsata da 1,5 km tra punti limitrofi sulle linee, corrispondenti a circa 1 km di distanza tra punti limitrofi lungo le diagonali della griglia.





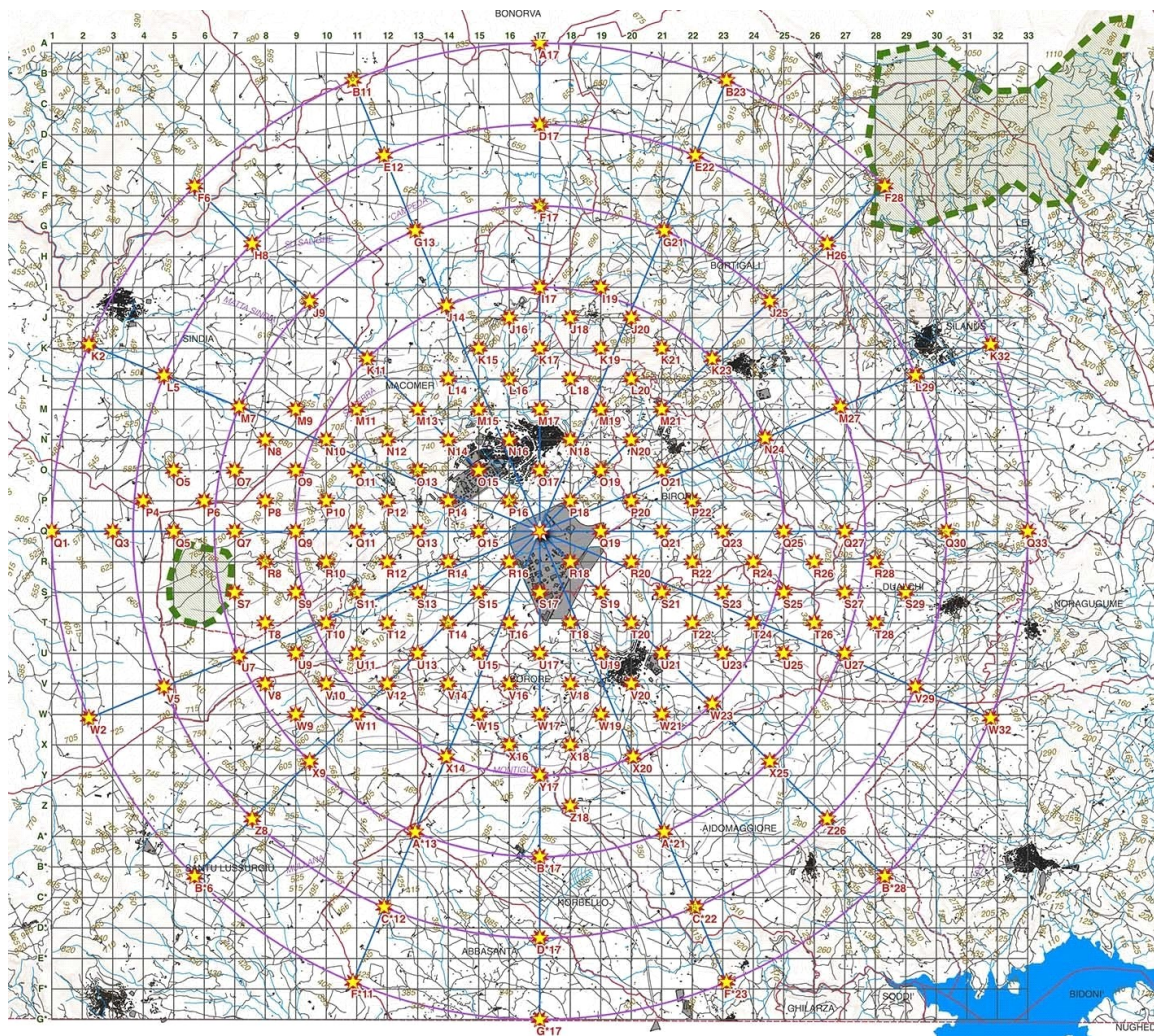
Mapa su base DBGT-RAS con posizione dei biomonitors e con le aree di simulazione diffusione inquinanti.





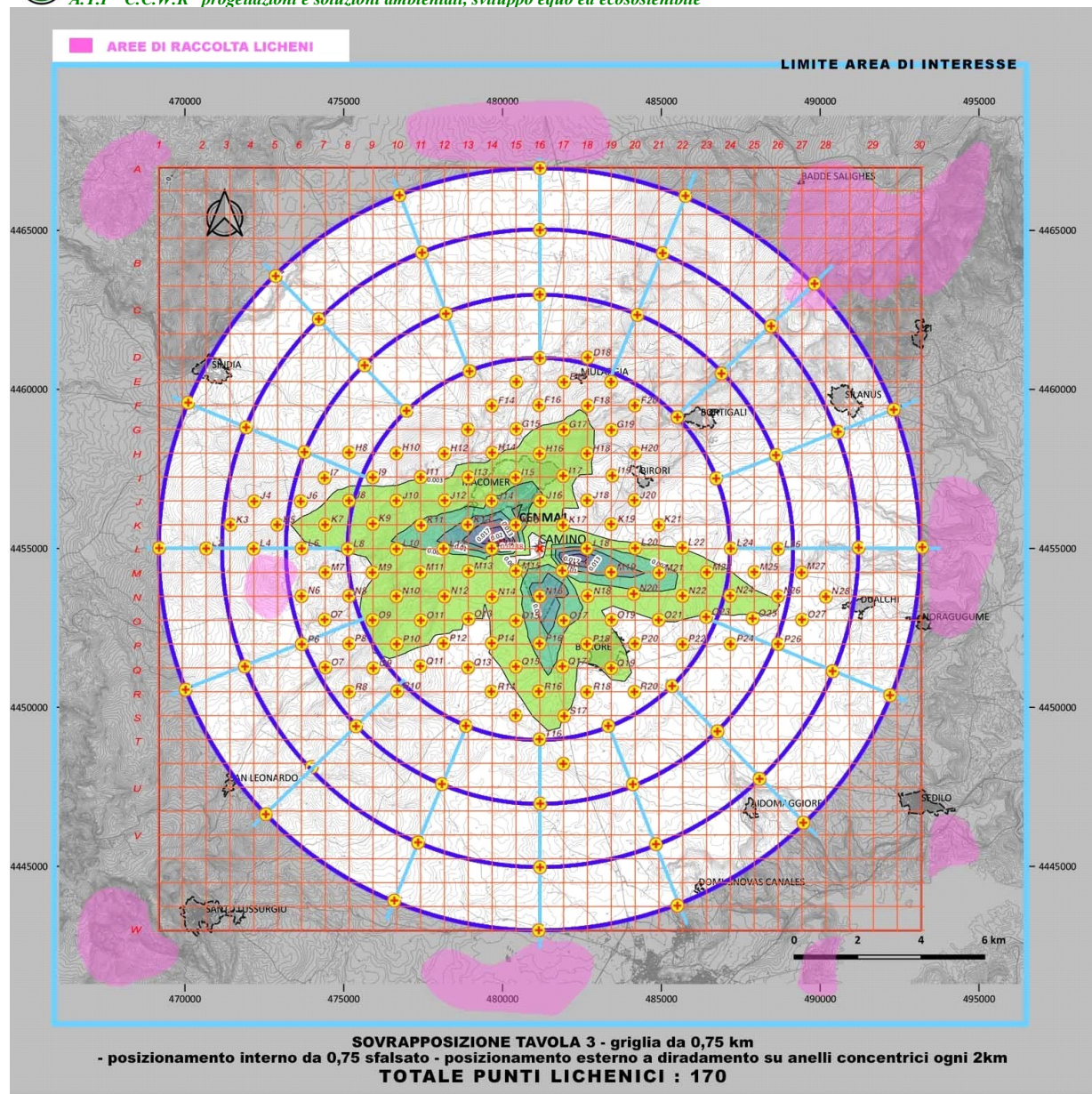
Di seguito la mappa su base DBGT-RAS con il posizionamento delle UC senza l'inserimento delle aree di simulazione sulla diffusione degli inquinanti elaborata da CINIGEO





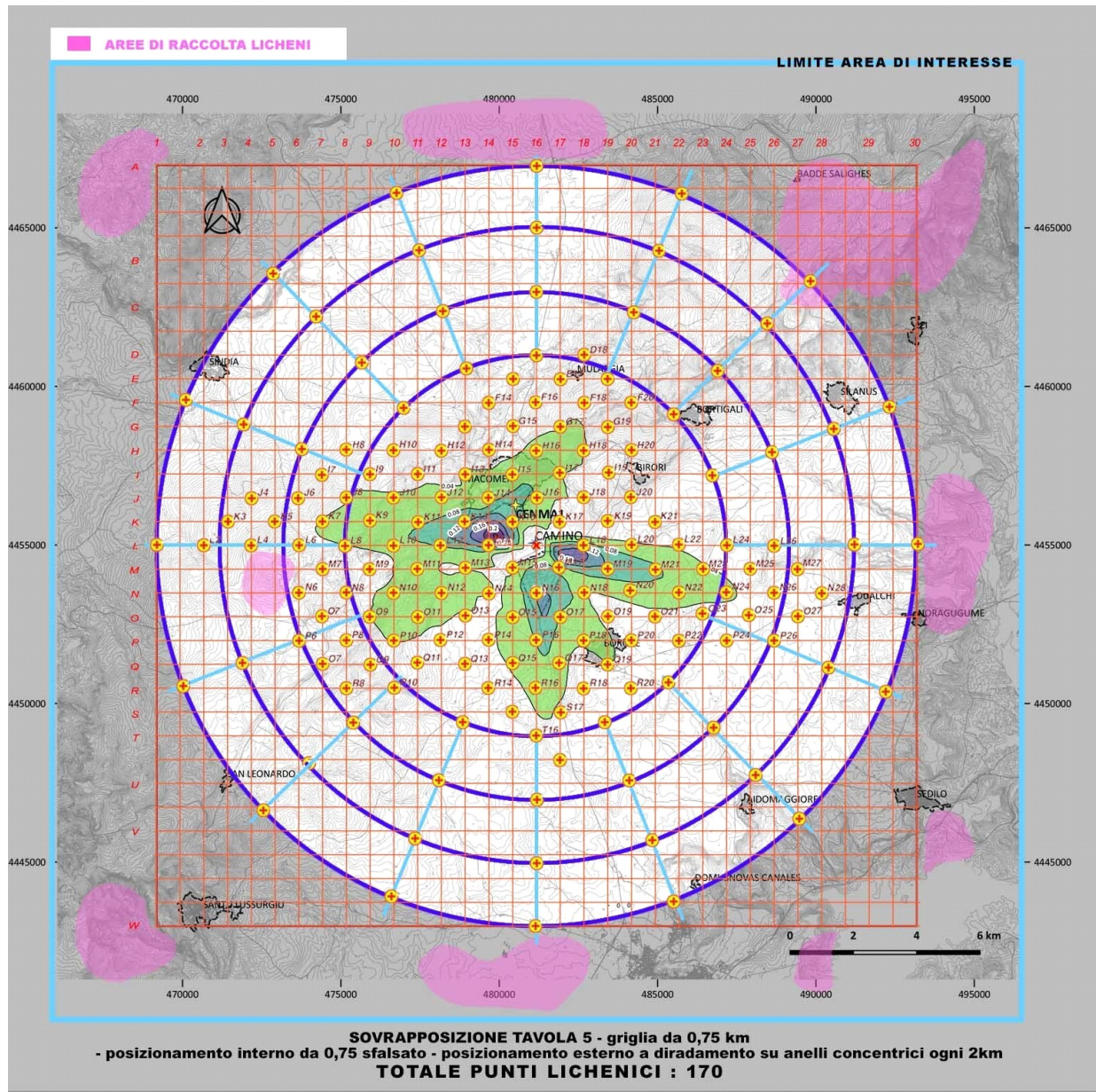
Di seguito vengono rappresentate le elaborazioni cartografiche sulla distribuzione geografica delle UC in relazione ai modelli di ricaduta dei vari inquinanti:





Elaborazione cartografica sulla distribuzione geografica delle UC in relazione al modello di ricaduta della SO<sub>2</sub> - valori medi annui





Elaborazione cartografica sulla distribuzione geografica delle UC in relazione al modello di ricaduta degli NO<sub>x</sub> - valori medi annui





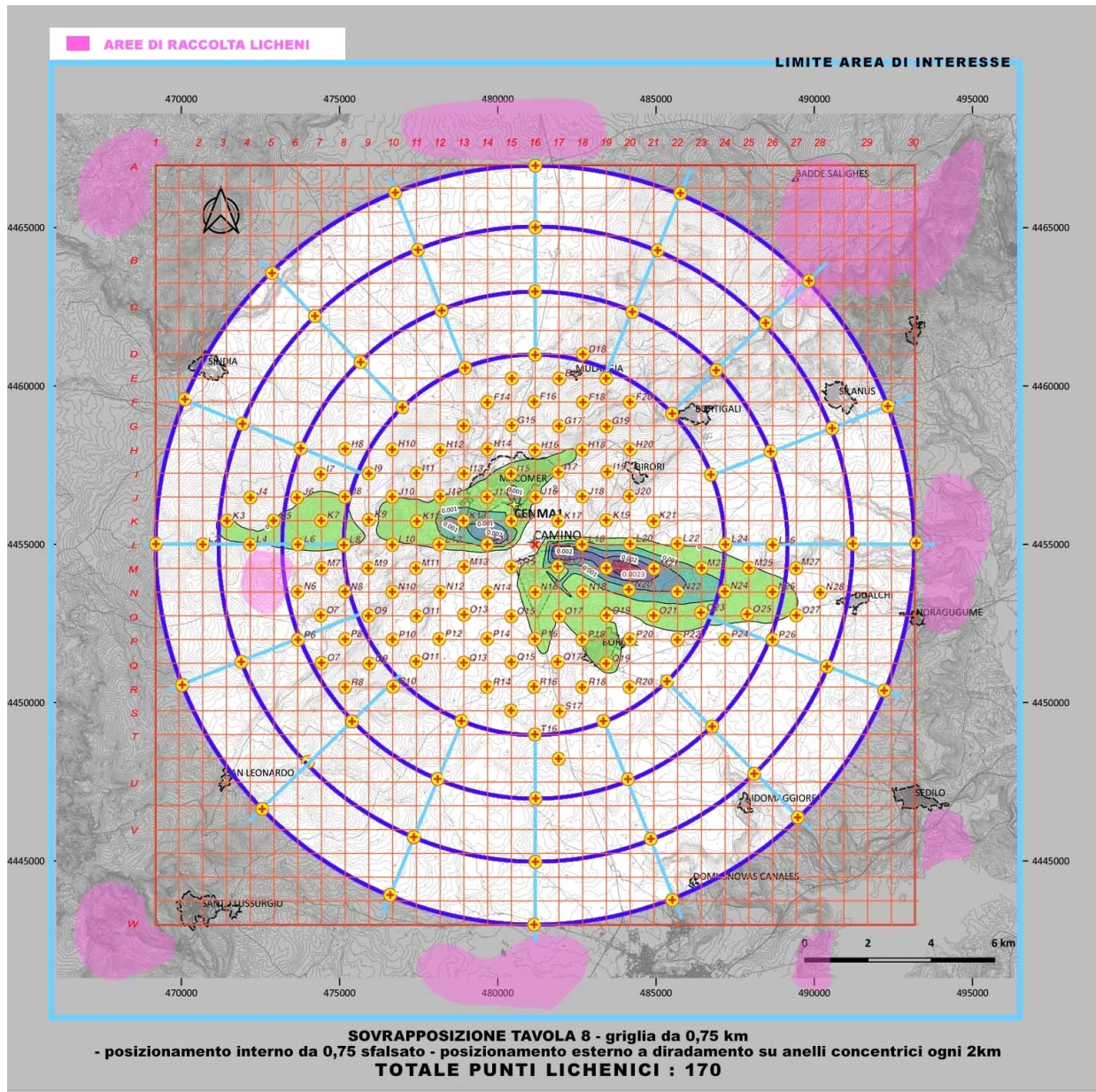
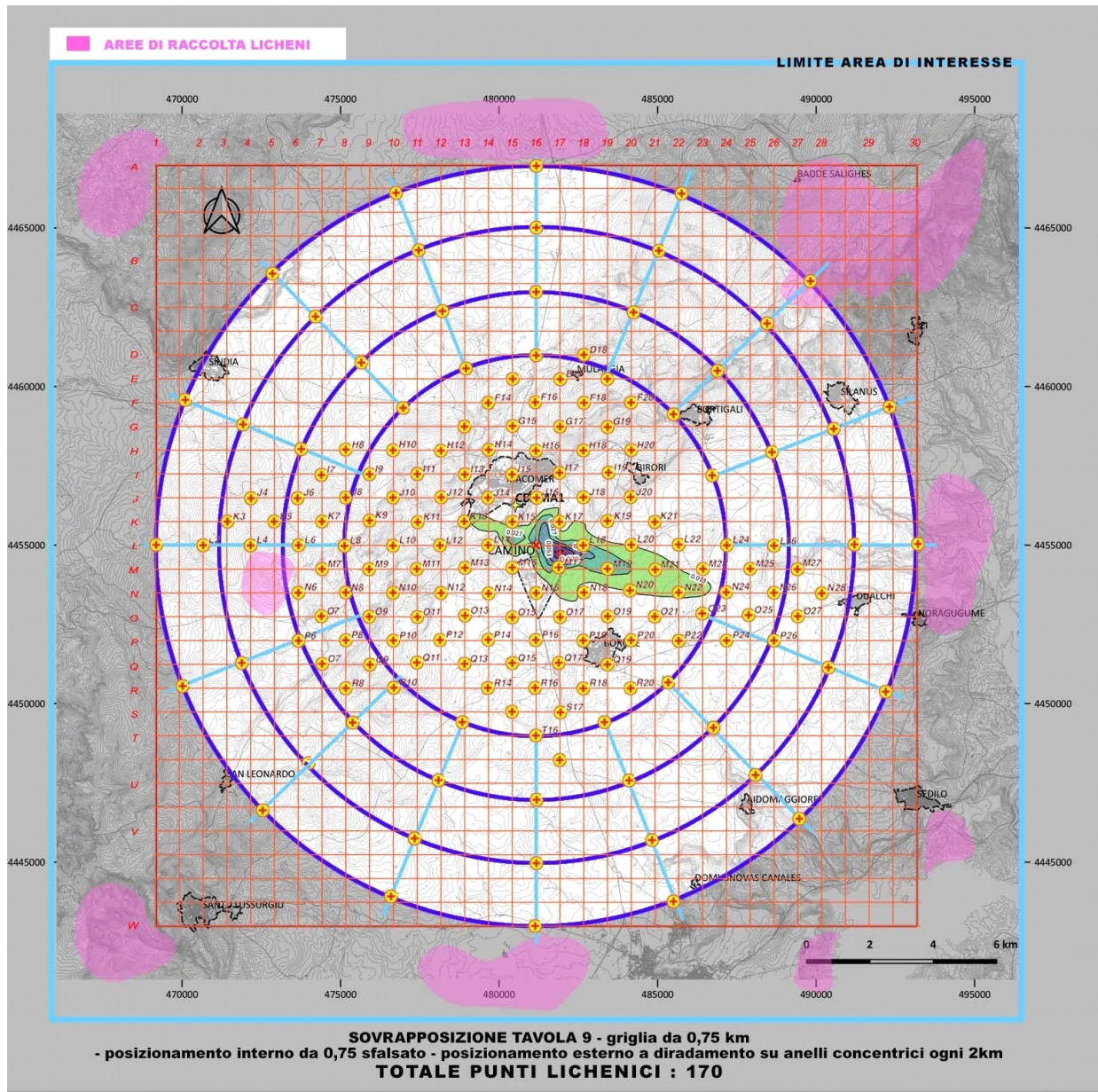


Fig.  
N.???

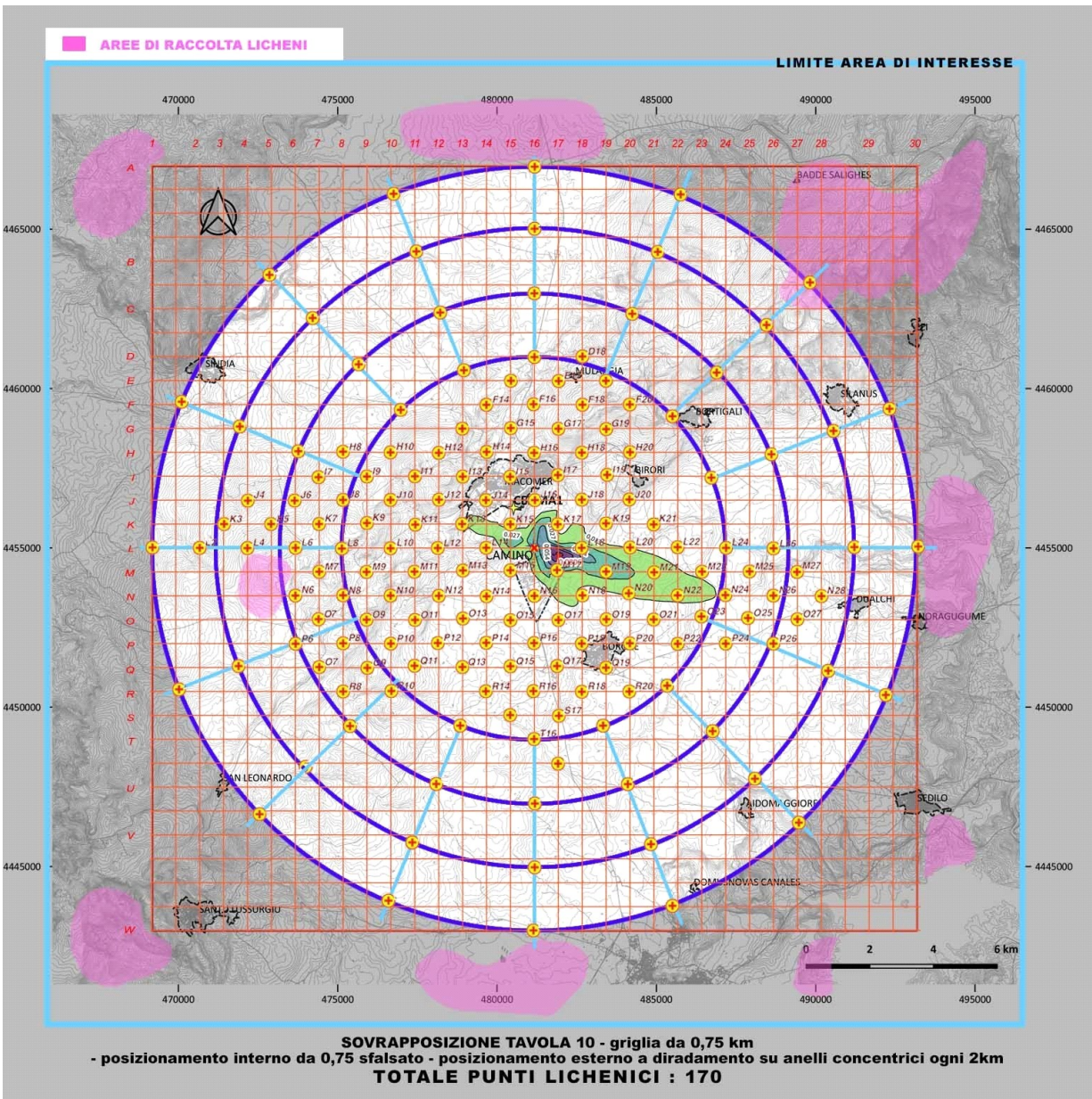
Elaborazione cartografica sulla distribuzione geografica delle UC in relazione al modello di ricaduta dei PM10 – deposizione secca - valori medi annui





Elaborazione cartografica sulla distribuzione geografica delle UC in relazione al modello di ricaduta dei PM10 – deposizione umida - valori medi annui





Elaborazione cartografica sulla distribuzione geografica delle UC in relazione al modello di ricaduta dei PM10 – deposizione secca e umida - valori medi annui





## RACCOMANDAZIONI PER L'ESPOSIZIONE DEI CAMPIONI NELLE UC

In ogni UC dovranno essere esposti almeno tre campioni lichenici. Un campione corrisponde ad un certo numero di talli utili all'ottenimento di un'adeguata massa per l'esecuzione delle analisi di laboratorio. I talli necessari per un campione possono essere trapiantati tal quali o assicurati ad un espositore. Qualora si utilizzino degli espositori, un singolo espositore deve supportare un numero di talli utile alla costituzione di un singolo campione, perciò per esporre tre campioni in una UC, saranno necessari tre espositori.

In una UC i campioni (o gli espositori con i campioni) dovranno essere installati su supporti di campo, che possono essere alberi o supporti artificiali (p. es. lampioni o supporti appositamente costruiti). In ogni caso i campioni dovranno essere posizionati tra i 2 e i 4 m dal suolo, lontano da possibili fonti micro-contaminanti (p. es. grondaie, tetti e cavi elettrici); la metodologia di esposizione dovrebbe inoltre essere conservata per tutta la campagna di monitoraggio, garantendo perciò l'uso di un unico tipo di supporto (alberi o supporti artificiali), una sola tipologia di espositore e un'altezza da terra costante. L'orientamento cardinale (N, S, O, E) dei campioni o degli espositori sui loro supporti di campo deve essere determinato attraverso un processo di randomizzazione. Qualora i supporti naturali o artificiali scarseggino in una UC, i campioni lichenici dovranno comunque essere posizionati ad una distanza minima di 3 metri l'uno dall'altro. Nel caso in cui si utilizzino i rami degli alberi come supporto, i campioni potranno essere esposti sia all'interno che all'esterno della chioma. **TEMPI DI ESPOSIZIONE**

I campioni dovranno essere esposti per un periodo compreso fra le 8 e le 16 settimane. La settimana deve essere sempre e comunque usata come unità di base per la quantificazione della durata dell'esposizione. Nel caso di monitoraggi ripetuti, la durata dell'esposizione dovrà essere mantenuta costante.

### INFORMAZIONI AGGIUNTIVE

Si raccomanda caldamente di raccogliere informazioni riguardanti le condizioni meteorologiche dell'area sottoposta alla campagna di monitoraggio, le concentrazioni di inquinanti, rilevate da apposite centraline di monitoraggio ubicate in prossimità dell'area, prima e durante la campagna di biomonitoraggio, poiché potrebbero essere d'aiuto all'interpretazione dei patterns di bioaccumulo. **CARATTERIZZAZIONE**

### DELL'AREA DI BACKGROUND

L'area di background dovrebbe essere più omogenea possibile sotto il profilo ecologico e ambientale. La caratterizzazione ambientale dell'area sarà realizzata tramite una ricognizione preliminare in campo e mediante mappe tematiche di uso del suolo, vegetazione, copertura arborea, clima, altitudine (modelli digitali di elevazione) e litologia. Inoltre, andrà valutata la presenza di specie licheniche particolarmente sensibili all'inquinamento atmosferico per fornire ulteriori evidenze dell'assenza di fenomeni importanti di contaminazione.

### SPECIE LICHENICHE IDONEE PER L'ESPOSIZIONE

Benché ai fini delle attività di biomonitoraggio possano essere utilizzati sia licheni epifiti fogliosi che fruticosi, si raccomanda l'utilizzo di licheni fruticosi poiché tale forma di crescita assicura una quantità maggiore di materiale per tallo lichenico rispetto alle specie fogliose. Inoltre, i licheni fruticosi sono più semplici da pulire, selezionare e installare sugli espositori, perciò il loro utilizzo in genere riduce i tempi di processamento e incrementa l'omogeneità dei campioni e l'accuratezza dei dati (Wolterbeek & Bode, 1995).







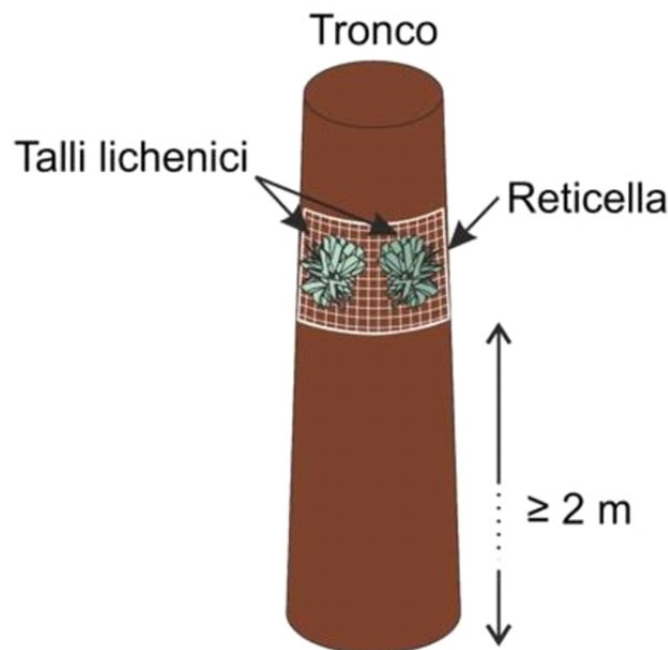
Poiché le varie specie licheniche possono differire per contenuto elementare di background e per capacità di accumulo nella composizione di base degli elementi inglobati, nell'ambito di ciascuno studio si dovrà utilizzare una sola specie di lichene.

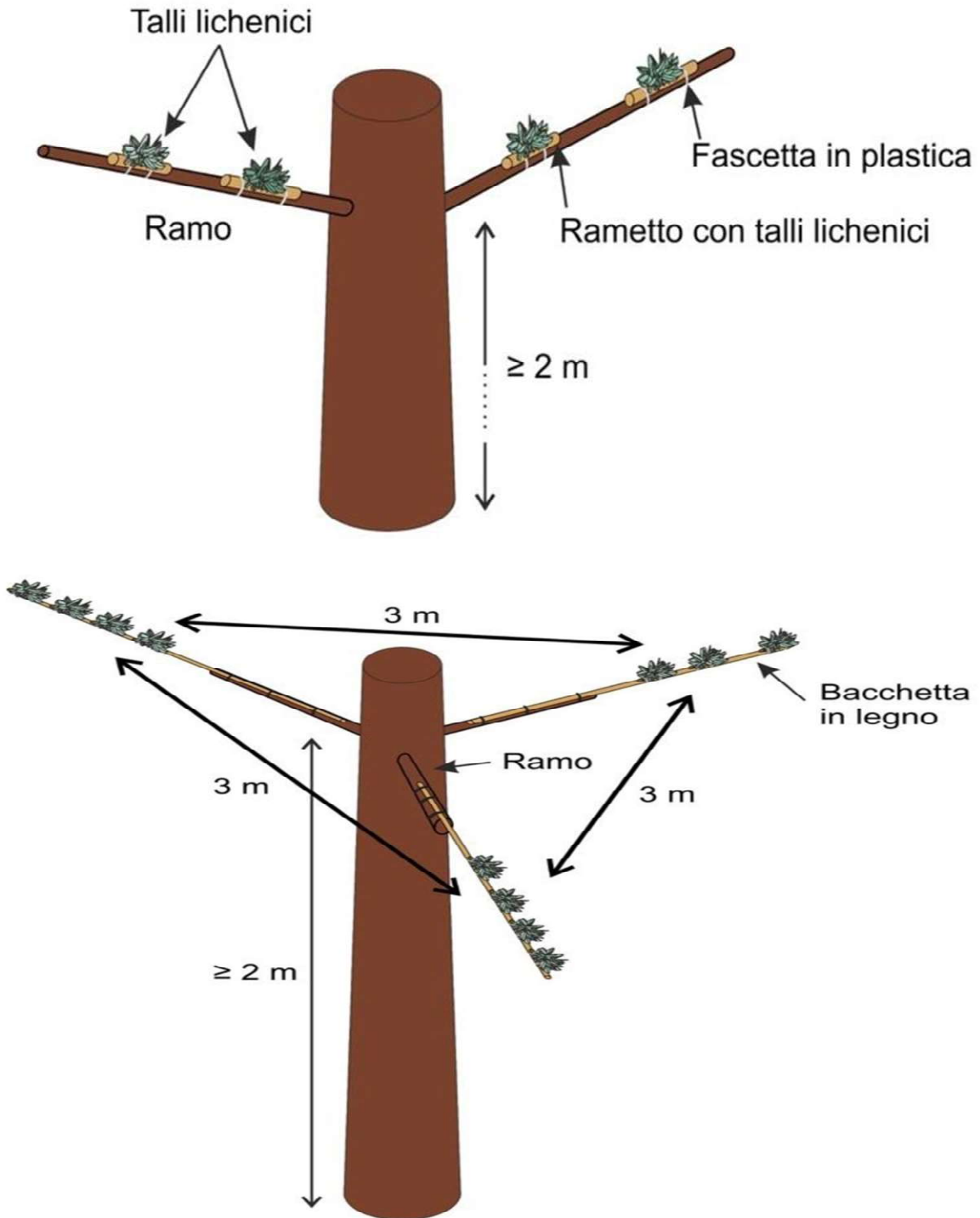
### **PROCEDURE PER LA RACCOLTA DEI CAMPIONI LICHENICI DA SOTTOPORRE A ESPOSIZIONE**

I talli lichenici devono essere prelevati sulla corteccia di tronchi o rami di alberi in buona salute o su substrati non marcescenti. Gli alberi individuati per i prelievi devono avere un portamento eretto o con inclinazione sub-verticale. Per incrementare l'omogeneità del campione e per evitare una contaminazione terrigena, i talli devono essere raccolti sugli alberi al di sopra di 100 cm dal suolo e, quando possibile, selezionando una singola specie arborea substrato. Deve essere evitata la raccolta di talli su nodi, parti di tronco danneggiate o decorticate, così come su parti parassitate da funghi o insetti. Non è inoltre consentito raccogliere contemporaneamente i talli da rami e tronchi, poiché posizioni diverse sull'albero possono influenzarne la composizione elementare (Adamo et al., 2008).

I talli devono essere prelevati usando diversi strumenti e precauzioni in base alla forma di crescita della specie target.

### **ESEMPI DI ALLESTIMENTO DI FOROFITI PER L'ESPOSIZIONE DEI TRAPIANTI LICHENICI**







Rappresentazioni schematiche e foto di campioni lichenici trapiantati su tronchi o rami di alberi

In fede di scienza e coscienza. Villacidro, giugno 2024.

ph.D Francesco Aru      Dott..geol.Daniele Tomasi

