



Commissione Comunità Europee



Officine Galileo



Comunità Montana Elba e Capraia

T. Mazzoni

L. Chiarantini

M. Ferrari



**APPLICAZIONE DELLE TECNICHE DI
TELERILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO
AMBIENTALE**

UN CASO DI STUDIO SULLA DISCARICA RSU DI LITERNO (ISOLA D'ELBA)

PREFAZIONE

Il telerilevamento rappresenta una tecnologia di grande attuale importanza per il monitoraggio dell'ambiente (valutazione delle risorse, controllo dei processi biofisici, rilevamento di condizioni di inquinamento, classificazione delle strutture, etc.)

In particolare, il telerilevamento può contribuire in modo determinante alla sorveglianza ambientale, sia in ambienti naturali che alterati dalla azione dell'uomo.

Nel presente lavoro vengono presentate le problematiche relative al controllo di discariche di rifiuti solidi urbani (RSU), ove avvengono delicati processi di produzione di biogas e possono emergere veri e propri rischi ambientali.

In particolare viene illustrato l'uso di un sistema infrarosso per il monitoraggio di discariche RSU, capace di rilevare anomalie termiche ed eventuali principi di incendio ed effettuare "mappature" del flusso di biogas.

Viene infine presentato il programma MedSPA relativo al monitoraggio termico della discarica di Literno (Isola d'Elba), con descrizione dei risultati sperimentali ottenuti in diverse campagne di misura.

Il lavoro rappresenta un contributo interessante ed innovativo nell'ambito della sorveglianza ambientale mediante tecniche di rilevamento e può essere utile per applicazioni in ambito nazionale ed europeo.

**PROF. VITO CAPPELLINI
PRESIDE FACOLTÀ DI INGEGNERIA
FIRENZE**

L' "Ambiente" oggi è una palestra dove tutti si sentono in dovere di imporre le proprie opinioni portando allo sviluppo di dibattiti che si distinguono solo per gli accesi toni, conducendo purtroppo, e assai spesso, a valutazioni e interpretazioni non corrette.

Consapevole che i dibattiti sono comunque importanti per le esatte definizioni delle problematiche, questa Comunità Montana ritiene che senza un serio rapporto con l'ambiente, soprattutto quando questo viene interessato da altri grandi temi, qual è quello dello smaltimento dei rifiuti, tutto resta mero esercizio filosofico se non si fa riferimento a ricerche serie sviluppate su fondamenta di certissima analisi.

Sulla base di questi concetti, infatti, la Comunità Montana ha favorito, unitamente alla Commissione delle Comunità Europee e delle Officine Galileo, lo studio attento di un caso significativo come l'impianto di smaltimento RSU di Litterno, che si trova nel cuore del tanto dibattuto Parco dell'Arcipelago, con la convinzione che solo l'impegno attento e scientifico di uomini al di fuori di diaframi astratti porti a chiarire realmente quale può e deve essere un serio rapporto tra l'uomo e l'ambiente circostante e quali siano gli strumenti più validi applicabili anche ad altri settori per valutarne l'impatto.

Angiolo Giusti

Assessore della Comunità Montana
dell'Elba e Capraia

Il progetto a cui fa riferimento la presente pubblicazione, data l'interdisciplinarietà dei temi affrontati, è stato realizzato grazie alla cooperazione di più gruppi di lavoro ognuno dei quali operante con una particolare competenza specifica nel campo dell'analisi e del monitoraggio ambientale.

In particolare per l'assistenza tecnica fornita nel corso delle campagne di misura si ringraziano l'Ing. Alberto Viti, i P.I. Paolo Baroni, Marco Panerai, Silvano Margutti e Vincenzo Benvenuti della Divisione Sistemi Ambiente e Territorio della Officine Galileo di Firenze.

Per quanto riguarda gli aspetti di carattere radiometrico e di modellistica fisica si ringraziano l'Ing. Stefano Fini, il Dott. Peter Coppo ed il P.I. Silvio Gagliani della Fondazione Scienza per L'Ambiente di Firenze.

Per la gentile collaborazione offerta in relazione alle operazioni di analisi del biogas prelevato presso la discarica di Literno si ringraziano il Dott. Grechi e la Dott. Pagliai dei laboratori della USL 10/A di Firenze.

Si ringrazia infine il personale della Comunità Montana dell'Elba e Capraia per l'assistenza logistica, la consulenza topografica e per aver fornito i dati cartografici necessari per la calibrazione del sistema di monitoraggio.

Questo lavoro è dedicato ai lavoratori della Divisione Sistemi Ambiente e territorio della Officine Galileo di Firenze, esempio toscano di un serio impegno di carattere industriale nel campo della protezione ambientale e della riconversione delle tecnologie militari ad impieghi civili, con l'auspicio che la sua eredità venga raccolta da un soggetto più consapevole e partecipe delle problematiche ambientali.

Gli Autori

— *L'impianto di smaltimento RSU di Literno, oggetto del presente studio, è stato realizzato nel 1988 dal Commissario "ad Acta" Roberto Daviddi, nominato con decreto del Presidente della Regione Toscana.*

Daviddi, su vari progetti (Ing. Barducci e Arch. Ferrari) ha curato i successivi interventi, l'ultimo dei quali, in attesa della realizzazione dell'impianto definitivo di Buraccio i cui lavori sono in procinto di essere consegnati, ha portato all'installazione di un impianto di pressatura e depurazione del percolato, che rappresentano l'esempio tra i più avanzati in Toscana dal punto di vista economico e di correttezza di trattamento RSU nel rispetto ambientale.

— *L'impianto di Literno dal novembre 1988 al dicembre 1994 è stato gestito dalla ditta F.lli Carpinacci di Campo nell'Elba, la quale ha fornito assistenza e dato la propria disponibilità nella fase di ricerca e analisi ai curatori della presente pubblicazione.*

1. IL TELERILEVAMENTO PER LO STUDIO DI PROBLEMATICHE AMBIENTALI

1.1 Il telerilevamento dell'ambiente

Per affrontare l'urgenza e l'attualità di una vasta gamma di problematiche ambientali sta acquistando sempre più importanza ed interesse il *telerilevamento* (TLR). Con questo termine ci si riferisce ad un procedimento di misura che consente di raccogliere informazioni sulla superficie terrestre mediante un sensore *remoto*, cioè privo di contatti materiali con il mezzo osservato. Il meccanismo più frequentemente utilizzato per far ciò è la misura dell'energia elettromagnetica emessa o riflessa dalla superficie osservata nelle differenti regioni spettrali del visibile, dell'infrarosso o delle microonde.

Il TLR costituisce un metodo di indagine che coinvolge molte discipline, ma quando si tenta di darne una definizione sintetica si presta facilmente ad affermazioni generiche ed imprecise. Diremo perciò che il TLR consiste nella *raccolta di informazioni sulla superficie terrestre per mezzo di sensori fotografici, elettro-ottici o a microonde, installati su piattaforma aerea o satellitare.*

Un aspetto interessante dei più recenti sviluppi delle tecniche di TLR è rappresentato dall'impiego integrato dei dati ottenuti da sensori operanti in diverse bande spettrali, per una più corretta caratterizzazione dei mezzi osservati.

Per mezzo del TLR è possibile effettuare indagini su scenari di grande estensione per valutare qualitativamente o quantitativamente parametri fisici o caratteristiche del territorio difficilmente apprezzabili con tecniche puntuali (vedi tabella 1).

Tabella 1**Alcune applicazioni del telerilevamento allo studio di problematiche ambientali**

GEOLOGIA	analisi strutturale classificazione litologia vulcanologia monitoraggio aree franose
IDROLOGIA	stima umidità del terreno risorse idriche esondazioni manto nevoso
AGRICOLTURA	censimento delle colture condizioni idriche stato sanitario previsioni di produzione
FORESTE	stima della biomassa condizioni sanitarie detezione stress idrico e fitopatie detezione incendi boschivi deforestazione
CARTOGRAFIA	carte tematiche mappe topografiche urbanizzazione desertificazione
CONTROLLO ZONE COSTIERE	erosione detezione sostanze inquinanti detezione fonti inquinanti mappatura posidonie pesca
BENI CULTURALI e ARCHEOLOGICI	detezione di strutture sepolte stato alterazione materiali lapidei analisi strutture murarie
PROTEZIONE CIVILE	stima danni calamità naturali monitoraggio rischio vulcanico individuazione dispersi in mare monitoraggio incendi
ENERGIA	stima dissipazione calore da edifici e impianti stima consumi energetici in area urbana stima produzione biogas
CONTROLLO DEL TERRITORIO	realizzazione mappe di uso del suolo monitoraggio discariche RSU detezione discariche abusive detezione inquinanti in acque interne

Altri aspetti specifici di questo metodo riguardano la sistematicità delle riprese, l'automatizzazione dei metodi di elaborazione e l'ampiezza dell'area

esplorata *istantaneamente* (ad es. decine di migliaia di Km² per osservazioni da satellite).

Per tali peculiarità i dati acquisiti da TLR offrono la possibilità di approfondire la conoscenza di molti fenomeni che si manifestano su vasta scala e forniscono un prezioso contributo alla sorveglianza dell'ambiente e alla gestione delle risorse naturali. Informazioni globali e tempestive su raccolti, incendi o eventi catastrofici, possono avere un'importanza decisiva.

Ad esempio i problemi legati al dissesto idrogeologico e alla salvaguardia delle risorse idriche richiedono una sorveglianza metodica della condizione dei bacini, del degrado terrestre, marino ed atmosferico, sia esso causato dall'uomo o da eventi naturali (quali alluvioni, incendi, eruzioni vulcaniche, etc.); tale compito può essere attuato tramite tecniche di TLR nelle quali vengono impiegati sensori che, in funzione della particolare applicazione e della scala del problema, possono operare da piattaforma terrestre, aerea o anche da satellite.

A titolo di esempio nella Foto 1 è riportata una immagine in falso colore relativa al Golfo di Portoferraio (Isola d'Elba), ottenuta dalla combinazione delle bande 7 (rosso), 4 (verde) e 1 (blu) del satellite LANDSAT.

Rispetto alla piattaforma satellitare dal punto di vista operativo l'aereo ha il vantaggio di permettere indagini più dettagliate, ha un'ottima flessibilità di impiego, può intervenire rapidamente e ripetere le osservazioni più volte al giorno. Servizi di TLR sono operativi in Canada, U.S.A. e U.R.S.S., ma anche in Europa esistono società di servizio in grado di effettuare riprese multispettrali anche con sensori radar. In particolare sul territorio italiano sono attivi numerosi gruppi che operano nel campo del TLR sia a livello industriale che di istituti di ricerca.

Per quanto detto il TLR si presenta come lo strumento ideale per contrastare l'imprevedibilità di certi fenomeni, naturali o meno: infatti se da un lato può *allertare* opportuni sistemi di controllo fornendo precise informazioni in tempo reale su aree molto estese, dall'altro può agire come *previsore*, grazie alla sua capacità di seguire su vasta scala l'evolversi dei processi.

Con queste prerogative le tecniche di TLR stanno quindi assumendo un ruolo sempre più importante sia nell'ambito della protezione ambientale che nelle applicazioni civili in genere.

1.2 Fondamenti fisici del TLR ed estrazione dell'informazione

I dati acquisiti da TLR sono ottenuti rivelando l'energia elettromagnetica emessa o diffusa dalla superficie terrestre in varie bande dello spettro elettromagnetico, che si estende dai raggi γ e x (di lunghezza d'onda dell'ordine di 10^{-6} μm) alle più lunghe onde radio (dell'ordine di 10^6 m).

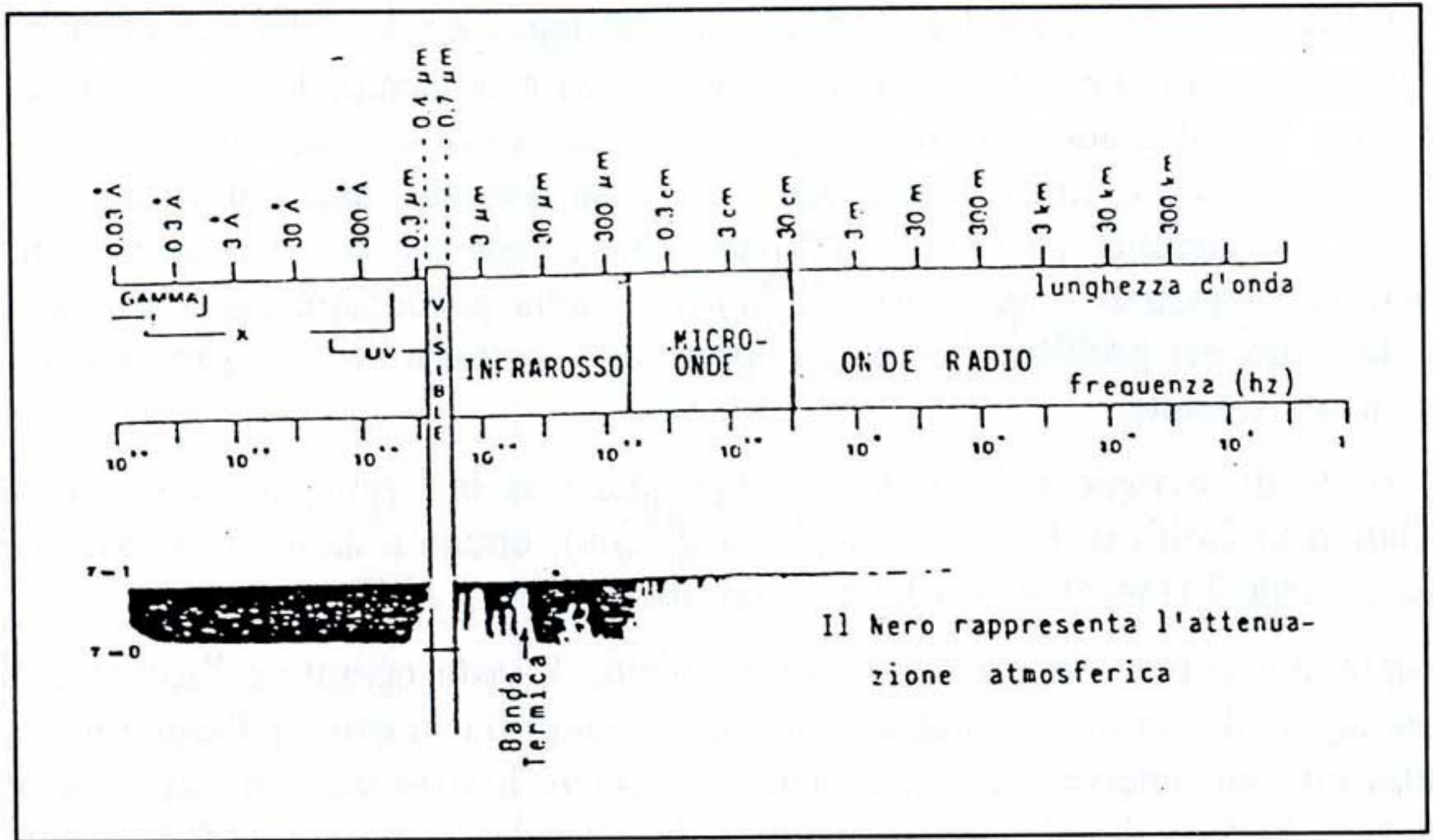


Figura 1 Spettro della radiazione elettromagnetica con le regioni di assorbimento

Mentre le emissioni di raggi γ o x provengono dal nucleo o dai livelli elettronici più interni all'atomo, a lunghezze d'onda maggiori la radiazione è dovuta a vibrazioni e rotazioni molecolari o a variazioni dei campi elettromagnetici.

Nel TLR si utilizzano, in generale, due regioni spettrali principali:

- la regione ottica comprende le bande del visibile e dell'infrarosso corrispondenti rispettivamente agli intervalli di lunghezza d'onda $0.40 \div 0.70 \mu\text{m}$ e $0.70 \div 100 \mu\text{m}$
- la regione delle microonde corrispondente alle lunghezze d'onda da 1 mm fino a 30 cm.

L'energia che incide su un sensore di TLR dipende dalle caratteristiche spettrali del mezzo osservato, dall'atmosfera e, se il sensore è attivo, dalle caratteristiche della sorgente artificiale che illumina il corpo osservato.

Nell'intervallo spettrale del *visibile* (VIS) e del *vicino infrarosso* (NIR), compreso tra 0.4 e 3 μm , la radiazione solare è in parte riflessa ed in parte assorbita dalla superficie terrestre.

Generalmente il comportamento spettrale dei materiali è diverso a seconda che essi siano solidi o liquidi. Nella maggior parte dei solidi l'assorbimento ha luogo all'interno di uno strato superficiale dello spessore di pochi micron; attraverso l'acqua la radiazione nella banda VIS può penetrare anche per decine di metri (in condizioni di bassa torbidità) mentre quella in banda NIR viene assorbita, approssimativamente, come nei solidi.

Per questo motivo le informazioni di TLR che si possono ottenere nel VIS e nel NIR, generalmente ottenute misurando la radiazione solare diffusa dagli oggetti osservati, si riferiscono soltanto alla superficie dei solidi o allo strato superficiale dell'acqua.

Al contrario, nella regione dell'*infrarosso termico e lontano* (TIR) i sensori di TLR rivelano l'energia emessa naturalmente per effetto termico dai corpi osservati fornendo una misura della loro temperatura superficiale.

Nella regione delle *microonde* (MW), invece, la radiazione emessa o riflessa può essere correlata con alcune caratteristiche fisiche macroscopiche dei mezzi osservati.

Le microonde presentano una profondità di penetrazione maggiore rispetto alla banda ottica e in pratica costituiscono l'unico mezzo per indagare le caratteristiche sub-superficiali dei materiali (biomassa vegetale, umidità del suolo, spessore dei ghiacci, equivalente in acqua della neve).

Riguardo all'atmosfera, c'è da osservare che essa attenua fortemente tutta la radiazione γ , x e UV, mentre è trasparente nel visibile e, salvo alcune bande, presenta ancora un assorbimento molto elevato nella regione dell'infrarosso.

La propagazione dell'energia elettromagnetica nelle varie bande dipende dalle condizioni meteorologiche. Le nubi infatti assorbono fortemente la radiazione visibile e infrarossa, fino alle onde millimetriche ($\lambda < 1 \text{ cm}$), mentre influenzano molto meno la propagazione delle microonde. Questo fatto rappresenta il motivo principale per il quale è necessario disporre di sensori a microonde quando si richiede una operatività indipendente dalle condizioni meteorologiche.

Per risolvere il problema dell'estrazione e dell'interpretazione del segnale registrato dal sensore di telerilevamento si fa ricorso a varie tecniche di correzione ed elaborazione dati per eliminare effetti spuri ed esaltare il contenuto informativo. Tali tecniche si basano in primo luogo sulle conoscenze teoriche e sperimentali delle:

- variazioni spettrali
- variazioni spaziali
- variazioni temporali

del segnale proveniente dai mezzi osservati. Mediante l'uso di dati ausiliari, modelli e tecniche di estrazione del segnale, si può incrementare l'informazione ricevuta.

L'estrazione dell'informazione sulla base delle caratteristiche spettrali, è fondata sulla ripetizione delle misure di uno stesso parametro a diverse frequenze, e sul fatto che oggetti diversi hanno, in genere, una diversa risposta (o firma) spettrale.

La risposta spettrale di un materiale è influenzata dalla condizione fisica della sua superficie, dalle condizioni atmosferiche e dalla risposta stessa del sensore, ed è quindi molto arduo riuscire a individuare dei criteri di normalizzazione assoluti. Ad ogni modo si può affermare che gli *algoritmi di classificazione* basati sulla risposta spettrale hanno dato dei buoni risultati e vengono normalmente usati.

Infatti la risposta spettrale varia con la lunghezza d'onda λ . Ad esempio per il terreno, la vegetazione e l'acqua, l'andamento nelle bande VIS e NIR la risposta spettrale ha l'andamento mostrato in Fig. 2 (a). Queste tre superfici, per loro natura così diverse, possono essere discriminate più efficientemente realizzando un diagramma nel quale si riporti la risposta a lunghezza d'onda λ_1 in funzione di quella ottenuta a lunghezza d'onda λ_2 , come è mostrato in Fig. 2 (b).

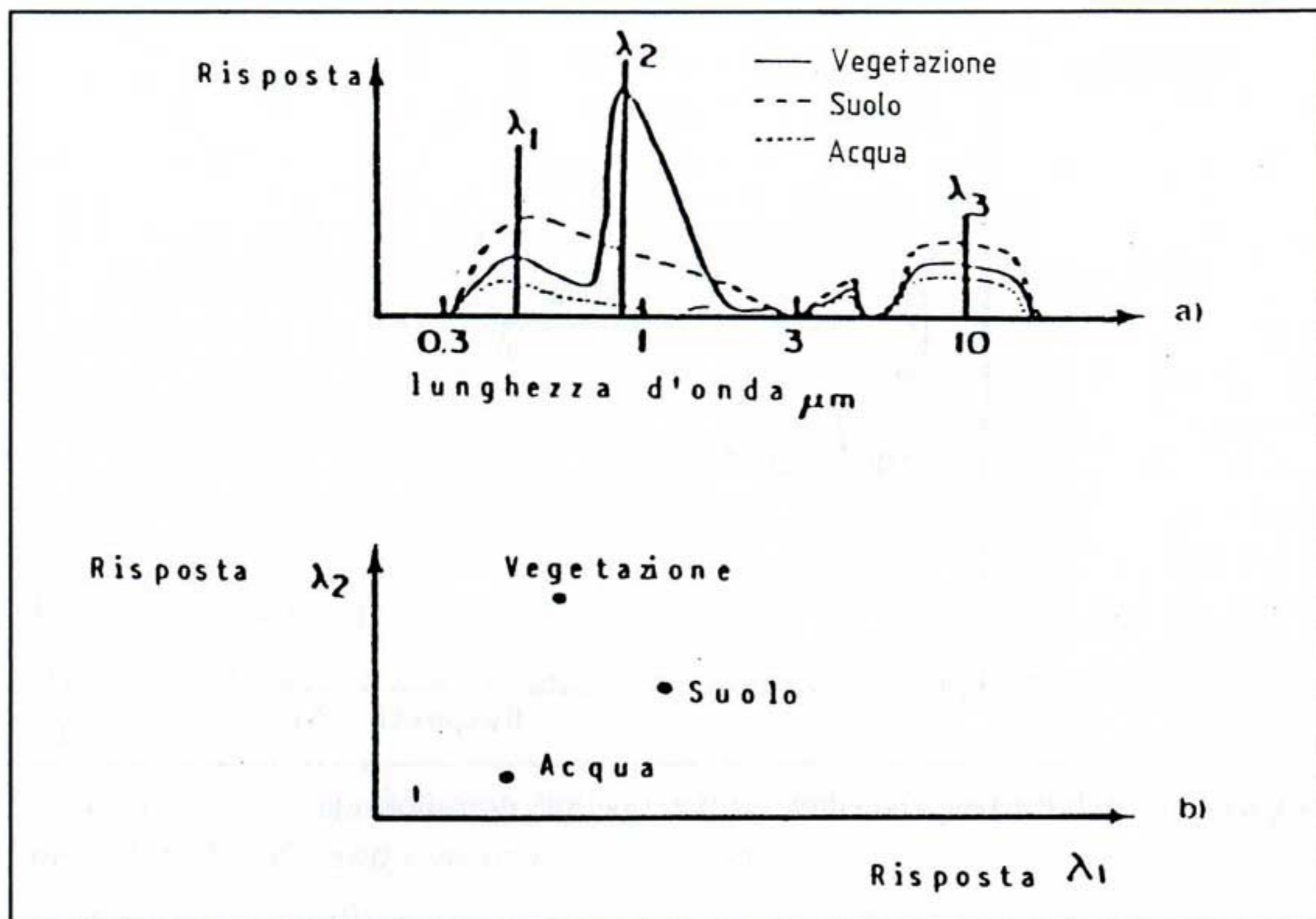


Figura 2 Risposta spettrale di varie superfici naturali al variare della lunghezza d'onda

Nel caso invece di superfici meno differenziate tra loro, le cui risposte spettrali in un certo istante sono simili, è solo effettuando osservazioni ripetute nel tempo (multitemporali) a differenti lunghezze d'onda (multispettrali) che si ottengono i risultati migliori.

Ad esempio le risposte spettrali del mais e della soia in un riferimento (λ_1, λ_2), sono separabili soltanto in determinati periodi del ciclo di crescita (Fig. 3).

Sulla base di questi criteri e dell'approccio scelto per l'interpretazione dei dati da TLR, quantitativo o qualitativo, si giunge quindi alla stima e al riconoscimento delle caratteristiche dei mezzi osservati.

Nel primo caso, quantitativo, viene indagata la relazione tra energia elettromagnetica misurata e parametro d'interesse. Nel secondo caso, qualitativo, particolarmente indicato per applicazioni operative di tipo inventariale, vengono impiegate tecniche di classificazione algoritmi delle superfici osservate che si basano sulle caratteristiche spaziali dell'immagine telerilevata (*texture, context*), o sulla variazione di certi parametri al variare del tempo (quest'ultimo con un limite di applicabilità dovuto alle condizioni atmosferiche, che potrebbero impedire osservazioni in banda VIS).

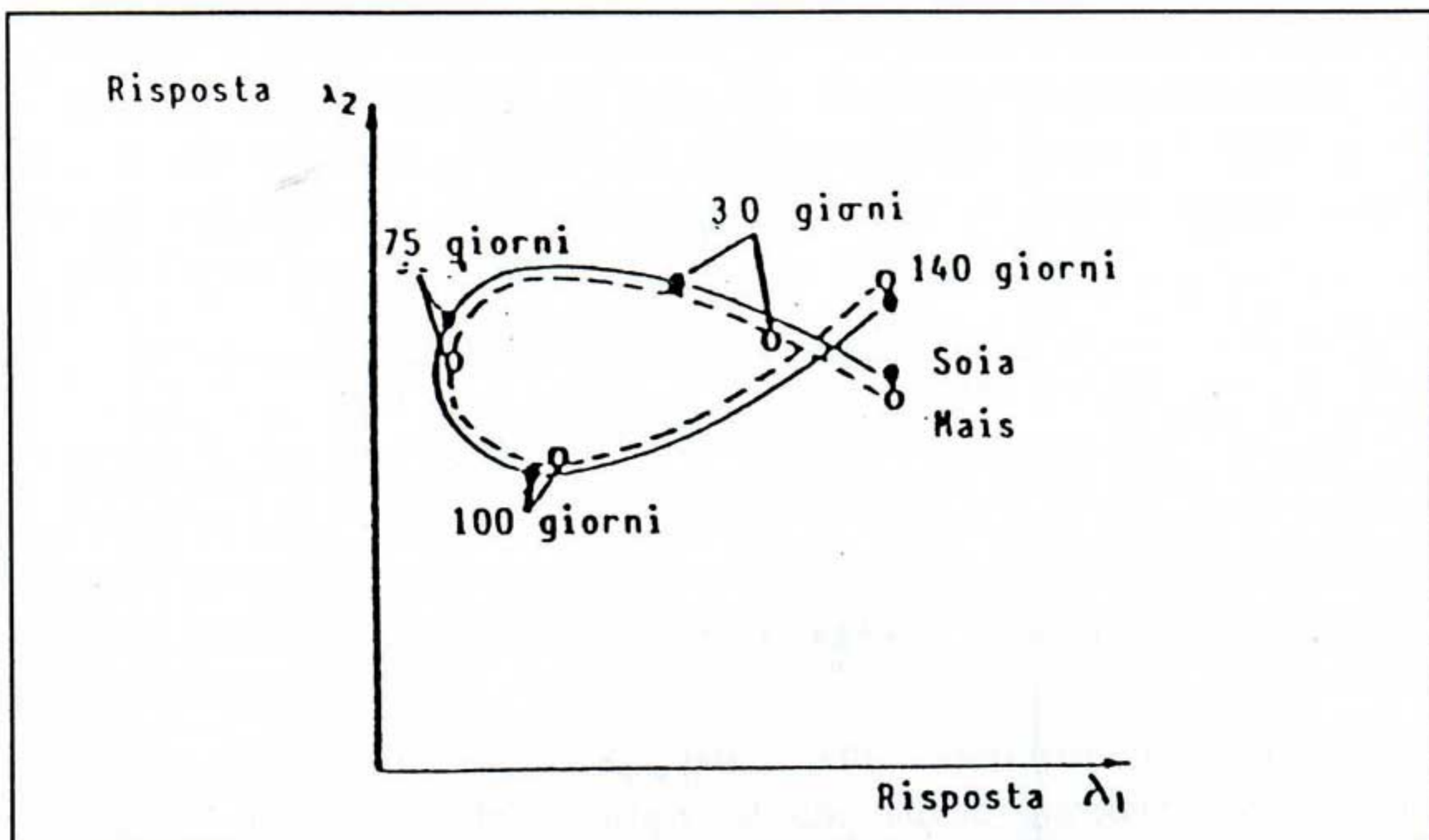


Figura 3 Variabilità temporale delle risposte spettrali di mais e soia

E' però solo combinando tra loro i suddetti algoritmi che si ottengono i risultati migliori. Effettuando osservazioni multispettrali, ripetute nel tempo, si possono separare risposte spettrali che, in un preciso momento, possono essere risultate molto simili.

A titolo di esempio in Foto 2 è riportata una mappa di uso del suolo relativa all'area della Toscana, ottenuta mediante classificazione dei dati acquisiti dal satellite LANDSAT, tramite opportuni algoritmi di calcolo.

2. PROBLEMATICHE RELATIVE AL CONTROLLO DI DISCARICHE RSU

2.1 Introduzione

Il DPR n. 915 del 10 Settembre 1982 fornisce la seguente definizione di rifiuto:

“qualsiasi sostanza od oggetto derivante da attività umana o da cicli naturali, abbandonato o destinato all’abbandono”

ed effettua successivamente la distinzione tra rifiuti solidi urbani (RSU), rifiuti speciali (RS), e rifiuti tossici e nocivi (RTN).

Anche se l’articolo 9 vieta l’abbandono, lo scarico, o il deposito incontrollato dei rifiuti in aree (pubbliche o private) ad uso pubblico, è importante osservare come secondo lo stesso decreto un qualsiasi oggetto possa essere considerato rifiuto già quando si decida di abbandonarlo, ovunque esso si trovi, e non soltanto all’atto del suo abbandono.

Il Ministero dell’Ambiente ha stimato nel 1988 una produzione di circa 17 milioni di tonnellate di rifiuti solidi urbani (RSU), che equivalgono a circa 300 Kg/ per anno *pro capite*, ovvero a poco meno di 1 Kg/per giorno *pro capite*. Questi dati pongono l’Italia nella media europea, che è stata calcolata nell’85 in 298 Kg/ per anno *pro capite*.

Lo smaltimento dei rifiuti solidi urbani viene effettuato in appositi impianti; attualmente i principali sistemi di trattamento adottati sono:

- smaltimento in discariche RSU
- incenerimento
- compostaggio
- riciclaggio

Per le applicazioni illustrate e le finalità della presente pubblicazione, in questa sede limiteremo la nostra attenzione allo smaltimento di rifiuti solidi urbani in discariche controllate.

2.2 La discarica controllata

Nella maggior parte dei paesi industrializzati lo smaltimento dei rifiuti solidi in discarica rappresenta il metodo più utilizzato con percentuali sulla produzione complessiva dei rifiuti che variano da paese a paese fra il 30 e il 100%.

In funzione del tipo di rifiuti che devono essere smaltiti si utilizzano differenti criteri di realizzazione e gestione delle discariche al fine di ottenere la massima efficienza di smaltimento con la minimizzazione delle emissioni e dei costi.

Le differenti tipologie realizzative, per quanto concerne discariche di rifiuti solidi urbani, come è noto sono le seguenti:

- in rilevato
- in pendio
- in trincea

In generale tutti i tipi di discarica saranno dotati di una impermeabilizzazione di fondo; di una copertura finale e di sistemi di raccolta e recupero del percolato e del biogas.

Una discarica controllata, in generale, presuppone un accurato controllo dei processi chimico-fisici e biologici che avvengono nell'ammasso dei rifiuti, considerando in pratica la discarica come un reattore biologico. Inoltre, le modalità operative devono essere tali da favorire il rapido instaurarsi di una fase degradativa metanigena stabile omogeneizzando i rifiuti ed eventualmente umidificandoli (ad es. con ricircolo del percolato)

E' infine opportuno realizzare la copertura finale quando i processi di degradazione sono in fase avanzata e gli assestamenti si sono già in gran parte verificati.

Il significato di scarico controllato si sta comunque evolvendo rapidamente prevedendo per il futuro solamente rifiuti sopravvissuti ad azioni volte alla riduzione dei quantitativi da avviare allo smaltimento ed al recupero di materie utili e di energia. Lo scarico controllato sarà sempre più parte di un

sistema integrato di smaltimento, del quale costituirà l'anello terminale, anche perchè ci sarà sempre un residuo che non si può evitare di produrre, che non è recuperabile o riciclabile, che non è combustibile e che quindi deve essere smaltito in discarica.

In sintesi gli obiettivi futuri dello smaltimento dei rifiuti solidi saranno la riduzione quantitativa all'origine, la separazione delle componenti merceologiche, la limitazione ed il controllo delle emissioni.

Da un punto di vista tecnico sarà quindi necessario migliorare le tecnologie impiegate, da un lato minimizzando le emissioni rendendo il più possibile inerti i rifiuti da smaltire, dall'altro rendendo più efficienti i sistemi di gestione e di controllo a lungo termine dei fattori che determinano l'impatto ambientale dell'impianto (inquinamento dell'aria, dell'acqua e del suolo).

2.3 Produzione del biogas

La frazione di natura organica contenuta nei rifiuti solidi urbani è soggetta ad una trasformazione biologica che dà luogo ad una produzione finale di biogas. Tale trasformazione viene operata da una flora batterica anaerobica che agisce sui componenti biodegradabili dei rifiuti stessi.

Nella prima fase successiva allo scarico dei rifiuti predomina la degradazione di tipo aerobico fino all'esaurimento dell'ossigeno intrappolato nei rifiuti stessi. Se il rifiuto viene collocato in strati sovrapposti adeguatamente compattati e ricoperti di terra, in tempi relativamente brevi (dai 6 ai 12 mesi) si esaurisce l'ossigeno inizialmente presente raggiungendo le condizioni di innesco della decomposizione anaerobica.

La discarica controllata, caratterizzata dall'impermeabilizzazione del fondo, delle pareti e della successiva copertura superficiale, costituisce l'elemento in cui si produce e si accumula il biogas; al fine di evitarne dispersioni nel sottosuolo e nell'aria, ed eventuali conseguenze per la vegetazione presente nell'area limitrofa, viene realizzato un opportuno sistema di captazione.

I materiali organici contenuti nei rifiuti solidi urbani (RSU) portati in discarica e posti in condizioni di anaerobicità per seppellimento con strati di terra vengono interessati da processi di digestione ad opera di batteri anaerobi che si innescano quando, in seguito a reazioni esotermiche, la temperatura del materiale stoccato raggiunge valori dell'ordine dei 30°C e si mantiene in un campo di variazione in genere compreso tra i 30 °C e i 45 °C.

Il prodotto di tali processi è una miscela costituita da metano, anidride carbonica e idrogeno solforato, chiamata biogas, mediamente nelle percentuali rispettivamente del 70 %, 29 % e 1 %. Questo miscuglio, additivato di una notevole quantità di vapor acqueo, tende a filtrare attraverso le vie di fuga sempre esistenti nella serie dei materiali depositati e stratificati, trascinando verso la superficie una parte del calore svolto nel processo di digestione del biogas ed un sistema di trattamento con semplice combustione o recupero di energia.

Considerato che nel processo di trasformazione biologica 1 m³ di rifiuto del peso di 0.7-0.8 t produce circa 150-200 m³ di biogas nell'arco di 15÷20 anni di cui il 50 % costituito da metano, si ottiene una produzione media annua di circa 10 m³. In realtà solamente il 40 % di tale volume è in generale estraibile mentre il rimanente 60 % viene disperso nel periodo di decomposizione aerobica e successivamente nell'ambiente in quanto filtrante dalla copertura superficiale.

Il biogas può fuoriuscire sia dal corpo della discarica che dal terreno circostante; in quest'ultimo caso si possono provocare danni per asfissia alla vegetazione circostante a causa della soppressione dell'ossigeno nel terreno. Nel caso in cui i rifiuti non siano stati sufficientemente compattati, può accadere che il biogas si accumuli in interstizi e/o depressioni situati nel corpo della discarica. In tal caso si può avere la formazione di miscele esplosive con l'ossigeno (O₂).

In una *discarica controllata* vanno quindi adottate le misure più opportune per la raccolta e il convogliamento del biogas. In taluni casi si è anche provveduto ad una riutilizzazione energetica del biogas stesso. Da notare che la formazione di biogas può avvenire anche dopo la chiusura e la bonifica della discarica.

Il deflusso dei biogas può essere ottenuto attraverso materiali porosi non-degradabili inseriti in strati orizzontali e verticali con aperture prefissate e protette. Lo stesso scopo può essere raggiunto utilizzando materiale molto permeabile ed infine uno strato difficilmente permeabile, predisponendo i punti di sfiato.

Possono anche essere utilizzati tubi di acciaio forati per il convogliamento del biogas o per la loro aspirazione. Se come copertura della discarica si utilizza materiale relativamente poroso, la diffusione del biogas dovrebbe avvenire verticalmente. In ogni caso nelle discariche profonde può essere riscontrata la presenza di biogas in pressione indipendentemente dalla copertura usata. In

ogni caso deve essere condotto uno studio dell'area circostante la discarica con tecniche atte a stimare il fluire dei gas.

2.4 Rischi ambientali connessi alla presenza di discariche

Poichè il processo di smaltimento dei rifiuti solidi urbani può in certi casi pregiudicare la salute pubblica, risulta indispensabile predisporre un corretto sistema di controllo e prevenzione di carattere igienico sanitario.

E' quindi necessario evitare che l'inquinamento si trasferisca da un settore all'altro del territorio eliminando i vettori della propagazione della contaminazione ambientale.

L'aspetto sanitario deve comprendere tutti quei settori fisico-chimici-biologici che possono avere influenze sulla salute umana, in modo da pregiudicare il benessere psicofisico e sociale.

Quando i rifiuti vengono ammassati, hanno inizio trasformazioni di natura chimico-biologica che portano a prodotti solidi, liquidi e gassosi. I metalli pesanti subiscono un'ossidazione mentre le sostanze organiche ed inorganiche vengono attaccate da flore batteriche diverse, a seconda delle condizioni in cui si trova la discarica. I liquami che vengono prodotti durante la fermentazione contengono essenzialmente acidi organici.

Le reazioni chimiche che interessano il materiale depositato nella discarica sono fondamentalmente riconducibili a due fasi:

- fase aerobica: è caratterizzata dalla presenza di anidride carbonica, acqua e nitrati
- fase anaerobica: oltre all'acqua ed al biossido di carbonio (CO_2), si formano metano (CH_4), ammoniaca (NH_3), azoto (N_2), acidi organici, idrogeno solforato, etc.

Il gas metano può formare con l'aria miscele esplosive, mentre l'anidride carbonica, dando origine all'acido carbonico, può contribuire alla mineralizzazione delle acque circolanti nel sottosuolo. Ora, poichè le reazioni di ossidazione sono esotermiche, all'interno della discarica può essere generata una quantità di calore tale da produrre significativi aumenti di temperatura anche alla superficie. Ciò si verifica soprattutto nelle aree

pianeggianti soggette a maggiore compressione. Le scarpate della discarica, in genere ricoperte con materiali di sgombero, presentano invece rischi di erosione.

I rischi potenzialmente generabili dalla presenza di una discarica risultano quindi essere i seguenti:

- Inquinamento atmosferico: la combustione di rifiuti solidi può generare una immissione in atmosfera di sostanze inquinanti indesiderate (quali polveri, NO_x, SO_x, acido cloridrico, idrocarburi, etc.) dannose per la salute. Esiste inoltre il problema della propagazione degli odori generati dalla decomposizione delle sostanze organiche o da processi fisico-chimici: tale fenomeno può essere limitato individuando la posizione più opportuna della discarica rispetto alla direzione dei venti. In genere si fa uso di barriere frangivento di tipo fisso (alberi, etc.) o mobile, che limitino l'effetto eolico di diffusione.
- Innesco incendi: a causa di scintille o fiamme prodotte dai mezzi meccanici che operano in discarica, o incautamente dagli operatori stessi, oppure a causa della presenza di materiale in combustione nei rifiuti (quali ad es. braci, etc.) può innescarsi un principio di incendio dei gas combustibili prodotti dalla discarica (metano, etc.). Inoltre, a causa di una scarsa compattazione dei materiali e della conseguente presenza di ossigeno negli spazi vuoti, può crearsi il rischio di una autoaccensione dei gas combustibili originatisi dalla fermentazione dei rifiuti. Occorre quindi mettere a punto adeguate tecnologie per effettuare un controllo continuativo della discarica per segnalare l'eventuale presenza di fenomeni di autocombustione.
- Inquinamento idrico: il rischio di diffusione nelle acque superficiali e del sottosuolo di sostanze tossiche o microrganismi patogeni che spesso si riscontra nei rifiuti pone una grave problematica sanitaria, anche per quanto riguarda la catena alimentare.
- Diffusione agenti patogeni: per animali potenzialmente portatori di malattie infettive la discarica di rifiuti domestici, ricchi di sostanze organiche, costituisce un habitat ideale. Roditori, uccelli ed insetti

sono i frequentatori più comuni di discariche di RSU. Inoltre in conseguenza della presenza di tane di roditori la funzione delle impermeabilizzazioni e delle coperture può essere compromessa creando vie preferenziali di infiltrazione di acque meteoriche o di fuoriuscita di percolato.

L'impatto negativo di una discarica, sotto il profilo igienico-ambientale, non riguarda unicamente l'aspetto tossicologico ma tutte le integrazioni con l'ambiente umano, con il suolo, con l'aria e con l'acqua.

Per valutare tale impatto occorre quindi esaminare molti parametri ambientali che, a seconda che si riferiscano al tipo di rifiuti o all'ambiente ricettore, possiamo distinguere fondamentalmente in due gruppi:

parametri propri del rifiuto: si riferiscono alla tossicità nei confronti dell'uomo, alla tossicità nei confronti della vita acquatica, alla persistenza, alla bioaccumulazione ambientale ed alla solubilità in sistemi liquidi

parametri propri dell'ambiente: la diffusione ambientale di sostanze tossiche è funzione inversa della carica batterica del suolo, della superficie attiva e della presenza di agenti complessanti, mentre è direttamente correlata alla conducibilità, alla velocità di infiltrazione, alla porosità, al PH ed al potenziale di ossido-riduzione

2.5 Il monitoraggio di una discariche RSU

I progetti relativi alla realizzazione di discariche controllate prevedono presidi e barriere di salvaguardia che controllino ed impediscano emissioni e fughe dei prodotti della degradazione.

L'assenza o il cattivo funzionamento di queste barriere di difesa ambientale possono avere ripercussioni negative sulla qualità dell'ambiente nel quale l'opera è inserita.

Il prezzo per la bonifica da eventuali situazioni di inquinamento che la collettività deve sopportare, sia in termini di costo economico che di danno alla salute pubblica, è in genere molto elevato.

Soltanto un allarme tempestivo che segnali un evento in atto o in via di sviluppo, permette sia di contenere notevolmente i costi per il ripristino dell'ambiente sia di garantirne il ripristino.

La principale risposta alle esigenze di conoscenza, comprensione e previsione del comportamento e dell'evoluzione delle dinamiche in atto in un bioreattore naturale, quale è appunto una discarica RSU, è costituita dal monitoraggio delle grandezze chimico-fisiche misurabili per la rivelazione di eventuali anomalie. Tale metodologia costituisce inoltre l'indispensabile presidio per una corretta gestione dell'impianto di smaltimento.

Il sistema delle reti di monitoraggio deve essere inteso come parte integrante dell'opera in progetto, descritto durante gli studi preliminari e non impostato allorché le opere sono già state eseguite, e tantomeno al verificarsi degli effetti indotti da una situazione di contaminazione dell'ambiente. In tal modo sarà possibile predisporre sensori di lettura anche nelle parti più profonde, le quali verranno successivamente ricoperte dai rifiuti e non risulteranno più accessibili per sopralluoghi e misure dirette.

Il dimensionamento della rete di controllo (tipo, numero ed ubicazione dei sensori) deve essere eseguito sulla base delle risultanze emerse nella fase di indagine geognostica sul sito.

Un sistema di monitoraggio è tanto più efficace quanto più rapidamente è in grado di fornire indicazioni puntuali sulla localizzazione del deterioramento di una barriera posta ad impedire la diffusione degli inquinanti.

Questo concetto di rapidità richiede che le strumentazioni specifiche di misura ed allarme siano previste, oltre che per il controllo dei parametri che definiscono la qualità ambientale, anche per l'ordinaria sorveglianza delle stesse barriere di salvaguardia e dei presidi di sicurezza.

I sistemi di monitoraggio utilizzati per discariche RSU possono essere concettualmente suddivisi in due gruppi, che esplicano rispettivamente le seguenti funzioni:

- controllo strutturale: realizzato tramite quelle tecnologie in grado di misurare le variazioni dei parametri che definiscono l'efficienza delle strutture che costituiscono l'opera stessa (ad es. l'integrità delle geomembrane di impermeabilizzazione, i cedimenti differenziali del terreno di fondazione, le perdite dei condotti, etc.)
- controllo ambientale: realizzato tramite le strumentazioni utilizzate per la verifica delle condizioni di qualità dell'ambiente direttamente coinvolto, distinto nelle sue componenti fondamentali (ad es. aria, acque di superficie e di profondità, strato insaturo e strato saturo, etc.)

In particolare il *controllo strutturale* viene realizzato attraverso le seguenti operazioni:

- 📁 Verifica dell'integrità delle geomembrane di impermeabilizzazione: viene tipicamente effettuata monitorando le acque di falda con una serie di pozzi di controllo per mezzo dei quali vengono prelevati i campioni per le analisi di laboratorio. Un metodo alternativo, che consente di ridurre al minimo il tempo che intercorre tra l'inizio della diffusione del percolato e l'inizio delle operazioni di bonifica, è costituito dal monitoraggio dell'integrità della geomembrana; tale controllo viene effettuato tramite la misura periodica della continuità dell'isolamento elettrico esercitato dalla geomembrana tra i rifiuti e l'ambiente del sottosuolo circostante.
- 📁 Monitoraggio dei cedimenti differenziali del fondo della vasca: viene effettuato predisponendo, in fase di costruzione dell'opera, l'installazione di sensori specifici (*puntuali* o *a profilo*) in grado di misurare le variazioni di quota. I dati acquisiti risultano di grande utilità anche per la verifica della stabilità dei rifiuti in discariche in rilievo, soggette a rischi di scivolamento.
- 📁 Monitoraggio delle perdite da serbatoi interrati e collettori vari: viene effettuato mediante sensori e segnalatori automatici che evidenziano

livelli di umidità diversi da un valore di riferimento precedentemente fissato. Il volume di terreno controllato è ovviamente limitato a quello adiacente il sensore stesso. Qualora si verifichi una variazione significativa dei dati rilevati è necessario un controllo diretto, effettuando un campionamento mediante lisimetro, per accertarne la causa: in questo modo viene attribuita ai suddetti sensori la sola funzione di allertamento.

📁 Drenaggio dei percolati: l'efficienza del sistema di drenaggio e raccolta di percolato, che per la maggior parte risulta di difficile accessibilità, viene verificata sia tramite misure di portata sia tramite il controllo della mancanza di occlusioni. La prima misura viene effettuata tramite un sensore di livello posto all'interno della camera di raccolta del percolato: un valore minore di una soglia prefissata, indice di una minore portata, è spia di una eventuale fuoriuscita di percolato. La mancanza di occlusioni viene invece verificata tramite periodiche ispezioni alla rete di drenaggio, effettuate attraverso appositi accessi che debbono essere opportunamente predisposti in fase di progetto; tali accessi sono indispensabili anche per effettuare quelle operazioni di manutenzione (quali lavaggio forzato, spurgo con lancia idraulica, pulizia meccanica, etc.) necessarie per evitare occlusioni future.

📁 Monitoraggio del materiale stoccato: è un controllo che riguarda specificamente la stabilità dei versanti, l'evoluzione del profilo topografico finale e i parametri chimico-fisici che definiscono le caratteristiche del processo di decomposizione nelle sue diverse fasi. Viene effettuato per via indiretta tramite la misura degli assestamenti della superficie topografica di copertura della discarica, indice di valutazione dello stato di avanzamento del processo chimico-fisico in atto al suo interno. Per seguire gli assestamenti vengono generalmente effettuate periodiche livellazioni topografiche di una serie di caposaldi opportunamente predisposti sulla massa di rifiuti e sull'argine perimetrale della discarica. Per tali misure è consigliata una cadenza mensile sino alla ultimazione delle attività di ripristino, mentre successivamente è sufficiente una cadenza annuale.

mentre il *controllo ambientale* viene realizzato attraverso le seguenti attività:

- 📁 Monitoraggio dell'aria: gli eventi meteorologici esercitano una influenza fondamentale sul quantitativo di percolato e di biogas prodotti, le direzioni di dispersione del biogas, etc. In genere all'interno della discarica, o nelle sue immediate vicinanze, viene installata una stazione per la misura dei principali parametri atmosferici (temperatura e umidità dell'aria, velocità e direzione del vento, pressione atmosferica, radiazione solare, quantità di precipitazione). Per quanto concerne il monitoraggio del biogas vengono invece effettuati rilievi puntuali in campagna. Vengono poi analizzate le concentrazioni dei componenti campionati secondo cicli dai punti risultati più significativi. La ripetizione delle misure secondo cicli regolari ed in corrispondenza dei punti fissi ubicati permette di monitorare l'evoluzione spaziale e temporale del fenomeno di efflusso del biogas.

- 📁 Monitoraggio dello strato insaturo: lo strato insaturo, costituito dallo spessore di terreno compreso tra il fondo della discarica e il pelo libero della falda, può essere interessato sia dalla presenza di una fase gassosa (fughe di biogas) sia da quella di una fase liquida (percolato ed eluati) in movimento all'interno della frazione porosa del terreno. Il monitoraggio di tale strato permette di individuare la presenza di dispersioni di percolati prima che questi raggiungano la falda. È importante sottolineare che eventuali fughe di biogas nello strato insaturo possono dar luogo ad esplosioni e a sofferenza della vegetazione anche in aree relativamente distanti dalla discarica.

- 📁 Monitoraggio delle acque di falda: viene effettuato disponendo una maglia di punti di misura (generalmente costituita da pozzi) e, una volta ricostruito il modello idrodinamico dell'acquifero, è possibile monitorare l'evoluzione dei livelli piezometrici delle falde sottostanti la discarica ed eseguire periodici prelievi per il campionamento della qualità delle acque.

Per il controllo ambientale dell'area adibita a discarica sono state recentemente impiegate anche metodologie legate alle tecniche telerilevamento. In particolare attraverso un rilievo termografico dell'area della discarica effettuato da piattaforma aerea (ad una quota di 100 m circa) è possibile sia censire i punti di fuoriuscita di eventuali fughe di biogas, sia valutare lo stato della vegetazione in una fascia circostante di raggio da definirsi in funzione delle dimensioni della discarica stessa..

In sostanza si tratta di acquisire una immagine dell'area adibita a discarica tramite sensori operanti nella banda dell'infrarosso termico ($8\div 12 \mu\text{m}$) nella quale possono essere evidenziate le differenze termiche relative a varie aree costituenti la discarica stessa.

Una volta acquisite le immagini infrarosso dell'area osservata, queste possono essere successivamente elaborate e restituite su mappe in falso colore in termini di termografie, distribuzione superficiale di efflusso del biogas, etc.

3. APPLICAZIONI DI UN SISTEMA INFRAROSSO PER IL MONITORAGGIO DISCARICHE RSU

3.1 Introduzione

I materiali organici contenuti nei rifiuti solidi urbani (RSU) portati in discarica e messi in condizioni di anaerobicità per seppellimento con strati di terra vengono interessati da processi di digestione ad opera di batteri anaerobi che si innescano quando, in seguito a reazioni esotermiche, la temperatura del materiale stoccato raggiunge valori dell'ordine dei 30°C e si mantiene in un campo di variazione in genere compreso tra i 30 °C e i 45 °C.

Il prodotto di tali processi è una miscela costituita da metano, anidride carbonica e idrogeno solforato, chiamata biogas, mediamente nelle percentuali rispettivamente del 70%, 29% e 1%. Questo miscuglio, additivato di una notevole quantità di vapor acqueo, tende a filtrare attraverso le vie di fuga sempre esistenti nella serie dei materiali depositati e stratificati, trascinando verso la superficie una parte del calore svolto nel processo di digestione.

Gran parte del calore trasportato per convezione dal biogas viene ceduto nel trasporto alla massa dei materiali sovrastanti il focolaio di digestione con l'effetto di un innalzamento graduale della temperatura degli strati di rifiuti sovrastanti fino alla soglia di innesco della digestione. In prossimità della superficie, il biogas, prima di liberarsi nell'atmosfera, lascia traccia del calore trasportato in termini di anomalia termica più o meno pronunciata a carattere diffuso o localizzato, permettendo l'identificazione dei punti di emersione.

L'anomalia termica lasciata sul terreno dalla fuoriuscita di biogas può pertanto essere rilevata per mezzo di sensori ad immagine operanti nell'intervallo spettrale dell'infrarosso termico (8÷14 µm), essendo la miscela di gas e vapor d'acqua trasparente alla radiazione infrarossa nell'intervallo considerato.

Il monitoraggio mediante sistemi IR (siano essi installati su piattaforma aerea o terrestre) riveste un'importanza applicativa rilevante come supporto alla gestione e al controllo della discarica, qualunque sia la tipologia dell'impianto (collinare, in rilevato, in fossa), la sua conduzione (controllata, abusiva, esaurita, bonificata, ampliata) e le condizioni ambientali nelle quali è inserito.

I principali temi nei quali il telerilevamento con sensori IR può fornire un valido contributo sono i seguenti:

(i) Limitazione della pericolosità:

La pericolosità di una discarica di rifiuti solidi urbani RSU è legata essenzialmente a tre fattori di rischio:

- instabilità strutturale dell'area adibita a discarica e del materiale accumulato;
- rischio d'incendio dovuto alla formazione di sacche di biogas infiammabile all'interno della massa di rifiuti;
- perdite incontrollate di percolato;

I rilievi termografici rendono possibile l'individuazione di anomalie termiche superficiali prodotte da fuoriuscite di biogas caldo anche distanti dai camini o corrispondenti ad aree di instabilità per saturazione del terreno di copertura in seguito ad eventi piovosi o fuoriuscite di percolato.

(ii) Controllo anti-intrusioni:

E' di fondamentale importanza, sia per problemi igienico-sanitari (data la non salubrità dell'ambiente ed il rischio di infezioni) che ai fini della sicurezza dell'impianto stesso (per evitare la deposizione di materiali tossici o che possano innescare pericolosi processi quali incendi etc.) impedire intrusioni di personale non autorizzato all'interno dell'area adibita a discarica RSU. A tal fine è necessario controllare gli accessi all'impianto e l'intero perimetro di recinzione. Ciò può essere realizzato tramite un sistema automatico di monitoraggio costituito da una camera termica e da un personal computer provvisto di un *motion detector*, ovvero un algoritmo di calcolo che consiste nell'elaborazione differenziale di immagini

acquisite successivamente a breve distanza temporale. Tale sistema permette la detezone di variazioni nella scena osservata ed è quindi in grado di rivelare la presenza di eventuali malintenzionati che tentino di forzare gli ingressi o superare le reti di recinzione.

(iii) Valutazione del potenziale energetico

Sulla base della correlazione fra temperatura superficiale ed emissione di biogas le termografie rendono possibile l'individuazione delle aree più *mature* della discarica ed una valutazione del potenziale energetico per un eventuale sfruttamento del biogas.

(iv) Stima dell'efficienza della discarica

Stimando la portata di biogas sulla base dei rilievi termografici e confrontando tale valore con il potenziale energetico calcolato sulla base della quantità di sostanza organica conferita, si può ottenere una valutazione dell'efficienza del processo di trasformazione dei rifiuti conferiti in discarica. Quanto migliore sarà la compattazione e l'isolamento dei rifiuti dalle acque meteoriche e dall'aria più rapida sarà la trasformazione dei rifiuti e maggiore la produzione di biogas.

In funzione dei suddetti temi è possibile definire più dettagliatamente le applicazioni di un sistema di monitoraggio operante nell'infrarosso (medio e termico) per il controllo di discariche RSU.

3.2 Detezione principi d'incendio

Eventuali principi d'incendio, all'interno della discarica o nelle zone ad essa adiacenti possono essere rivelate tramite un sistema automatico di monitoraggio che utilizza un sensore puntuale operante nella banda 3÷5 μm . Tale sistema può essere dotato di un sistema di allarme in grado allertare in caso di pericolo il personale addetto alla gestione dell'impianto ed eventualmente, tramite linea telefonica dedicata, Carabinieri e Vigili del Fuoco.

3.3 Mappatura del flusso di biogas

Tramite un sistema che utilizza un sensore IR ad immagine operante nell'infrarosso termico ($8\div 12\ \mu\text{m}$) è possibile ottenere una mappa che descrive il flusso di biogas in termini di portata volumetrica superficiale. Le operazioni da eseguire a questo scopo sono tipicamente le seguenti:

- ☞ acquisizione immagini in Tb tramite camera termica operante nella banda $8\div 12\ \mu\text{m}$
- ☞ applicazione di correzioni radiometriche tramite modello emissività
- ☞ termografie relative all'area della discarica
- ☞ applicazione del modello di efflusso del biogas
- ☞ realizzazione di mappe di flusso del biogas in termini di portata [$\text{Kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

3.3.1 Detezione anomalie termiche

Per quanto riguarda l'acquisizione delle termografie occorre predisporre un sistema di monitoraggi portatile composto tipicamente da una camera termica con uscita video standard ed una unità di registrazione che può essere costituita da un video-registratore VHS o da un Personal Computer (anche portatile) provvisto di scheda di acquisizione video o di frame-grabber.

Una volta acquisite le immagini nell'infrarosso termico esse vanno convertite da dati grezzi a termografie, ovvero immagini nelle quali ciascun livello di grigio corrisponda ad un ben preciso valore di temperatura termodinamica. Per esporre tale procedimento è bene fare alcuni richiami e soffermarci su alcune considerazioni.

La misura della radiazione emessa dai corpi naturali nella banda dell'infrarosso termico è importante in tutte quelle applicazioni in cui è necessario effettuare misure di temperatura superficiale dei materiali. Nella banda $8\div 14\ \mu\text{m}$ si misura infatti la maggior parte dell'energia emessa da un corpo che si trovi circa alla temperatura ambiente ($300\ \text{°K}$). In tale intervallo di lunghezze d'onda si ha inoltre la massima trasparenza atmosferica, ed il contributo della radiazione solare riflessa dalla superficie risulta inferiore rispetto a quello della radiazione naturalmente emessa.

La radiazione apparente misurata da un sensore ottico ad immagine che osserva una superficie da una piattaforma situata al suolo, è costituita di due termini: la

radiazione emessa dalla superficie e la radiazione ambiente riflessa dalla superficie stessa. Quest'ultima è costituita in generale dalla radiazione solare, atmosferica ed il contributo di ogni altro oggetto situato nei dintorni dell'oggetto osservato.

Un corpo naturale (corpo grigio) emette una quantità di energia inferiore a quella di un corpo nero, e si definisce un parametro emissività (e), come il rapporto tra la radianza emessa e quella che sarebbe emessa da un corpo nero equivalente che si trovasse alla stessa temperatura fisica.

Si definisce inoltre come temperatura di brillantezza T_B la temperatura di un corpo nero ideale che avesse la stessa radianza del corpo grigio che si trova alla temperatura fisica T .

In generale $T_B < T$, mentre l'uguaglianza vale solo nel caso del corpo nero ($e = 1$). La temperatura superficiale di un corpo può così essere misurata mediante la misura della radianza ad infrarosso termico solo se è nota l'emissività superficiale.

Quindi una variazione della radianza emessa da un'oggetto può essere attribuita sia ad una variazione della sua temperatura superficiale che ad una variazione di emissività se si trascura la radiazione riflessa. Se si usa una legge di potenza del tipo $L_l(T) \propto T^5$ per approssimare l'integrale dell'equazione di Planck nella banda 8-14 μm , si ottiene che una variazione relativa in temperatura che compensa una variazione relativa in emissività è data da:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{5} \frac{\Delta e}{e} \quad (1)$$

Ad esempio, una variazione del 1% in emissività è equivalente ad un errore nel valutare la temperatura superficiale di circa 0.6 °K per una superficie a 300 °K. Tale variazione può essere rilevabile con i radiometri ad infrarosso attualmente disponibili che possiedono un accuratezza di circa 0.1 °K.

Non è quindi importante effettuare ulteriori correzioni atmosferiche o effettuare misure di temperatura di grande precisione se l'emissività è nota con errori maggiori del 1%.

D'altra parte l'emissività delle superfici naturali può variare notevolmente da circa 0.80 per la sabbia a 0.99 per la neve ed in generale dipende dall'eterogeneità delle superfici naturali, dalla copertura vegetale e da parametri quali umidità, rugosità, porosità, salinità, tessitura e temperatura del terreno.

Tuttavia, esemplificando in pratica, si può considerare che in condizioni di osservazione tali che l'angolo di osservazione non superi i 40° dal nadir, per

variazioni di umidità superficiale del terreno del 10% si ottiene un errore massimo sull'emissività del 2% che produce un errore sulla stima della temperatura superficiale per corpi a 300°K di 1.5÷2 °K.

3.3.2 *Sviluppo della modellistica per la stima del flusso di biogas*

Se si assume un bilancio energetico fra il calore generato (Q_g) dal processo di digestione dei rifiuti ed il calore dissipato in atmosfera (Q_d) è possibile correlare le anomalie termiche rilevate dal sensore infrarosso con il flusso di biogas (Q_M) (Kg/h) dalla superficie della discarica. Tale bilancio si basa sulle seguenti ipotesi:

- il biogas emergendo cede tutto il calore alla superficie per condensazione trascurando la parte di calore che si disperde nell'aria
- la termografia da utilizzare deve essere acquisita quando il contributo del riscaldamento solare può essere considerato trascurabile (i.e. dopo il tramonto e prima dell'alba)
- assumendo condizioni di equilibrio termico, le anomalie termiche corrispondono alle zone che si trovano a temperatura superficiale maggiore di quella dell'aria o del terreno indisturbati dall'emersione di biogas
- il biogas viene generato da un singolo strato omogeneo di rifiuti uniformemente affetti dai processi di digestione; pertanto si trascurano fenomeni di dissipazione del calore generato all'interno dei vari strati di rifiuti e si assume una temperatura del biogas costante lungo tutto il cammino verso la superficie
- la velocità del vento deve essere inferiore a 6 m/sec

Su queste basi, il calore generato nell'unità di tempo Q_g (espresso in Kcal/h) risulta proporzionale al flusso di biogas Q_M (espresso in Kg/h) e alla differenza $\Delta T = (T_a - T_i)$ fra la temperatura dell'aria e quella di digestione del biogas (espressa in °K), attraverso una costante C_m definita dal calore specifico del biogas (espressa in Kcal/Kg °K):

$$\frac{\Delta Q_g}{\Delta t} = C_m Q_M \Delta T \quad (2)$$

mentre il calore dissipato nell'unità di tempo Q_d risulta la somma di un termine radiativo ed uno di convezione:

$$\frac{\Delta Q_d}{\Delta t} = \sigma e (T^4 - T_a^4) A + h_c \Delta T_s \quad (3)$$

dove:

σ : costante di Stefan-Boltzmann ($4.88 \cdot 10^{-8} \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{K}^4$)

e : emissività emisferica superficiale mediata su tutto lo spettro elettromagnetico

T : temperatura dell'anomalia superficiale dell'area A (espressa in $^\circ\text{K}$)

T_s : differenza fra $(T - T_a)$

V : velocità del vento (espressa in m/s)

h_c : coefficiente di scambio termico convettivo fornito dalla

$$\text{relazione: } h_c = \left(5 + V \frac{3600}{1100} \right) \quad (4)$$

(espresso in $\text{Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$)

Di conseguenza le anomalie termiche rilevate alla superficie della discarica risultano correlate alla portata di biogas Q_v (espressa in m^3/h) secondo la seguente relazione:

$$Q_v = \frac{\sigma e (T^4 - T_a^4) + \left(5 + V \frac{3600}{1100} \right) \Delta T_s}{D_m C_m \Delta T} A \quad (5)$$

dove D_m è la densità del biogas (Kg/m^3);

A titolo di esempio la figura 3.1 mostra le caratteristiche fisico-chimiche del biogas.

La figura 3.2 mostra la relazione fra portata di biogas (espressa in Kg/h per unità di area in pixel) stimata dal modello e la temperatura superficiale della discarica derivata dall'immagine infrarosso in condizioni di temperatura aria, vento, emissività e temperatura di digestione definite.

La figura 3.3 mostra invece la tabella dei parametri in ingresso e quelli calcolati dal modello relativi alle caratteristiche fisico-chimiche del biogas.

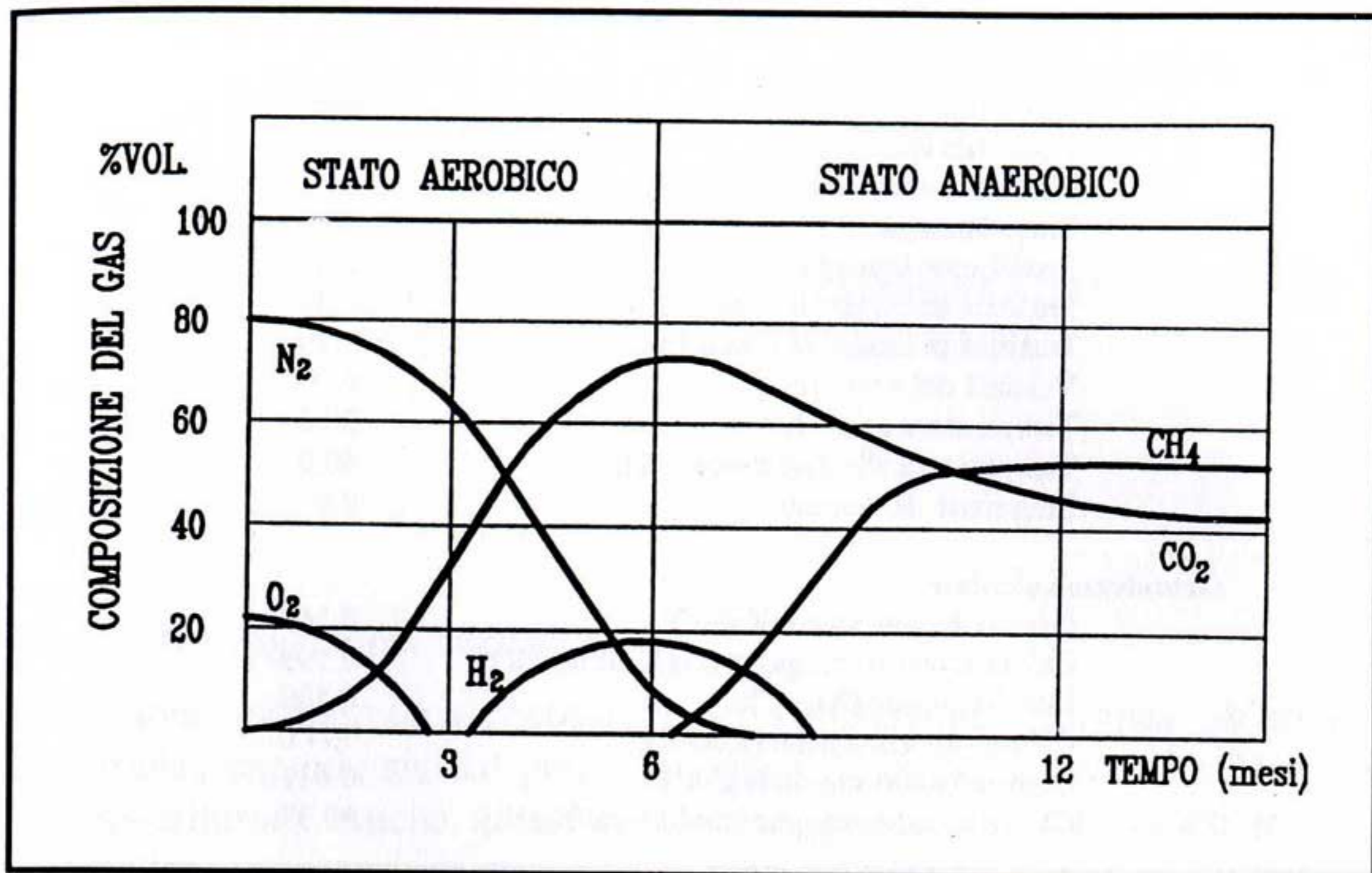


Figura 3.1 Caratteristiche fisico-chimiche del biogas

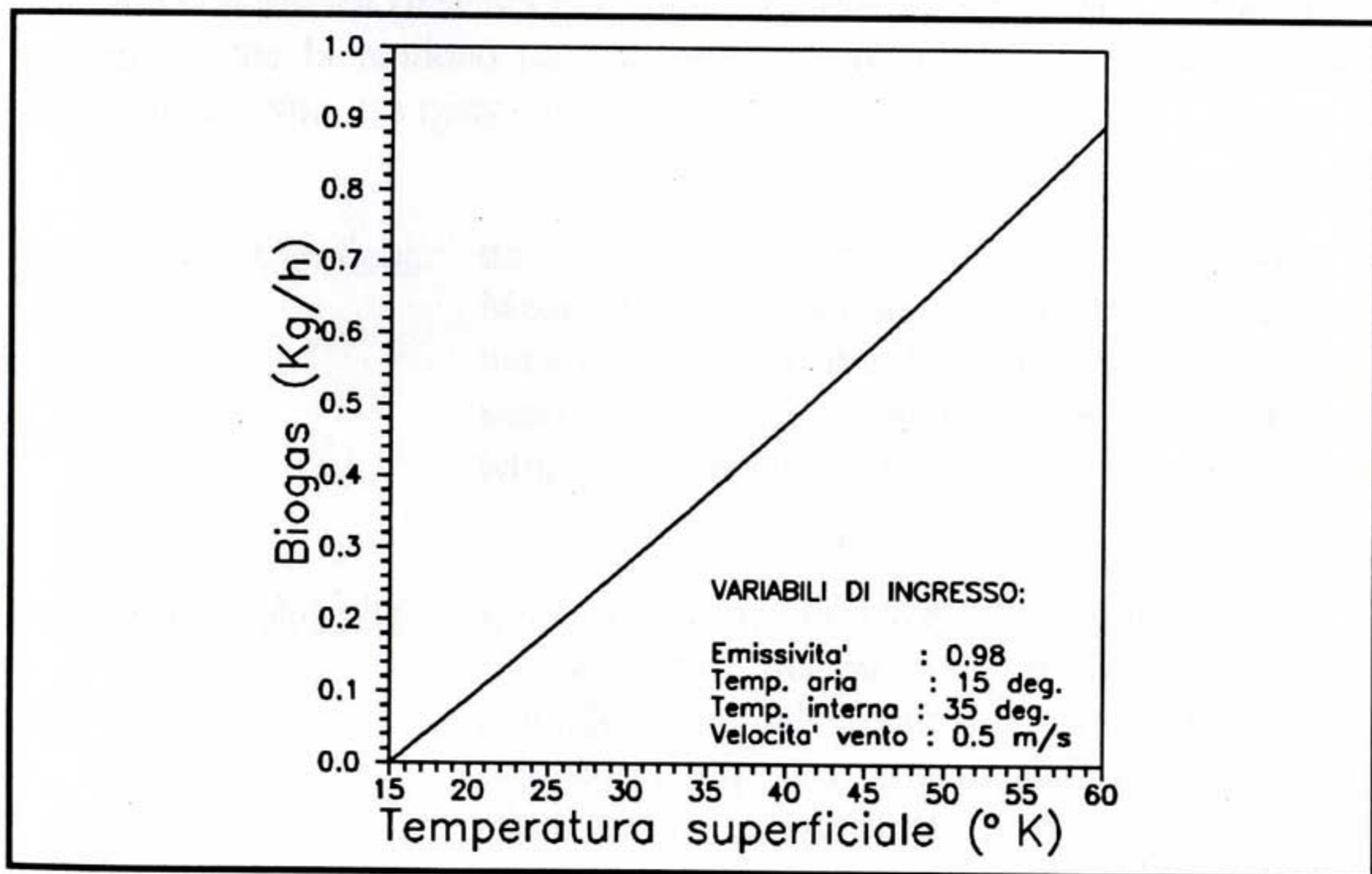


Figura 3.2 Portata di biogas stimata dal modello in funzione della temperatura superficiale.

Grandezze in ingresso:

Nome file ingresso:	AAA.dat
Nome file uscita:	MAP.dat
Nome file calibrazione:	LUT.cal
Linee immagine:	200
Pixel/Linea Immagine:	256
Frazione di biogas dovuta a CH ₄ :	0.30
Frazione di biogas dovuta a CO ₂ :	0.20
Velocità del vento (m/s):	0.00
Temperatura aria (°K):	20.0
Temperatura alla digestione (°K):	40.0
Emissività del terreno:	0.9

Grandezze calcolate:

Densità biogas secco (Kg/m ³):	0.560
Calore specifico biogas secco(Kcal/Kg/°K)	0.199
Densità vapore (Kg/m ³):	0.509
Calore vaporizzazione (Kcal/Kg):	594.0
Densità biogas umido (kg/m ³):	0.611
Calore specifico biogas umido(Kcal/Kg/°K)	30.37

Figura 3.3 Parametri in ingresso ed in uscita per il modello di efflusso di biogas

4. IL PROGRAMMA MEDSPA: MONITORAGGIO TERMICO DELLA DISCARICA DI LITERNO

4.1 Il Programma MedSPA

La regione mediterranea costituisce per la Comunità Europea un'area di importanza capitale sia dal punto di vista politico-economico che da quello storico-culturale. Anche il suo ruolo strategico si va rafforzando mano a mano che acquistano importanza alcuni paesi del bacino meridionale grazie al turismo, alla produzione di petrolio e di gas naturale.

L'area mediterranea presenta però una serie di caratteristiche geografiche ed ecologiche che la rendono particolarmente sensibile ed esposta agli effetti dell'inquinamento; tra queste le principali sono costituite da:

peculiarità geografiche: dovute alle caratteristiche dello stesso Mar Mediterraneo, ovvero un mare semichiuso, con numerose isole povere di risorse naturali, uno scarso e lento ricambio con l'oceano, temperature elevate etc.

peculiarità ecologiche: legate alla scarsa ed irregolare disponibilità di risorse idriche, alla varietà di specie vegetali ed animali alcune delle quali rare o in pericolo di estinzione; a questo va aggiunto un eccessivo sfruttamento del territorio dovuto all'enorme pressione antropica: oltre il 20% della popolazione comunitaria vive infatti nell'area mediterranea, con un flusso turistico annuale che supera i 100 milioni di unità

Appare quindi necessario alleviare la pressione che i suddetti fattori esercitano sul bacino mediterraneo per evitare conseguenze ecologiche, sociali ed economiche per esso deleterie.

Per questo motivo la Commissione delle Comunità Europee si è impegnata sin dall'aprile 1984 a definire una strategia ed un programma di azione per la tutela dell'ambiente nell'area mediterranea. E' stato quindi predisposto nel corso del periodo 1990-1999 una serie organica e completa di interventi volti a stimolare le attività socio-economiche compatibili con le esigenze ambientali attraverso il programma MedSPA (Strategia e Programma d'Azione per la Protezione dell'Ambiente).

Come strumento principale del programma MedSPA è stata prevista la partecipazione comunitaria al finanziamento in loco di progetti di carattere innovativo, che avrebbero dovuto rispondere essenzialmente ad obiettivi di dimostrazione, di sensibilizzazione o di collaborazione fra differenti realtà tecniche e industriali.

Nell'ambito del programma MedSPA per far convergere gli sforzi sui problemi più urgenti, sono poi state definite alcune priorità di intervento per quanto riguarda i paesi della Comunità:

- a) gestione delle acque reflue e dei rifiuti solidi di piccoli centri urbani (con meno di 100.000 abitanti) della fascia costiera e delle piccole isole
- b) gestione dei rifiuti tossici e nocivi e dei fanghi di depurazione
- c) trattamento delle acque di scarico nel campo dei trasporti marittimi
- d) protezione dei biotipi

In riferimento a quanto espresso nel punto b), alcuni tecnici e progettisti della Divisione Sistemi per l'Ambiente e il Territorio (D.S.A.T.) della Officine Galileo di Firenze hanno presentato il progetto di un sistema di monitoraggio, operante nell'infrarosso medio e termico, per il controllo di discariche RSU.

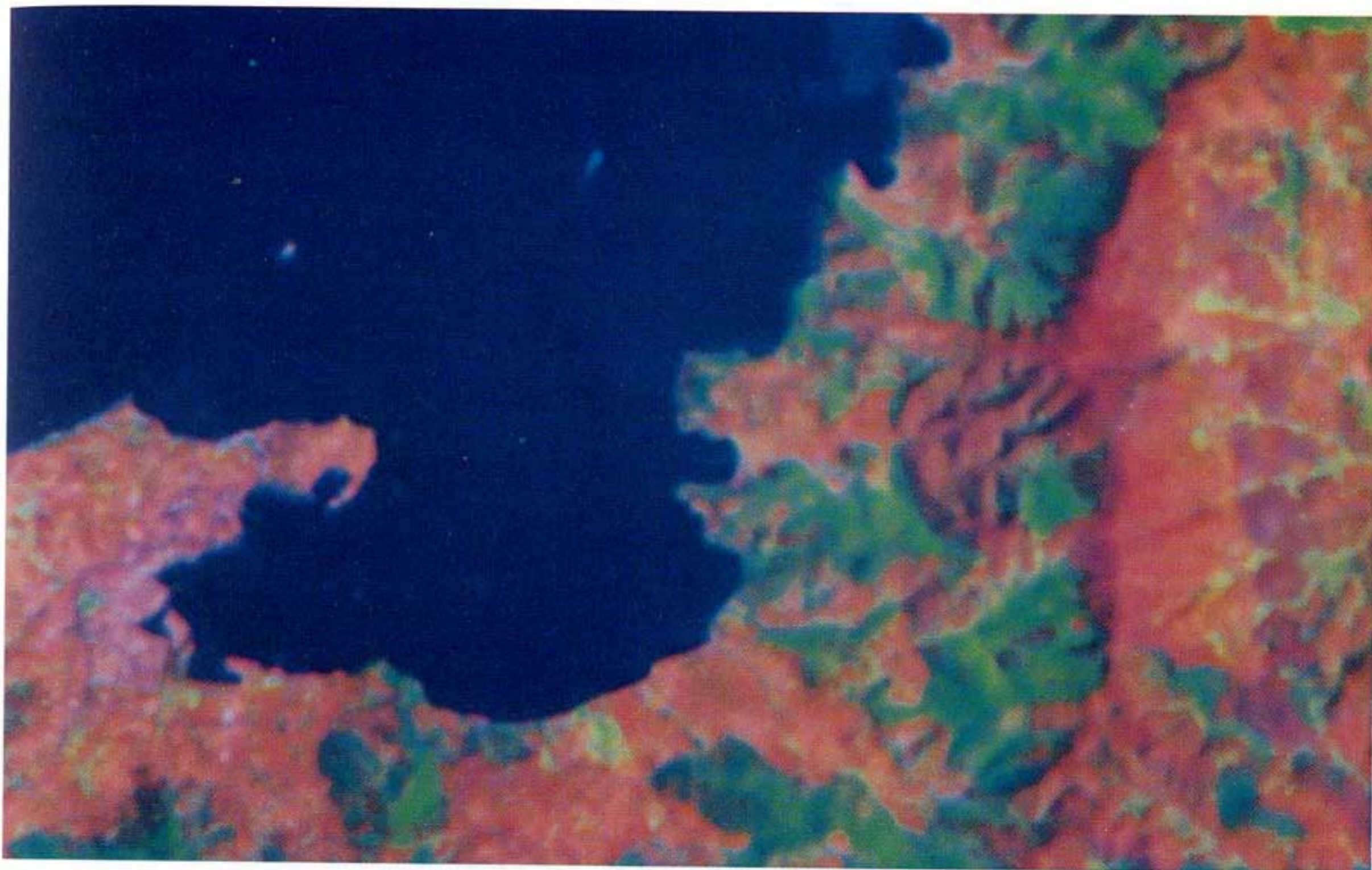


Foto 1 Immagine LANDSAT del Golfo di Portoferraio (Isola d'Elba)

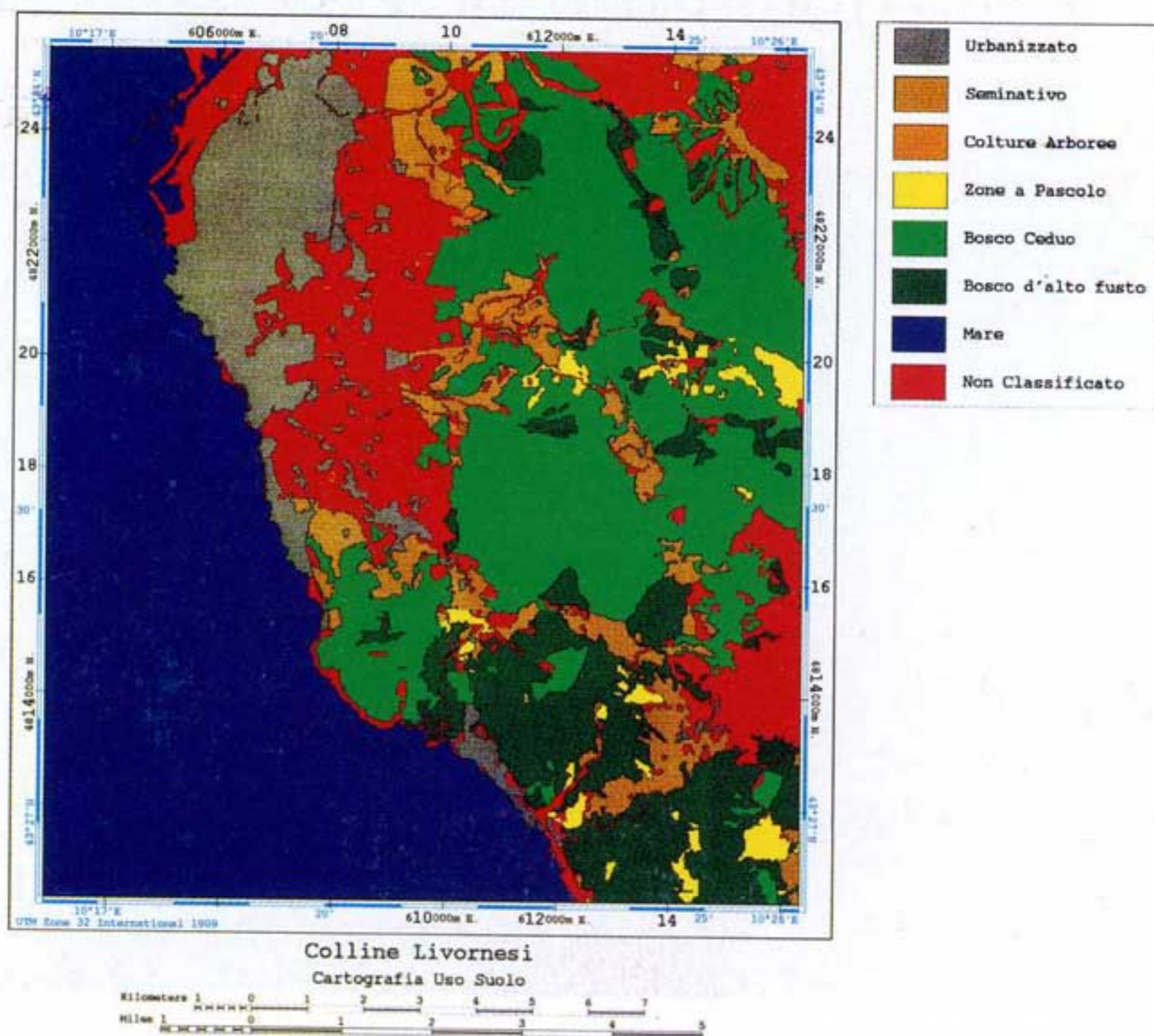


Foto 2 Mappa di uso del suolo ottenuta da classificazione dati LANDSAT



Foto 3 Panoramica della discarica di Literno

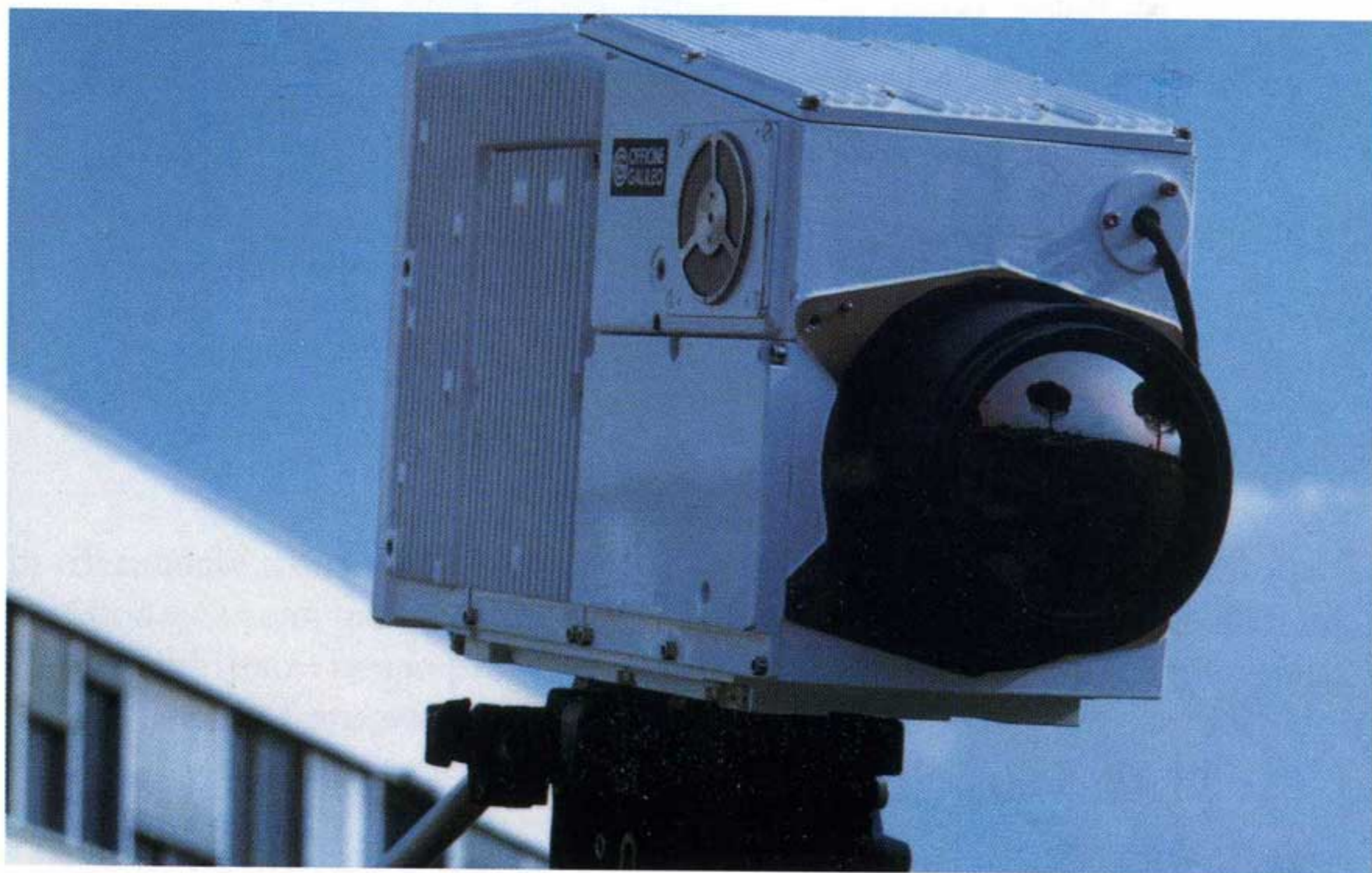
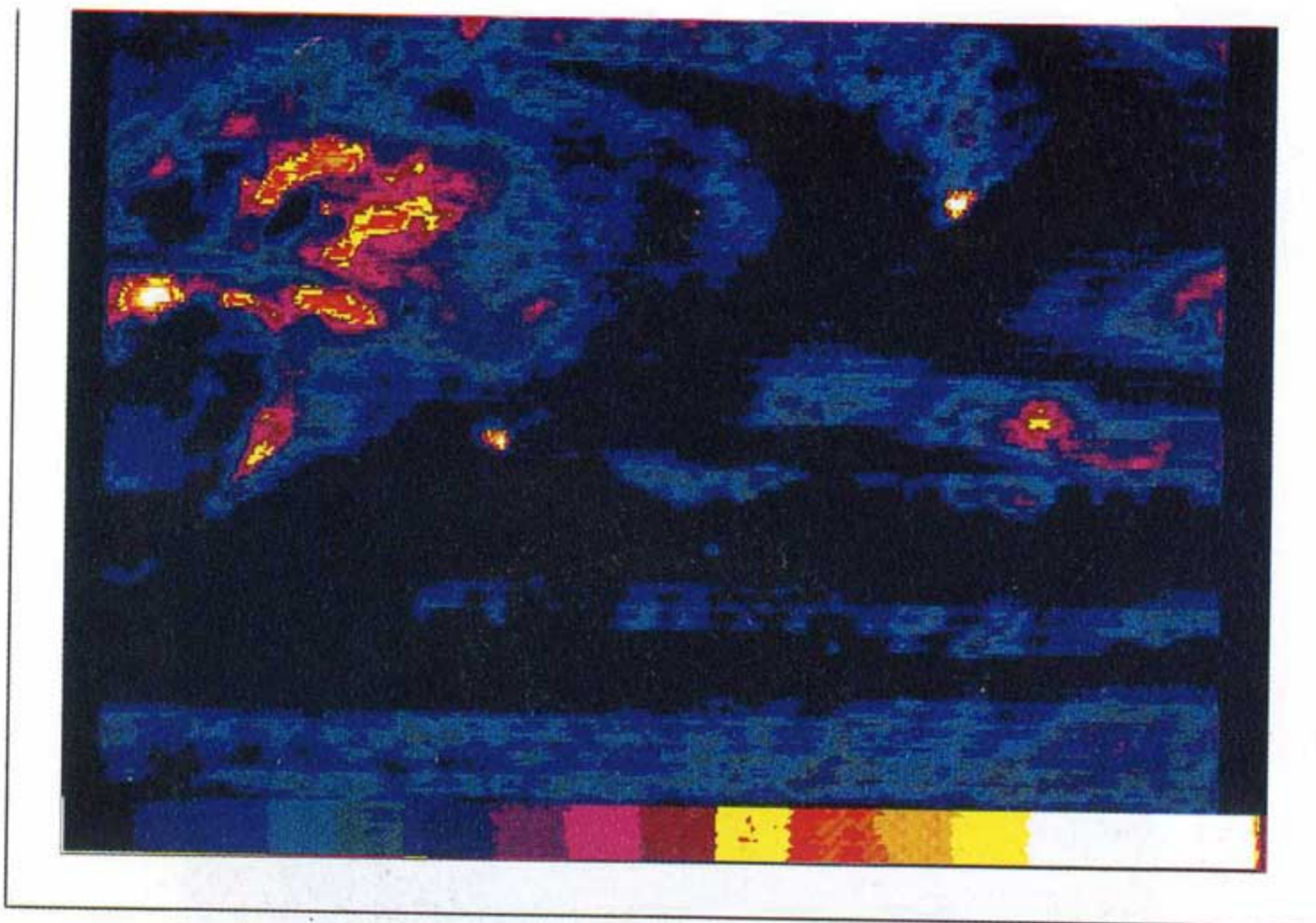


Foto 4 Primo piano della camera termica VTG 240 di produzione Officine Galileo e operante nella banda $8\div 12 \mu\text{m}$



Isola d'Elba - Discarica di Valle del Literno

25 Marzo 1993, ore 20:10 - Immagine IR 8-12 micron

Foto 5 Immagine IR in falsi colori di un particolare della discarica di Literno; da notare la presenza dei camini di captazione del biogas e, in basso a sinistra, di una evidente anomalia termica superficiale



Foto 6 Panoramica dei sensori impiegati nel corso delle campagne di misura relative al Programma MedSPA

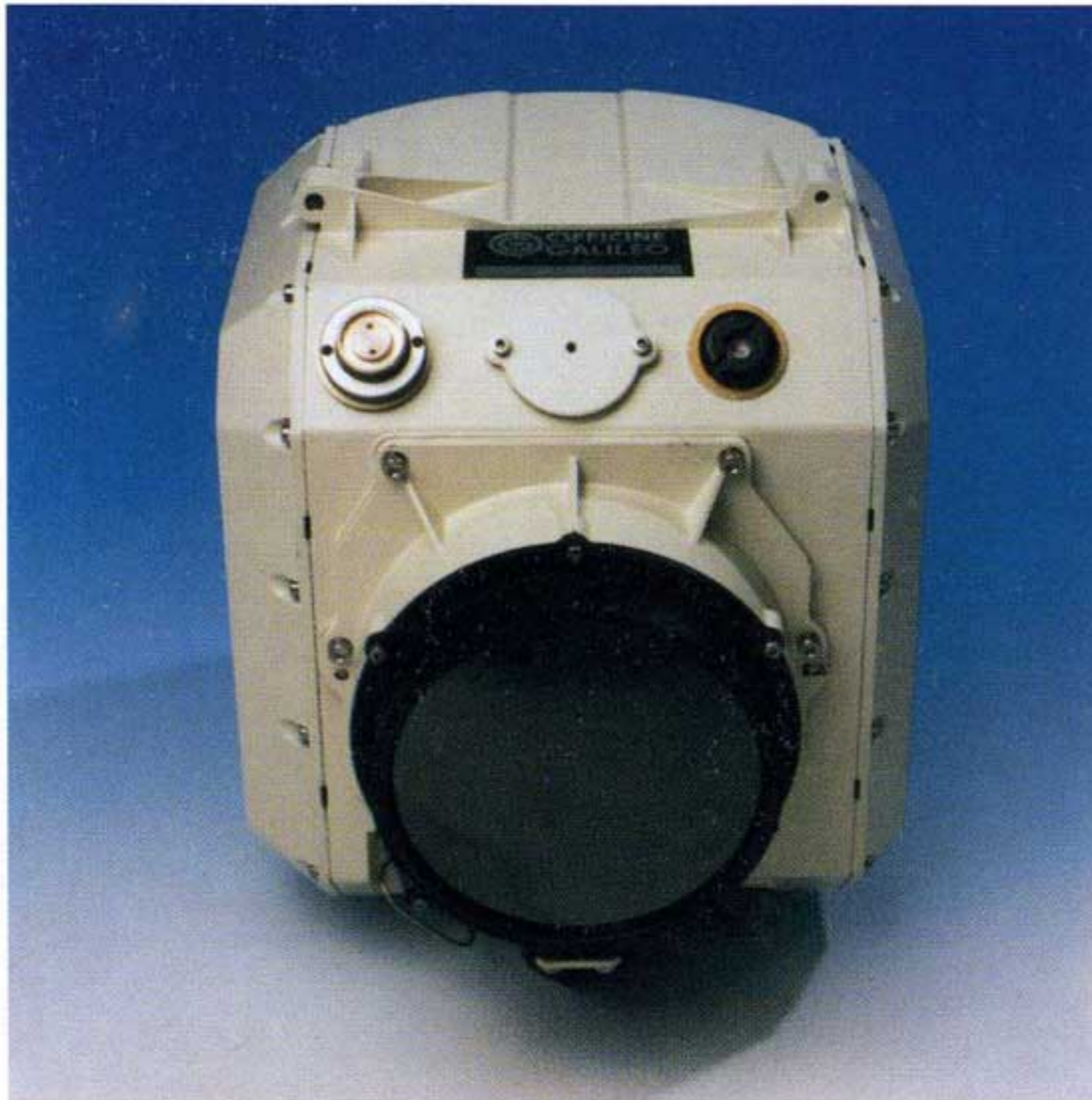


Foto 7 Primo piano del radiometro ETS 512 di produzione Officine Galileo



Foto 8 Primo piano del radiometro IR 8÷12 μm di produzione INFRAMETRICS

Il sito di installazione del sistema, per la realizzazione del quale D.S.A.T. ha ottenuto nel 1992 un co-finanziamento dalla Comunità Europea, è stato proposto presso una delle isole dell'Arcipelago Toscano.

Il progetto, denominato *Progetto MedSPA*, è stato portato a termine nel biennio '92-'93 ed infine testato *in loco* nel Dicembre '93. Il programma temporale di sviluppo è stato suddiviso in cinque fasi (vedi Tabella 4.1), ognuna delle quali articolata in varie attività di realizzazione.

Tabella 4.1
Attività relative alle successive fasi di sviluppo del Progetto MedSPA

	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV	Fase V
Attività I	Individuazione delle discariche significative	Attività di costruzione, installazione, integrazione e messa a punto del sistema	Studio delle correzioni da apportare ai dati rilevati per gli effetti microclimatici al suolo e per le variazioni dell'emissività del terreno	Ricognizione periodica di: - fianchi - bordi esterni - piede delle discariche prescelte	Correzione dati IR acquisiti per gli effetti di emissività e fenomeni microclimatici
Attività II	analisi discariche prescelte e localizzazione del sistema in collaborazione con gli Enti preposti alla gestione ed al controllo degli impianti		Realizzazione del SW relativo alle correzioni di cui al punto precedente, e per l'elaborazione e rappresentazione simultanea dei dati VIS e IR	Controllo periodico di aree con copertura definitiva in particolari periodi dell'anno in relazione ai massimi e minimi flussi di rifiuti, periodi piovosi e siccitosi	Rappresentazione delle anomalie termiche ed interpretazione delle stesse sulla base del confronto con le immagini VIS
Attività III	Acquisizione e valutazione dei dati di progetto forniti dall'Ente che fornisce l'impianto (idrogeologici, litostratigrafici, meteorologici)		Studio della modellistica per la stima del flusso di calore e di biogas all'interfaccia discarica-atmosfera	Controllo periodico di: ◊ anomalie termiche dopo l'impermeabilizzazione di ciascun nucleo di accrescimento ◊ rete di drenaggio del percolato ◊ coperture parziali	Calcolo del flusso di biogas e di calore sulla base delle eventuali anomalie termiche rilevate
Attività IV				Misure di verità a terra per alcune aree (temperatura superficiale, temperatura in profondità all'interno dei camini collettori)	Confronto finale di tutte le immagini telerilevate, al fine di ricostruire l'andamento temporale dello stato termico dei prismi di materiale stratificato già ricoperti definitivamente
Attività V				Indagini in loco con metodi di prospezione geofisica e geo-chimico-fisica	

4.2 Scelta dell'area di test

Fra le attività nelle quali è stata articolata la Fase I di sviluppo del Progetto MedSPA, era prevista un'analisi delle discariche più significative presenti all'interno dell'arcipelago toscano al fine di localizzare un'area di test all'interno della quale effettuare la necessaria sperimentazione per la calibrazione del sistema di monitoraggio.

Tale analisi, effettuata sia su base bibliografica che attraverso sopralluoghi, ha condotto alle seguenti conclusioni:

- Isola di Capraia: la discarica è stata bonificata ed i rifiuti dopo lo stoccaggio, vengono trasportati in nave fino a Livorno
- Gorgona e Pianosa: esistono problemi logistici ed amministrativi, poichè entrambe le isole ospitano istituti penali del Ministero di Grazia e Giustizia; lo smaltimento avviene mediante incenerimento
- Giannutri e Montecristo: a causa della scarsa popolazione i rifiuti solidi vengono stoccati provvisoriamente e quindi trasportati via mare fino a discariche situate in continente
- Isola del Giglio: è presente una discarica di rifiuti solidi urbani con una ridotta capacità di volume
- Isola d'Elba: risulta la maggiore dell'arcipelago toscano, sia per estensione (circa 22.350 ha) che per popolazione, con un ecosistema assai più vasto e complesso rispetto alle altre isole. E' caratterizzata da un ingente incremento stagionale della pressione antropica (da 40.000 abitanti nel periodo invernale a circa 400.000 in quello estivo) e che per di più si verifica in un intervallo di tempo relativamente limitato; di conseguenza la produzione di rifiuti solidi urbani cresce ingentemente in modo repentino, con conseguenti problemi di raccolta, trasporto e smaltimento

Ciò considerato, la situazione più idonea per l'applicazione di un sistema sperimentale di monitoraggio è apparsa la discarica controllata del comprensorio dell'Elba, localizzata nella valle del torrente Literno, nel comune di Campo nell'Elba.

Nelle foto 3 è mostrata una panoramica della discarica come appare dal *sito di sperimentazione*, posto alle pendici del Monte Bacile, nel quale erano installati i sensori MIR, TIR e VIS dei quali fa uso il sistema.

4.3 Lo smaltimento rifiuti nel comprensorio elbano

Fino all'termine degli anni '70 alcuni comuni elbani ricorrevano ancora alla tecnica di incenerimento. Successivamente si è verificato un adeguamento generalizzato allo smaltimento tramite conferimento dei rifiuti in una discarica non controllata, senza tuttavia adottare alcun criterio di protezione ambientale e nell'assenza di qualsiasi requisito necessario che motivasse la scelta del sito.

In sostanza negli anni ottanta il conferimento per lo smaltimento avveniva presso le seguenti località:

<u>RIO ALBANO</u> :	per i comuni di Rio Marina e Rio Elba
<u>LITERNO</u> :	per i comuni di Campo nell'Elba, Marciana e Marciana Marina
<u>BURACCIO</u> (zone fortino di Buraccio):	per il Comune di Portoferraio
<u>BURACCIO</u> (pendici Monte Castello):	per il Comune di Porto Azzurro
<u>CALAMITA</u> :	per il Comune di Capoliveri

Tale stato di cose ha comportato gravi problemi soprattutto per le capacità di recepimento dei siti, che non avevano nemmeno i requisiti volumetrici necessari. Per questo motivo la situazione si è fatta ancora più grave e ciò ha comportato l'adozione di provvedimenti straordinari da parte della Regione Toscana con la nomina di un commissario *ad acta*.

Pertanto la regione Toscana, a fronte dei siti già individuati e compromessi, con il DPGRT 65/88 ha stabilito che il commissario *ad acta* realizzasse una discarica di rifiuti solidi urbani presso Literno, in corrispondenza di una discarica non controllata già attiva dal 1968. Tale scelta è stata motivata da una maggiore capacità ricettiva rispetto ad altri siti.

Per la realizzazione dell'impianto di Literno, alla luce dello stesso decreto, si provvedeva alla predisposizione di due discariche temporanee (Rio Albano e Calamita), attivate durante la stagione estiva 1988.

Il 14 dicembre 1988 il commissario ordinava ai comuni elbani, con decorrenza dal primo gennaio 1989, di provvedere alla gestione dell'impianto di Literno.

Il 20 gennaio 1989 il presidente della Comunità Montana dell'Elba e Capraia affida all'ufficio di Piano dell'Ente la funzione di coordinamento della gestione alla luce degli accordi intercorsi tra i singoli comuni e l'ente comprensoriale che sotto il profilo amministrativo e tecnico si è assunto l'impegno di coordinare l'attività lasciando ai singoli comuni l'onere delle spese di gestione, come è indicato nella delibera C.M. n° 16/5.1.89.

Dal gennaio 1989 l'Ufficio di Piano della Comunità Montana si occupa della gestione tecnica della discarica di Literno controllando l'esercizio per quanto concerne il rispetto del piano di coltivazione, il corretto conferimento da parte delle utenze oltre alla predisposizione del piano economico e della ripartizione della spesa tra i comuni del comprensorio.

Dall'analisi dei dati raccolti ed elaborati nello stesso triennio, è emerso chiaramente il divario tra le quantità estive e quelle invernali, con picchi nei mesi di luglio ed agosto, ad ulteriore conferma di un flusso turistico concentrato in un arco di tempo molto limitato e causa di notevoli difficoltà di adattamento per le varie infrastrutture

4.4 La discarica RSU di Literno

La discarica di Literno, impianto controllato a compressione di rifiuti solidi urbani, è situata nella valle del torrente Literno nel Comune di Campo nell'Elba, a circa 1 Km da Procchio.

L'impianto ha attualmente una superficie di circa 1.2 ha, con un programma futuro di destinazione a riciclaggio di rifiuti solidi urbani.

I servizi di nettezza urbana nel loro insieme (raccolta, trasporto e smaltimento) costituiscono per l'Isola d'Elba una priorità sia di tipo ambientale che sociale, in ragione della peculiare vocazione turistica.

L'espansione sempre più accentuata della domanda di tali servizi è un fenomeno che, anche nell'Elba, si è da tempo sviluppato parallelamente all'elevarsi del livello medio di vita della popolazione residente: a ciò va

sommata la notevole presenza di turisti durante un arco temporale che va facendosi sempre più esteso col passare degli anni.

Allo stesso tempo occorre rilevare come siano intervenute profonde modificazioni della composizione, della quantità e del volume dei rifiuti urbani prodotti dalla comunità elbana, con conseguenti ripercussioni sull'organizzazione e sulla tecnologia dei servizi connessi, in particolare sui possibili orientamenti da adottare in relazione ai rischi ambientali derivanti dallo smaltimento.

Una prima scelta deriva dalla necessità di rispettare la distanza di minima dalle civili abitazioni, a causa dell'inevitabile dispersione di materiale leggero per effetto del vento, del sollevarsi di polveri in periodi asciutti, del disturbo provocato dal transito di automezzi pesanti adibiti al trasporto, e infine del rumore dei mezzi meccanici impiegati per la sistemazione e la copertura dei rifiuti stessi.

La discarica di Literno oltre ad essere situata in vicinanza di nuclei abitati (l'abitazione più vicina dista meno di 250 m), per la sua posizione geografica si è anche venuta a trovare in una zona ad alto potenziale di sviluppo urbanistico.

Inoltre, data la presenza di folta macchia mediterranea intorno alla discarica, il rischio di incendi boschivi risulta elevato.

Dall'esame delle caratteristiche dei rifiuti del comprensorio elbano, si è potuta riscontrare una tendenza all'aumento quantitativo pro capite dei rifiuti, un ancor più accentuato aumento in volume, ed una conseguente riduzione del peso specifico. Anche per quanto riguarda la composizione merceologica si osserva una riduzione dei materiali di piccola granulometria e pesanti, con conseguente aumento della carta, degli imballi in genere e della plastica.

Va inoltre sottolineata la presenza di rifiuti ingombranti, quali mobili, elettrodomestici e simili, che una volta potevano essere collocati presso i raccoglitori di rottami, oggi scomparsi.

Accanto a questi fenomeni non va poi trascurata la presenza di scarichi abusivi, e quindi non controllati, i quali danno origine a forme di degrado ambientale diffuso.

Una rete di monitoraggio orientata alla valutazione dell'ampiezza e del grado di pericolosità dei fattori inquinanti prodotti dalla discarica di Literno risulta

quindi indispensabile per una corretta gestione dell'impianto di smaltimento, per il recupero e per il controllo ambientale dell'area.

4.5 Progetto di un sistema di monitoraggio discariche RSU

Prima di descrivere la realizzazione del sistema sviluppato nell'ambito del Progetto MedSPA per il monitoraggio di discariche RSU è utile richiamare alcuni aspetti sui processi fisico-chimici alla base della produzione termica all'interno di una discarica RSU.

La fermentazione dei rifiuti di natura organica che giungono in discarica continua anche dopo il loro interrimento, dando luogo ad una reazione anaerobica di tipo esotermico. Uno dei prodotti di tale reazione è costituito dal biogas, una miscela gassosa tipicamente composta da azoto, ossigeno, metano e anidride carbonica.

Il calore prodotto dalla digestione raggiunge la superficie principalmente attraverso un processo di trasmissione di tipo convettivo, nel quale il vettore di diffusione è costituito dal biogas originato dalla digestione stessa.

E' nata così l'idea di effettuare un monitoraggio dell'area della discarica con sensori operanti nell'infrarosso termico ($8\div 12\ \mu\text{m}$), in grado di evidenziare e controllare tutti quei fenomeni fisico-chimici connessi alla generazione di calore e che avvengono all'interno dell'impianto stesso.

In Figura 4.1 è mostrata a titolo di esempio una panoramica della zona di coltivazione discarica provinciale di Brescia acquisita con camera termica operante nella banda $8\div 14\ \mu\text{m}$.

La camera termica è uno strumento ottico che fornisce in uscita un segnale video standard che inviato ad un monitor mostra una immagine nell'infrarosso termico della scena osservata. Il segnale video può essere eventualmente registrato su comune videoregistratore o digitalizzato e memorizzato su supporto magnetico. Da notare che nell'immagine IR il livello di grigio (dal nero al bianco) di ogni pixel è correlato ad un diverso valore di temperatura termodinamica, anche se in questo caso sarebbe più esatto parlare di *temperatura di brillantezza*.

In particolare utilizzando una camera termica possono essere detettate e successivamente analizzate le anomalie termiche superficiali presenti

all'interno della discarica, alcune delle quali possono essere correlate ad eventuali situazioni di rischio ambientale, quali:

- fuoriuscite anomale di biogas al di fuori degli appositi camini di drenaggio
- fuoriuscite anomale di liquami
- principi d'incendio e/o esplosioni causati dalla infiammabilità di alcuni dei gas componenti la miscela del biogas

A tal fine è stato ideato e preprogettato un sistema integrato multispettrale operante in tre diverse bande: infrarosso medio (MIR), infrarosso termico (TIR) e visibile (VIS) per il monitoraggio di discariche RSU.

Il sistema, è in grado di individuare ed analizzare anomalie termiche superficiali, di delimitare l'area affetta da efflusso di biogas, di calcolarne la capacità di tenuta (grazie ad un'opportuna modellistica fisica) e di segnalare eventuali situazioni di rischio ambientale che si verificano all'interno della discarica RSU o nelle sue immediate vicinanze.

Nella fase iniziale del progetto, per valutare la fattibilità della metodologia applicata, sono stati effettuati alcuni sopralluoghi preliminari nei quali è stata utilizzata la camera termica VTG 240, di produzione Officine Galileo, operante nella banda $8\div 12 \mu\text{m}$ (vedi foto 4). Tale strumento, pur non possedendo riferimenti termici interni e non essendo quindi utilizzabile per operazioni di misura di temperatura, si presta invece ottimamente ad analisi speditive di tipo qualitativo volte alla detezione di aree a diversa temperatura. La minima differenza di temperatura rilevabile, ovvero la sua *risoluzione termica*, è di circa $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nella foto 5 è invece riportata un'immagine in falsi colori ottenuta dalla elaborazione di una immagine IR acquisita dalla VTG 240; essa mostra un particolare della discarica di Literno: in essa sono riconoscibili i camini di captazione del biogas (colorati in giallo) chiaramente più *caldi* dello sfondo, ed una anomalia termica superficiale diffusa, che è stato riscontrato essere stata provocata da una incidentale fuoriuscita di percolato. Sebbene più freddo di quello prodotto all'interno del corpo della discarica, anche il

percolato è infatti caratterizzato da una temperatura significativamente più elevata rispetto a quella del terreno

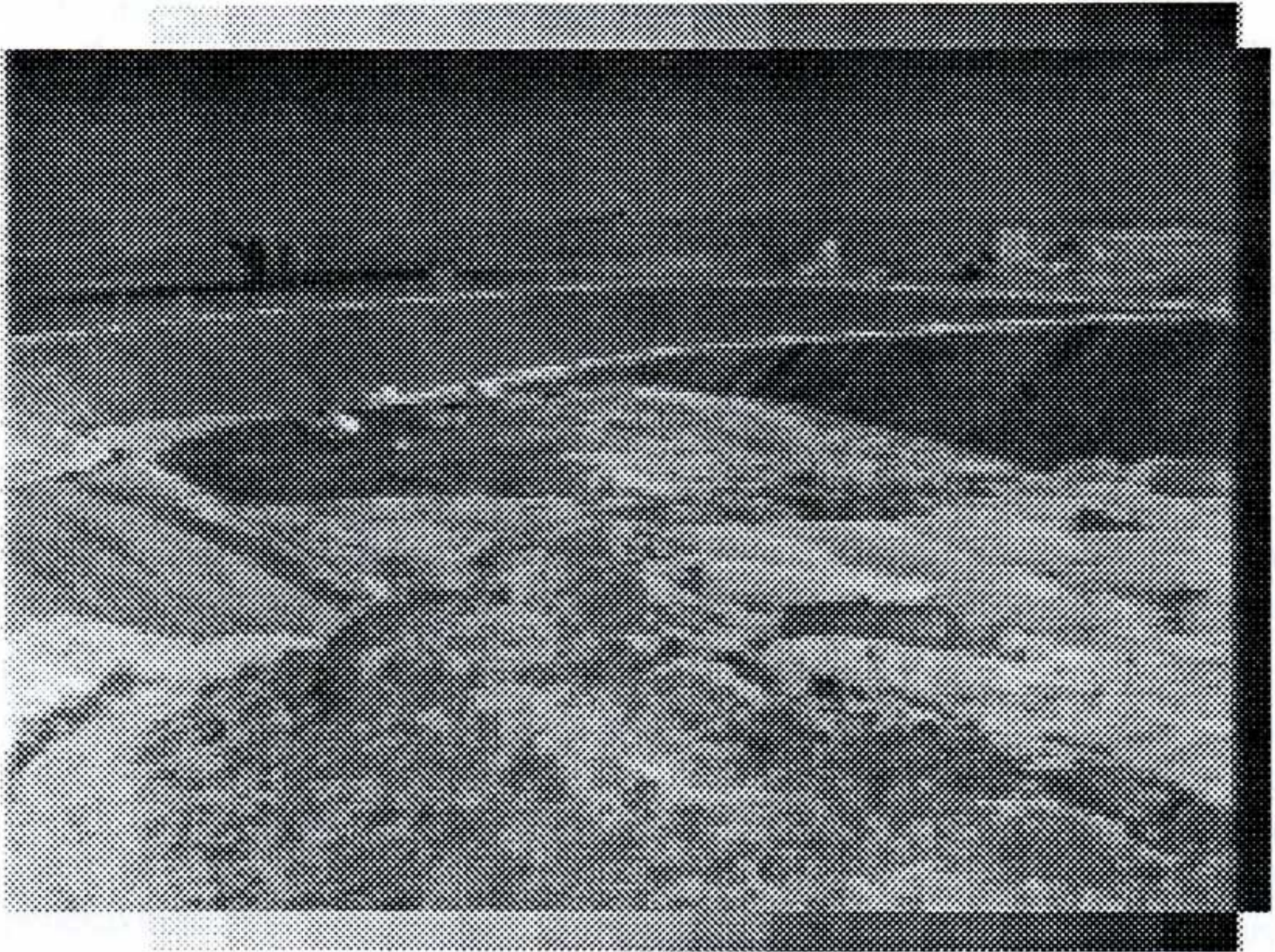


Figura 4.1 Immagine nell'infrarosso termico ($8\div 14 \mu\text{m}$) della zona di coltivazione della discarica provinciale di Brescia (la termografia è stata ottenuta con un radiometro ETS 512 di produzione Officine Galileo)

Nella foto 6 viene quindi mostrato l'intero apparato sensoristico del sistema, costituito da

- radiometro a immagine ETS 512 operante nella banda $8\div 12 \mu\text{m}$ (di produzione Officine Galileo)
- sensore di punto IRIS operante nella banda $3\div 5 \mu\text{m}$ (di produzione Officine Galileo)
- telecamera operante nel visibile

nella foto sono visibili il radiometro ETS 512 (vedi foto 7) e il radiometro IM 600 della INFRAMETRICS (vedi foto 8), utilizzato per una prova comparativa durante le operazioni di calibrazione e messa a punto del sistema.

All'interno dell'area di test, situata presso la discarica RSU di Literno (Isola d'Elba), sono state svolte le attività di sperimentazione, i sopralluoghi e le campagne di misura, necessarie per la messa a punto del sistema

Dai sopralluoghi preliminari (Marzo-Aprile 1993) si è passati alle campagne di misura intermedie (Luglio e Ottobre 1993), fino alla taratura del modello di efflusso del biogas (novembre 1993), effettuata per confronto diretto con le misure di punto effettuate sui camini collettori.

5. PROTOTIPO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO INFRAROSSO SU DISCARICHE RSU

5.1 Introduzione

Nell'ambito delle attività del programma MedSPA è stato realizzato un sistema di monitoraggio operante nell'infrarosso medio e termico per la prevenzione e la segnalazione automatica di situazioni di rischio ambientale all'interno di discariche di rifiuti solidi urbani (RSU).

Al termine del progetto, il 25 Novembre 1993, è stato effettuato un collaudo dimostrativo sulla discarica di Literno in presenza di funzionari ed operatori del settore impianti di smaltimento simulando tutte le procedure operative di installazione, acquisizione di termografie, sorveglianza continuativa dell'area, generazione di allarmi, elaborazione in tempo reale dei dati e presentazione di mappe di biogas.

5.2 Sopralluoghi e campagne di misura

Durante il periodo di realizzazione del progetto sono state effettuati numerosi sopralluoghi e campagne di misura presso la discarica di Literno per la messa a punto del sistema.

Sensori IR sono stati impiegati da varie postazioni interne ed esterne all'impianto al fine di caratterizzare termicamente i differenti settori durante l'arco della giornata ed in base alle condizioni di confeimento.

I sopralluoghi hanno avuto inizio nell'estate '92 con una strumentazione tipicamente costituita da:

- camera termica VTG 240 operante nella banda 8÷12 μm

- monitor B/N per la visualizzazione dell'immagine IR
- videoregistratore VHS per l'acquisizione dell'immagine IR

Le prime prove di acquisizione di immagini IR sono avvenute da postazione sopraelevata e sono state rivolte alla rivelazione di anomalie termiche presenti sulla superficie della discarica ed alla loro eventuale correlazione con situazioni di rischio ambientale, quali ad esempio fuoriuscita di percolato o esalazioni anomale di biogas. In particolare sono state analizzate le diverse risposte fornite da sorgenti termiche note e costanti, quali ad esempio i camini di drenaggio del biogas, ed eventuali anomalie termiche superficiali, valutando i criteri più efficienti per la loro discriminazione (vedi Fig. 5.1).

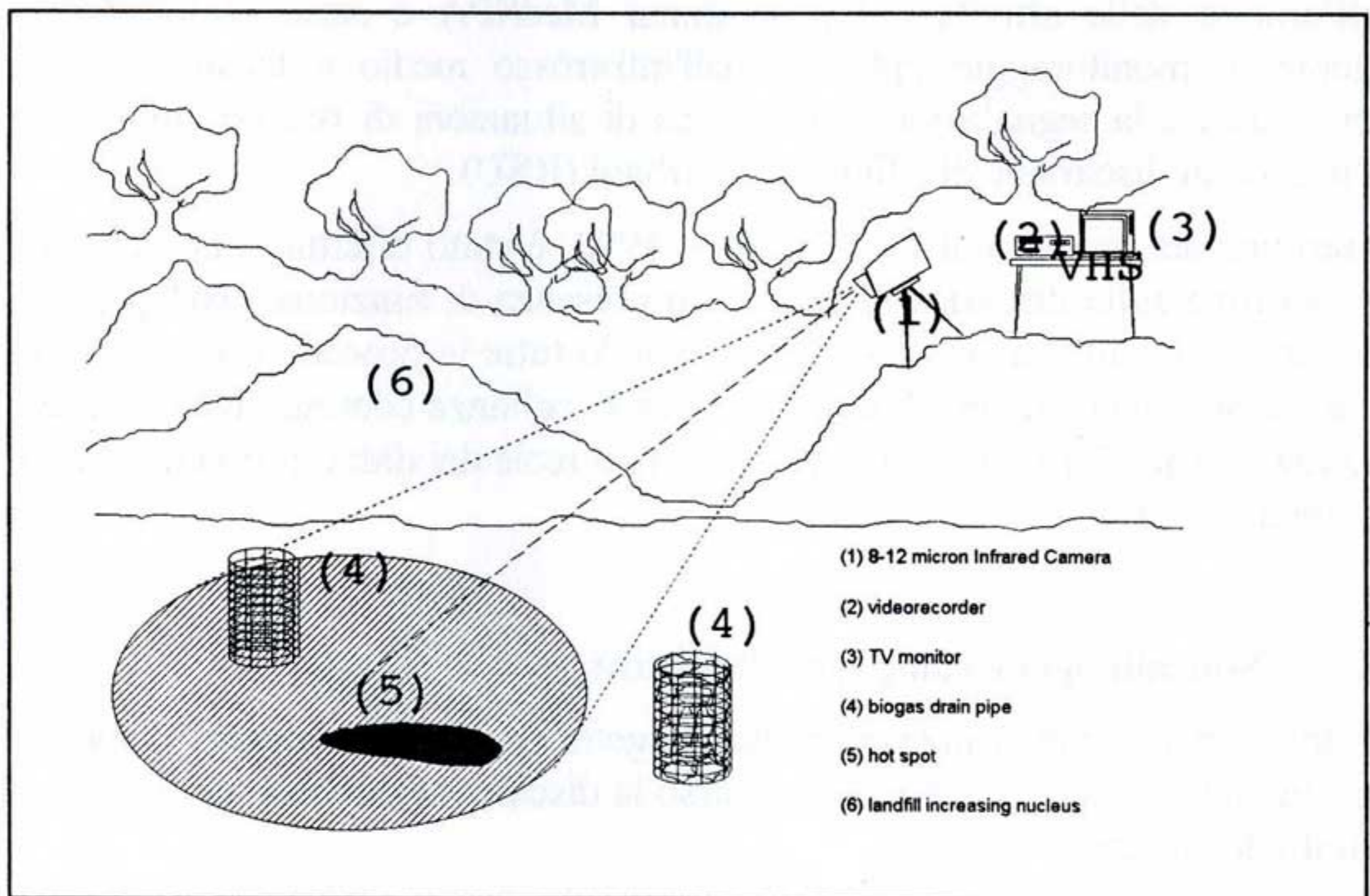


Figura 5.1 Configurazione operativa utilizzata durante i sopralluoghi preliminari presso la discarica di Literno

Poichè la camera termica VTG 240 non è dotata di riferimenti in temperatura interni, essa non si presta ad applicazioni di tipo quantitativo. Tuttavia, data la portabilità e la resistenza di questo strumento anche nelle condizioni più avverse, è stato ritenuto il più indicato per una sperimentazione preliminare da effettuarsi in assenza di punti di appoggio predefiniti.

Ciò nonostante, laddove si è resa necessaria una misura sono stati creati in campo i riferimenti termici necessari per l'elaborazione di termografie a partire dalle immagini in temperatura di brillantezza fornite dalla VTG 240. Sono state così inserite nella scena osservata due sorgenti termiche a temperatura nota in modo da poter attribuire al loro livello di grigio nell'immagine IR un preciso valore in temperatura e poter quindi effettuare una calibrazione del sensore tramite interpolazione lineare (al 1° ordine).

La prima sorgente era costituita da una lastra di alluminio termostata da una stufa elettrica: la temperatura della lastra veniva rilevata da una termoresistenza al momento dell'acquisizione dell'immagine IR. La seconda sorgente era invece costituita da una lastra di alluminio identica alla prima ma posta a temperatura ambiente, sempre corredata di termoresistenza per la misurazione della temperatura. Ovviamente entrambe le lastre erano poste in ombra nelle ore diurne per evitare l'irraggiamento solare diretto e la sua riflessione.

Successivamente sono anche state effettuate alcune prove comparative tra la VTG 240 corredata di riferimenti termici in campo ed un radiometro IM 600 di produzione INFRAMETRICS. Nella foto 9 è mostrato un particolare della discarica mentre nella foto 10 viene riportato lo stesso particolare acquisito dal radiometro INFRAMETRICS nella banda $8\div 12\mu\text{m}$.

Attraverso un monitoraggio termico dell'area adibita a discarica RSU è stato possibile rivelare alcune fuoriuscite dei liquami dalle vasche di raccolta ed alcune fughe di biogas esterne ai camini di drenaggio.

Poichè alcune campagne di misura sono state condotte anche oltre il tramonto è stata riscontrata in discarica una massiccia presenza faunistica sia diurna (gabbiani, corvidi, etc.) che notturna (volpi, cani, gatti, etc.), con un reale pericolo in quanto potenziali veicoli di infezione verso la popolazione data la notevole vicinanza a centri abitati ed alle zone balneari.

Nella foto 11 è rappresentato il momento del prelievo di un campione di biogas da un camino di efflusso all'interno della discarica. Campioni di biogas sono stati raccolti su vari camini e la loro composizione chimica è stata analizzata presso i laboratori dell'USL 10/A di Firenze.

In Tabella 5.1 è riportata la composizione percentuale (v/v) nei campioni di biogas consegnati il 01/10/93 e prelevati presso la discarica di Literno il 30/09/93.

Tabella 5.1

Composizione percentuale (v/v) dei campioni di biogas prelevati all'uscita di un camino collettore per il drenaggio del biogas presso la discarica di Literno (Marina di Campo, Isola d'Elba) il 30 Settembre 1993

	camino destro	camino sinistro	camino destro	camino sinistro	camino destro	camino sinistro
	1	2	1	2	1	2
O₂	20.0	20.0	17.6	17.6	18.4	18.4
N₂	74.3	74.0	65.8			
CH₄	3.3	3.6	10.0	10.1	8.2	8.2
CO₂	2.3	2.3	6.5	6.6	5.3	5.2

La determinazione è stata effettuata per gascromatografia con detector a conducibilità termica (HWD). Su questi camini è anche stato misurato il flusso di biogas, convogliato verso un anemometro a ventola col quale è stato possibile effettuare una lettura diretta dei valori al momento dell'acquisizione dell'immagine IR. Il valore misurato di flusso ai camini è stato utile per calibrare la modellistica fisica per la stima del flusso di biogas all'interfaccia superficie-aria.

Nella foto 12 è rappresentato il momento della misura tramite termoresistenza della temperatura superficiale della discarica. La temperatura superficiale costituisce il parametro chiave per il modello di efflusso di biogas. La foto è stata scattata in occasione del collaudo dimostrativo del sistema di monitoraggio effettuato il 26 Novembre 1993, durante il quale è stata effettuata la validazione del modello.

5.3 Camere termiche impiegate nel corso delle campagne di misura

Come abbiamo già avuto modo di esporre, durante le campagne di misura sono stati impiegati fondamentalmente tre diversi tipi di camera termica. La prima, denominata VTG 240, è prodotta da Galileo e opera nella banda spettrale 8÷12 µm; le sue specifiche tecniche sono riportate in Tabella 5.2.

Tabella 5.2
Caratteristiche del sensore a immagine VTG 240

<u>Alimentazione:</u>	tensione	26.5 VDC
	potenza assorbita	120 W
<u>Caratteristiche Ottiche:</u>	Campo di vista largo	6.9° x 3.45°
	Campo di vista stretto	2.3° x 1.15°
	Risoluzione (in campo stretto)	0.16 mrad
<u>Caratteristiche IR</u>	Banda Spettrale	8÷12 µm
	Ricevitore IR	
	- quantità elementi:	60
	- tipo elementi:	HgCdTe
	Formato immagine	246x512
<u>Modi Operativi:</u>	Campo largo/stretto	
	Immagine normale/ivertita	
	Zoom inserito/escluso	
<u>Criogenia:</u>	Tipo:Split Stirling	
	Fluido:Elio gassoso	
	Temperatura di regime	80 K
	Tempo di regimazione	≤10 minuti
<u>Conversione IR-TV</u>	Uscita:	
	- tipo	video composito
	- standard	CCIR (625 righe 50 Hz) :
	impedenza	75 Ω
	Toni di grigio	256
<u>Prestazioni:</u>	MRTD	≤0.35°C (a 1.5 cy/mrad)
	NETD (banda 1÷6 KHZ)	≤0.2°C

Questo sensore, pur collocandosi in una fascia intermedia per quanto riguarda il rapporto qualità/prezzo, è apparso il più adatto per soddisfare le esigenze di efficienza e di portabilità necessarie alla realizzazione del progetto MedSPA.



Foto 9 Immagine di un particolare della discarica di Literno

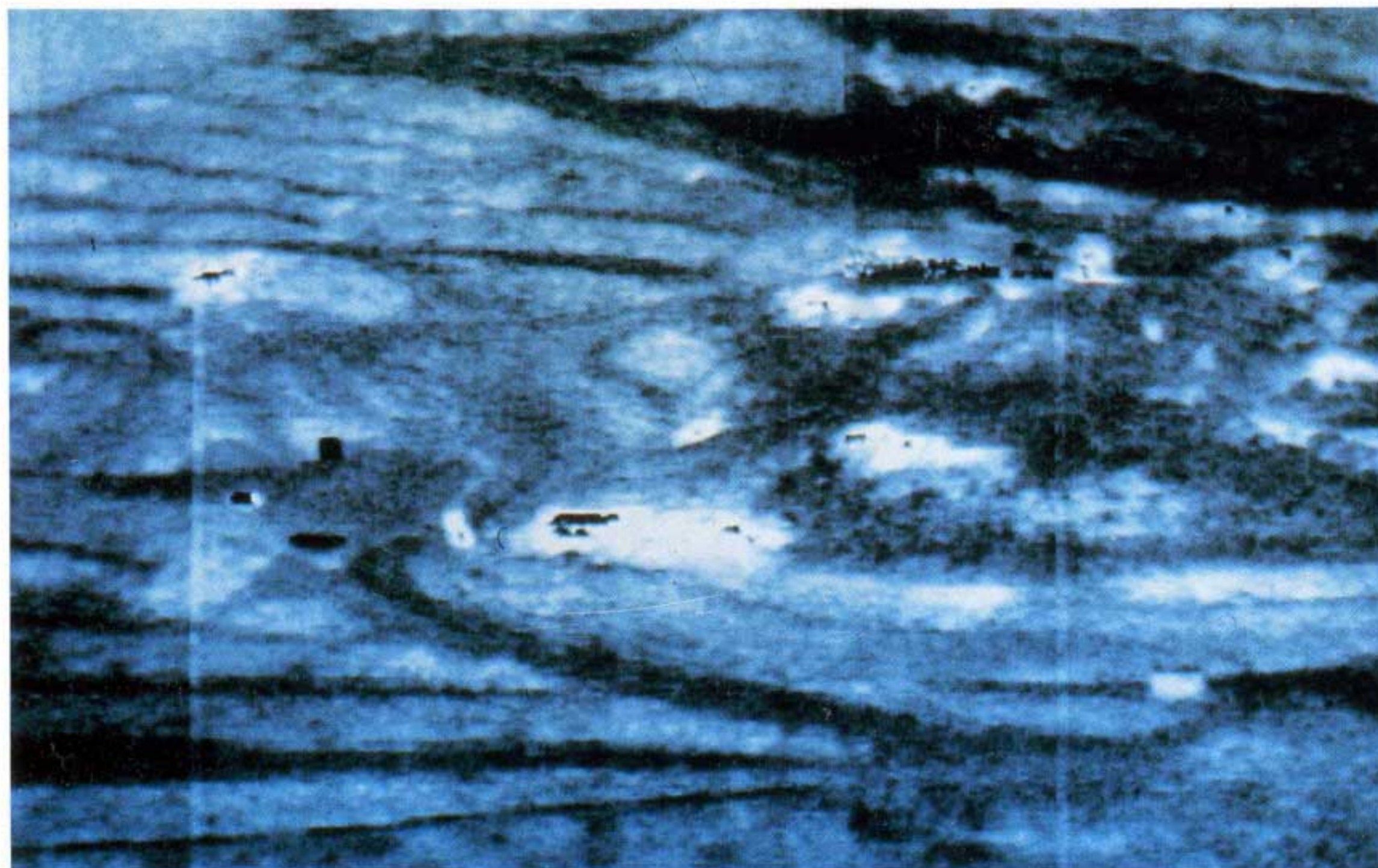


Foto 10 Termografia del particolare della discarica riportato nella foto precedente acquisita dal radiometro INFRAMETRICS



Foto 11 Prelievo di un campione del biogas da un camino di captazione per analisi chimica; nella foto si nota anche un multimetro per la misurazione tramite sonda della temperatura di efflusso del biogas

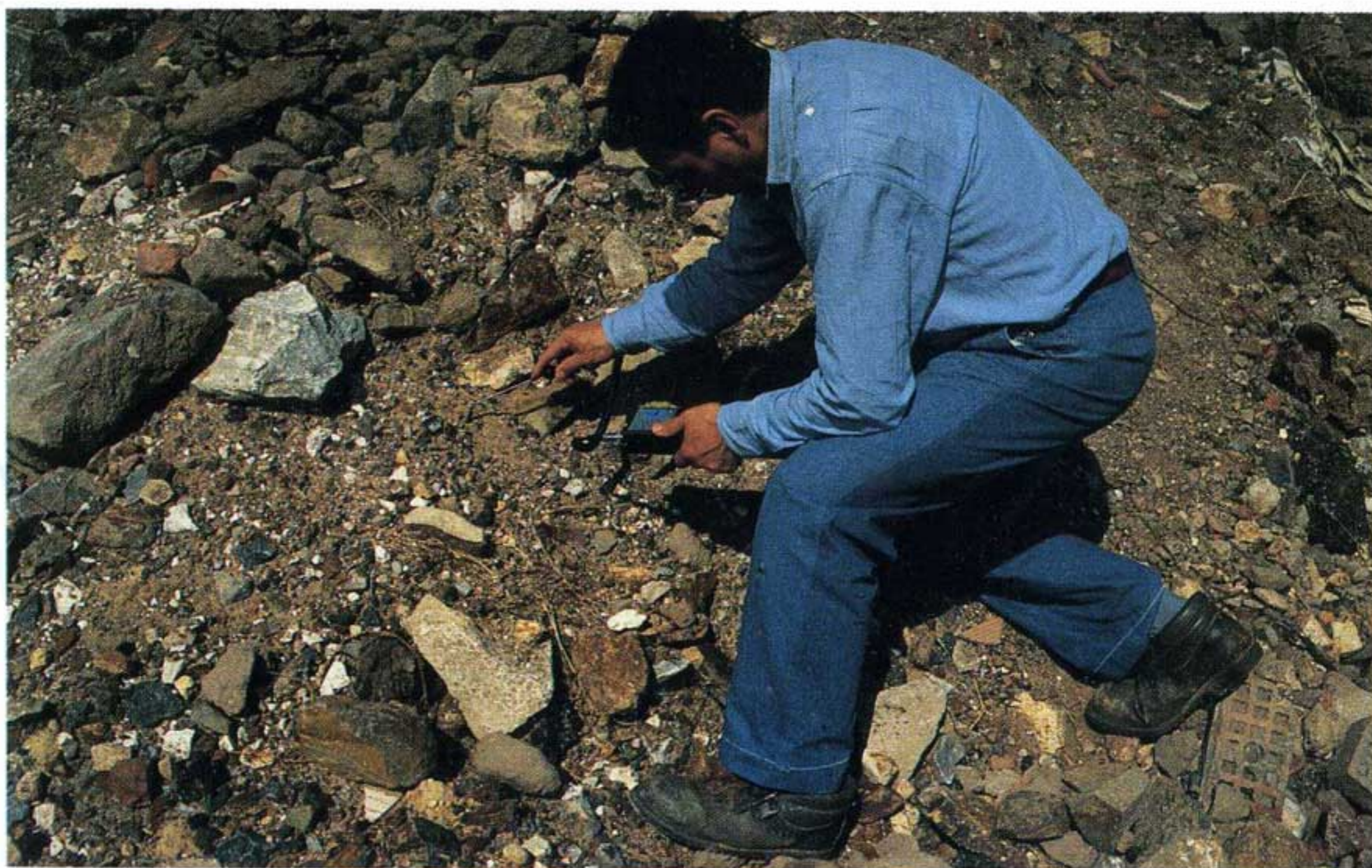


Foto 12 Misura della temperatura superficiale del suolo della discarica per correzioni relative all'emissività



Foto 13 Consolle di lavoro del sistema MedSPA; sui primi due un monitor, relativi all'unità antincendio, è riprodotta l'immagine VIS e il DTM dell'area di Literno, mentre sul terzo la termografia della discarica

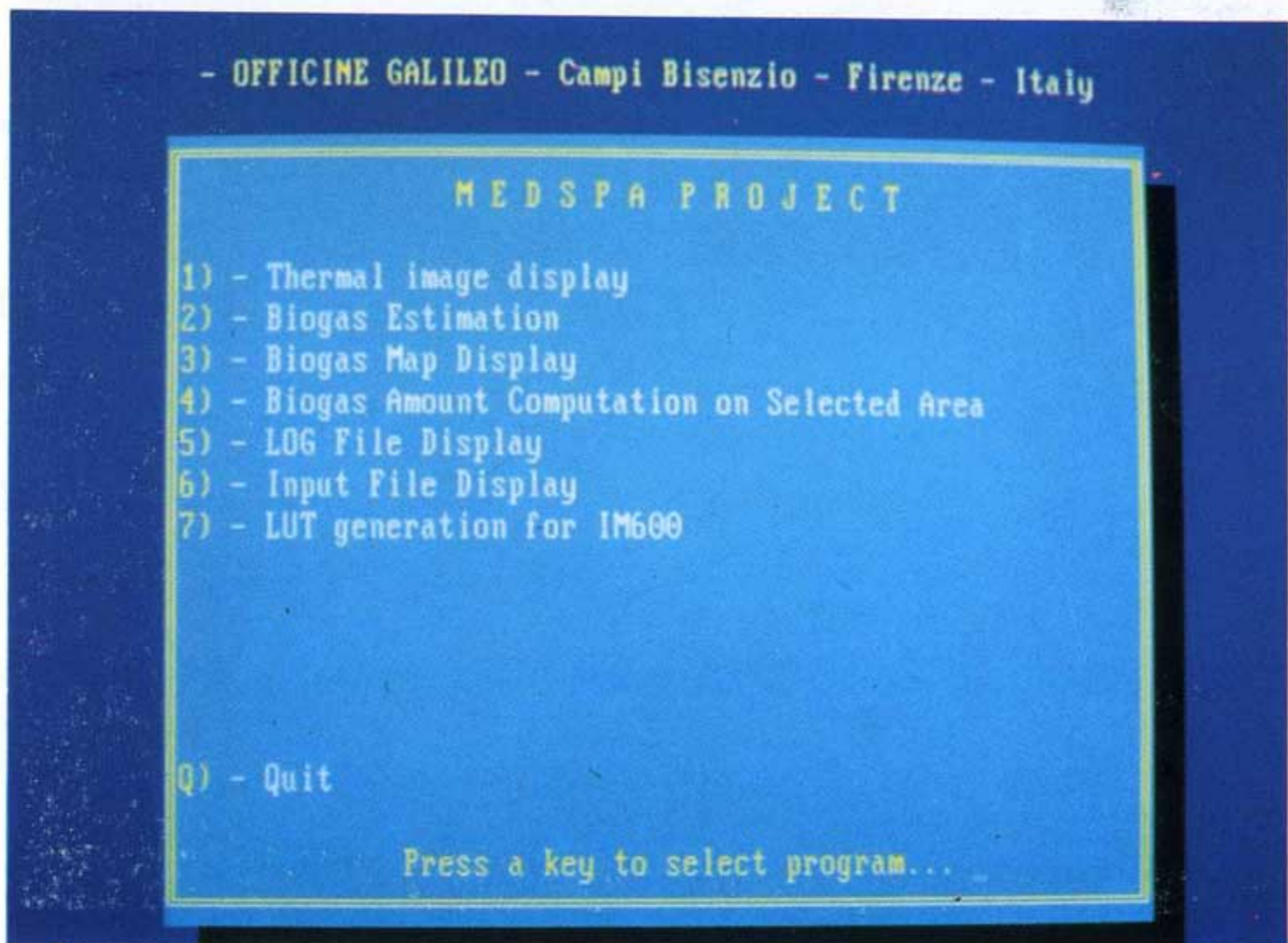


Foto 14 Menù relativo al software per la generazione della mappa di efflusso del biogas

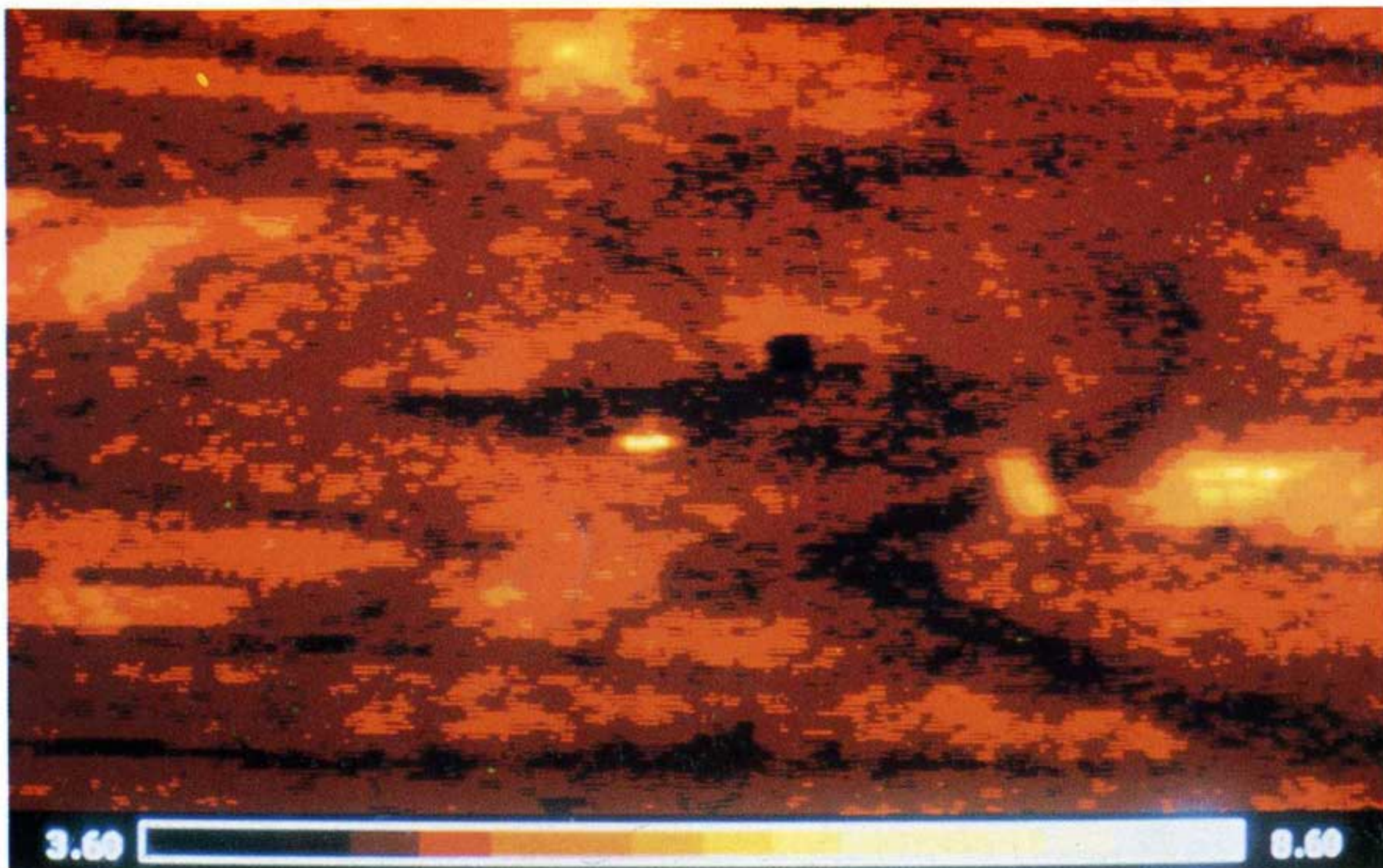


Foto 15 Termografia di un particolare della discarica visualizzata tramite l'opzione 1 del munù principale

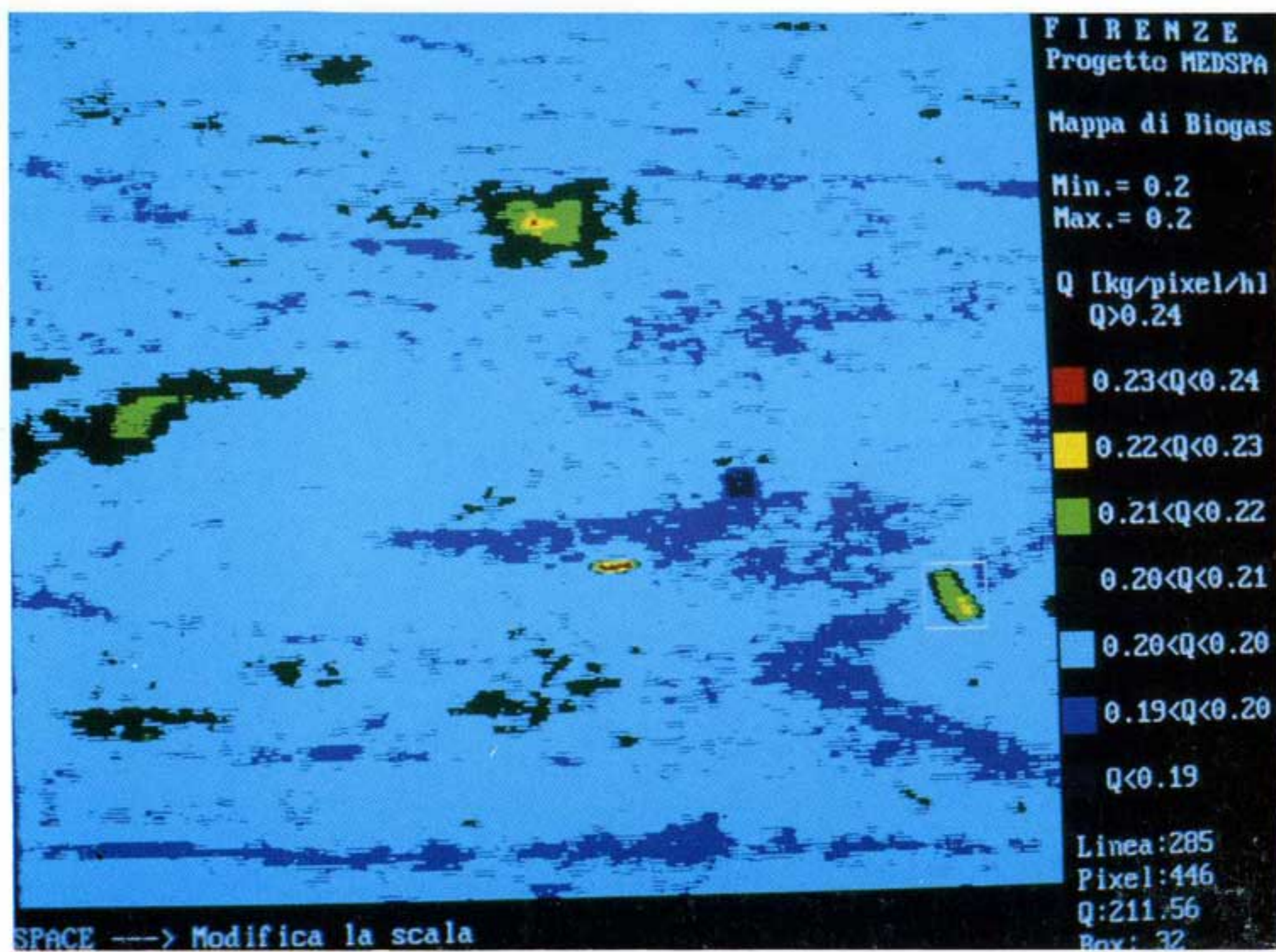


Foto 16 Mappa di efflusso del biogas relativa al particolare della discarica visualizzata nella foto precedente

Alla VTG 240 sono state comunque apportate alcune modifiche migliorative atte ad ottenerne la migliori prestazioni per l'applicazione in discarica.

Se da un lato la buona portabilità, la resistenza e la facilità d'impiego hanno consigliato l'uso della VTG 240 in fase preliminare, anche se strumento di non ultima generazione, la scelta definitiva per la realizzazione del progetto MedSPA è caduta su un radiometro operante nella stessa banda, l'ETS 512, ma che costituisce il prodotto di punta di Officine Galileo. Le caratteristiche dell'ETS 512 sono riportate in Tabella 5.3.

Tabella 5.3
Caratteristiche tecniche del sensore a immagine ETS 512

Denominazione	ETS 512	
Descrizione	Thermal Camera	
Produttore	Officine Galileo	
Caratteristiche Ottiche	Campo Vista Orizzontale	38°
	Campo Vista Verticale	27°
	Risoluzione Geometrica	1.5 mrad
	Lunghezza Focale	42 mm
Caratteristiche Spettrali	Banda di lavoro	8-12 μm
Risoluzione Radiometrica	Riferimento Caldo	$< T_0 + 40$
	Referimento Freddo	$> T_0 - 30$
Segnale Video	Tipo	CCIR Standard 625/50 Hz
	Numero di Linee	512
Ingombro	Peso	7 Kg
	Dimensioni	222 x 268 x 326

Sono state infine effettuate prove comparative fra la VTG 240, l'ETS 512 ed un radiometro IM 600, di produzione INFRAMETRICS, dotato di obiettivi zoom x3 e x10. Le caratteristiche dell'IM 600 sono riportate in Tabella 5.4.

Tabella 5.4
Caratteristiche tecniche del sensore a immagine INFRAMETRICS IM 600

Denominazione	IM 600	
Descrizione	Thermal Camera	
Produttore	INFRAMETRICS	
Caratteristiche Ottiche	Campo Vista Orizzontale Campo Vista Verticale Risoluzione Geometrica	20° 15° 2 mrad
Caratteristiche Spettrali	Banda di lavoro Risoluzione Radiometrica	8-12 μm +/- 0.1 °K
Segnale Video	Tipo Numero di Linee Pixel per linea	RGB,PAL,CCIR 625/50 Hz 200 256
	Massimo Range Termico	-20°C/1000°C
	Peso scanner Dimensioni scanner Peso unità di controllo Dim. unità di controllo	2.925 Kg 20.57 x 12.44 x 12.19 3.375 Kg 23.6 x 13.71 x 26.1

Con l'IM 600 è stata quindi effettuata una copertura totale, con obiettivo zoom x3, dell'intera superficie della discarica.

L'immagine ottenuta è stata quindi confrontata con una immagine della stessa area acquisita dall'ETS 512, dotata di obiettivo panoramico, e caratterizzata quindi da una peggiore risoluzione, per valutare l'impatto dell'utilizzazione di diverse ottiche sulla sensibilità e sull'accuratezza dei risultati forniti dalla modellistica che descrive i processi di efflusso di biogas all'interfaccia discarica-atmosfera.

5.4 Architettura del sistema di monitoraggio infrarosso

Da quanto detto nei capitoli precedenti risulta che i principali rischi ambientali connessi a fenomeni termici che possono verificarsi all'interno di

un impianto di smaltimento R.S.U. e che possono essere rivelati da sensori IR sono essenzialmente:

- fuoriuscita di percolato in superficie, soprattutto al piede delle scarpate
- incendio dei gas combustibili originatisi dalla fermentazione delle sostanze organiche presenti nella discarica, con eventuale propagazione alla vegetazione circostante
- intrusioni di personale non autorizzato attraverso gli accessi o il perimetro di recinzione, e conseguente deposito di materiale non controllato, che eventualmente potrebbe risultare di natura tossica (rifiuti speciali, rifiuti tossici e nocivi, rifiuti ospedalieri, etc.) e/o innescare principi d'incendio (braci, sostanze in fase di reazione esotermica, etc.)

La discarica RSU necessita quindi sia di un *controllo periodico* che di un *controllo continuativo* da effettuarsi all'interno e lungo il perimetro di recinzione dell'area destinata all'impianto di smaltimento, allo scopo di rivelare in tempo reale situazioni di rischio nel momento in cui esse si verificano:

- controllo periodico: per la rivelazione delle eventuali situazioni di rischio ambientale che possono verificarsi in discarica, nonché per effettuare una valutazione dello stato di salute dell'impianto di smaltimento e della sua efficienza; ciò consente sia una limitazione dei danni ambientali qualora si verifichi un malfunzionamento, sia una più rapida bonifica ed un recupero dell'area al termine dell'attività di discarica.
- controllo continuativo: per la rivelazione precoce degli eventuali principi di incendio che possono verificarsi all'interno dell'area adibita a discarica o nelle zone limitrofe, e l'allertamento del personale addetto allo spegnimento; ciò permette di limitare le probabilità di diffusione di un incendio interno alle aree adiacenti la discarica (frequentemente boscate e di alto pregio ambientale), e viceversa che uno esterno si propaghi alla discarica, all'interno della quale sono presenti sostanze altamente infiammabili.

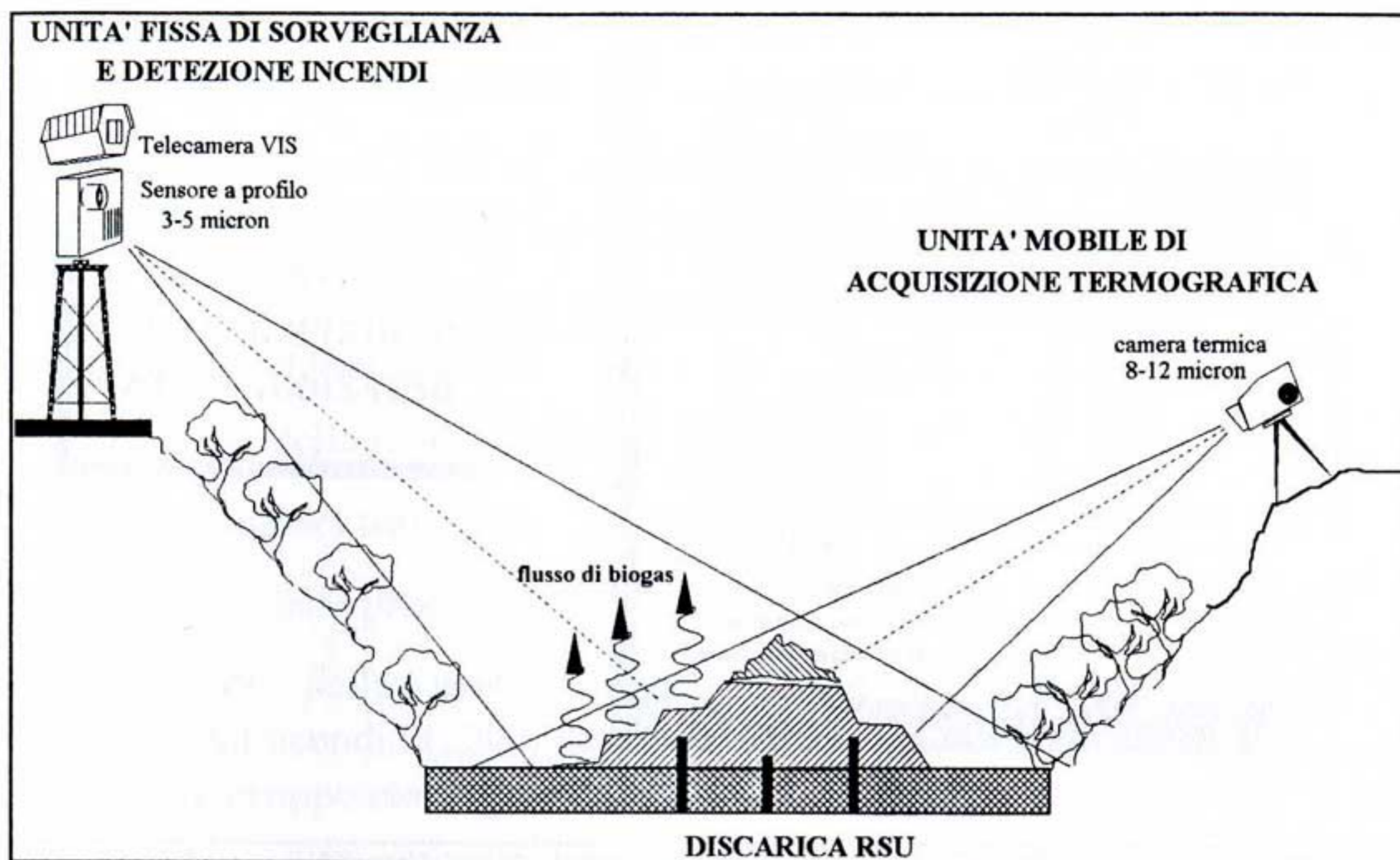


Figura 5.2 Architettura del sistema MedSPA per il monitoraggio discariche RSU.

Il sistema di monitoraggio discariche RSU è stato pertanto sviluppato ispirandosi ad una struttura modulare articolata in una *unità fissa* ed una *unità mobile* (vedi figura 5.2): la prima costituita da un sistema di sorveglianza e detezione incendi (sensore IR 3-5 μm a profilo e telecamera VIS) da installare in postazione panoramica presso la discarica, eventualmente remotizzabile; la seconda costituita da una camera termica 8-12 μm , dotata di un sistema di acquisizione dell'immagine per uso di archivio e di elaborazione.

5.5 Unità Fissa di Rivelazione Principi d'Incendio

L'*unità fissa* di rivelazione incendi boschivi è stata ipotizzata composta dai seguenti elementi (Fig. 5.3):

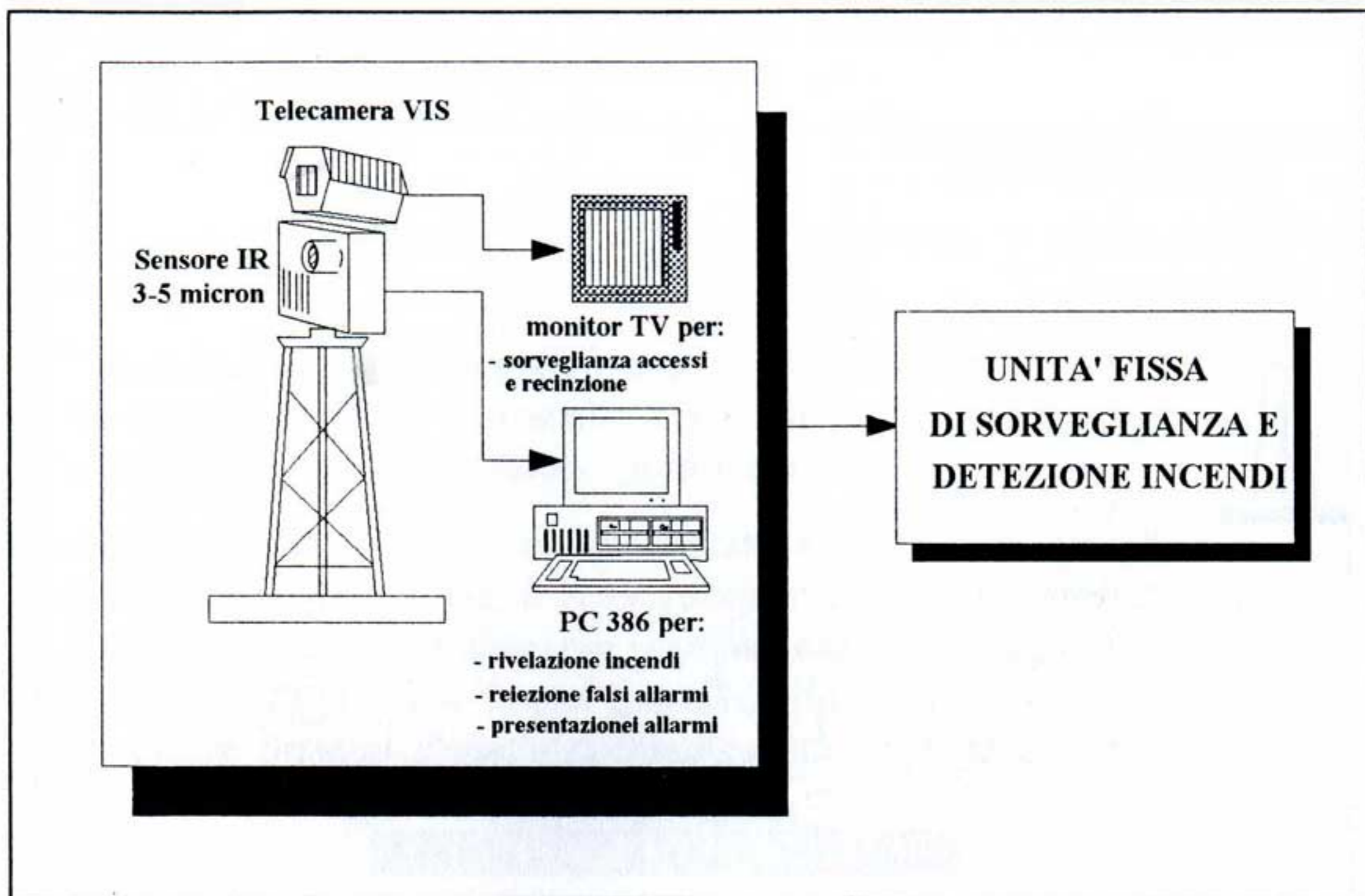


Figura 5.3 Architettura di sistema del Progetto MedSPA: Unità Fissa di sorveglianza e rilevazione incendi in discarica RSU.

- ◇ sensore IR puntuale 3÷5 μm per la rivelazione di eventuali principi di incendio all'interno e/o all'esterno dell'area della discarica
- ◇ telecamera CCD operante nel VIS per la sorveglianza degli accessi e del perimetro di recinzione dell'impianto di smaltimento, al fine di segnalare e/o prevenire eventuali intrusioni
- ◇ monitor per la visualizzazione delle immagini VIS
- ◇ piattaforma ruotante con supporto sensore IR da installarsi su traliccio
- ◇ sottosistema di pre-elaborazione I/O IR
- ◇ sottosistema di post-processing comprensivo di un sistema di Tx/Rx per dati dal sito di installazione del sistema al centro elaborazione

L'unità fissa provvede sia alla sorveglianza degli accessi e del perimetro di recinzione della discarica, tramite una telecamera, che alla rilevazione di principi d'incendio eventualmente presenti al suo interno, tramite un sensore operante nel MIR (3÷5 μm). In sostanza, in presenza di un focolaio, si ha sia

l'attivazione di una procedura di allarme che segnala la presenza dell'incendio, sia la comunicazione delle coordinate del punto a cui si riferisce. La programmazione delle attività relative alla realizzazione dell'unità fissa di rilevamento incendi è stata articolata nei seguenti punti:

- ◇ messa a punto del SW di rivelazione relativo al Pre-processor e referenziazione del sistema antincendio al sito della discarica RSU
- ◇ messa a punto relativa al Post-processor, con acquisizione della cartografia digitalizzata
- ◇ costruzione della piattaforma
- ◇ installazione del traliccio
- ◇ definizione della procedura di allarme antincendio
- ◇ Risoluzione delle problematiche relative all'alimentazione del sistema antincendio (220 Vca) tramite collegamento con rete ENEL o tramite gruppo elettrogeno

L'installazione dell'unità fissa si è articolata in varie attività: la definizione del sito di installazione, che è stato concordato con le autorità locali; la predisposizione del sito, che ha implicato anche la progettazione e la realizzazione di un apposito traliccio semovibile; l'acquisizione della cartografia digitale della zona da monitorare; infine, la scelta del sistema di allarme, etc.(vedi Fig. 5.3) La pianificazione delle suddette è schematicamente la seguente:

- acquisizione cartografia digitale: la realizzazione di questo punto implica la digitalizzazione della cartografia generale e particolare acquisita su supporto cartaceo
- costruzione traliccio: questa attività ha previsto la determinazione dell'altezza, della dislocazione, la determinazione sito, la realizzazione delle fondamenta ed il montaggio
- predisposizione allarmi: è stata prevista la realizzazione di allarmi ottici e sonori, comandati dal Post-Processore tramite una scheda di controllo

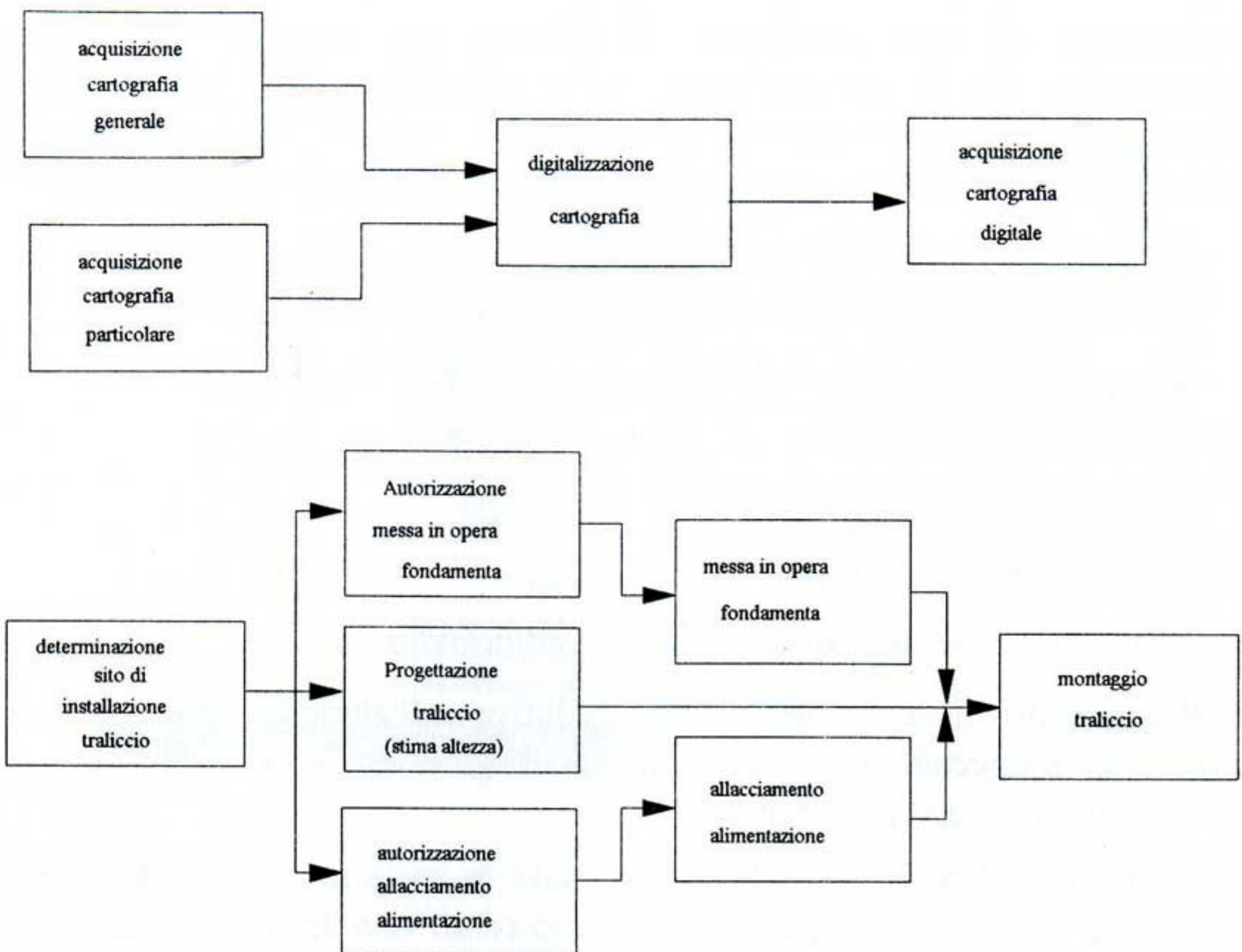


Figura 5.3 Linea di attività per l'installazione dell'Unità Fissa del Sistema MedSPA presso la discarica di Literno (Isola d'Elba).

5.6 Unità Mobile di Acquisizione Termografica

Il cuore del progetto di monitoraggio discariche RSU, ovvero la sua parte più intimamente originale ed innovativa, è costituita dalla correlazione delle anomalie termiche superficiali, eventualmente rivelate da un sistema di monitoraggio nell'infrarosso termico, con situazioni di rischio ambientale all'interno di una discarica RSU.

Una camera termica operante nella banda 8-12 μm acquisisce un'immagine in valori di temperatura di brillantezza T_b (cioè in densità superficiale di energia radiante), sia dell'intera discarica o di una sua particolare area di interesse.

Per la realizzazione del progetto sono state utilizzate due camere termiche entrambe di produzione Officine Galileo: la ETS 512 e la VTG 240; quest'ultima per le caratteristiche di affidabilità, resistenza e portabilità, è apparsa la più appropriata.

L'immagine in T_b viene poi corretta radiometricamente ottenendo una termografia, ovvero una distribuzione superficiale di temperatura. A tal fine vengono utilizzati due riferimenti termici, costituiti da due lastre di alluminio ricoperte da una opportuna vernice che ne assimila il comportamento a quello di un corpo nero (vedi Foto 8). I due riferimenti termici, entrambi presenti nell'immagine termica, sono mantenuti il primo da una temperatura di riferimento nota, l'altro a temperatura ambiente. Entrambe le temperature vengono misurate all'istante dell'acquisizione IR tramite due termoresistenze precedentemente tarate. In questo modo nell'immagine IR acquisita, al livello di grigio caratteristico di tali riferimenti verranno fatte corrispondere le temperature misurate, ottenendo così un'approssimazione lineare della retta di calibrazione della camera termica. Effettuando una opportuna processazione dell'immagine termica ottenuta vengono individuate le anomalie termiche più significative. Deve essere sottolineato che con il termine *anomalie* ci riferiamo alle aree per le quali esiste un significativo gradiente termico positivo rispetto alla temperatura media della scena osservata. Successivamente, sulla base di un *Modello di Flusso di Biogas* viene stimato il flusso del biogas prodotto dalla fermentazione della materia organica interrata all'interfaccia suolo-aria. Tale modello richiede come input i valori dei seguenti parametri:

- ◇ temperatura dell'aria
- ◇ velocità del vento
- ◇ parametri termici relativi al terreno di copertura
- ◇ (calore specifico, capacità termica etc.)
- ◇ parametri termici relativi al biogas

Infine viene prodotta una *Mappa di Distribuzione Superficiale di Flusso di Biogas* che può essere utilizzata per stimare la pericolosità dell'area di interesse e valutare l'urgenza di un intervento. Il diagramma relativo al data-flow è riportato in Figura 5.4.

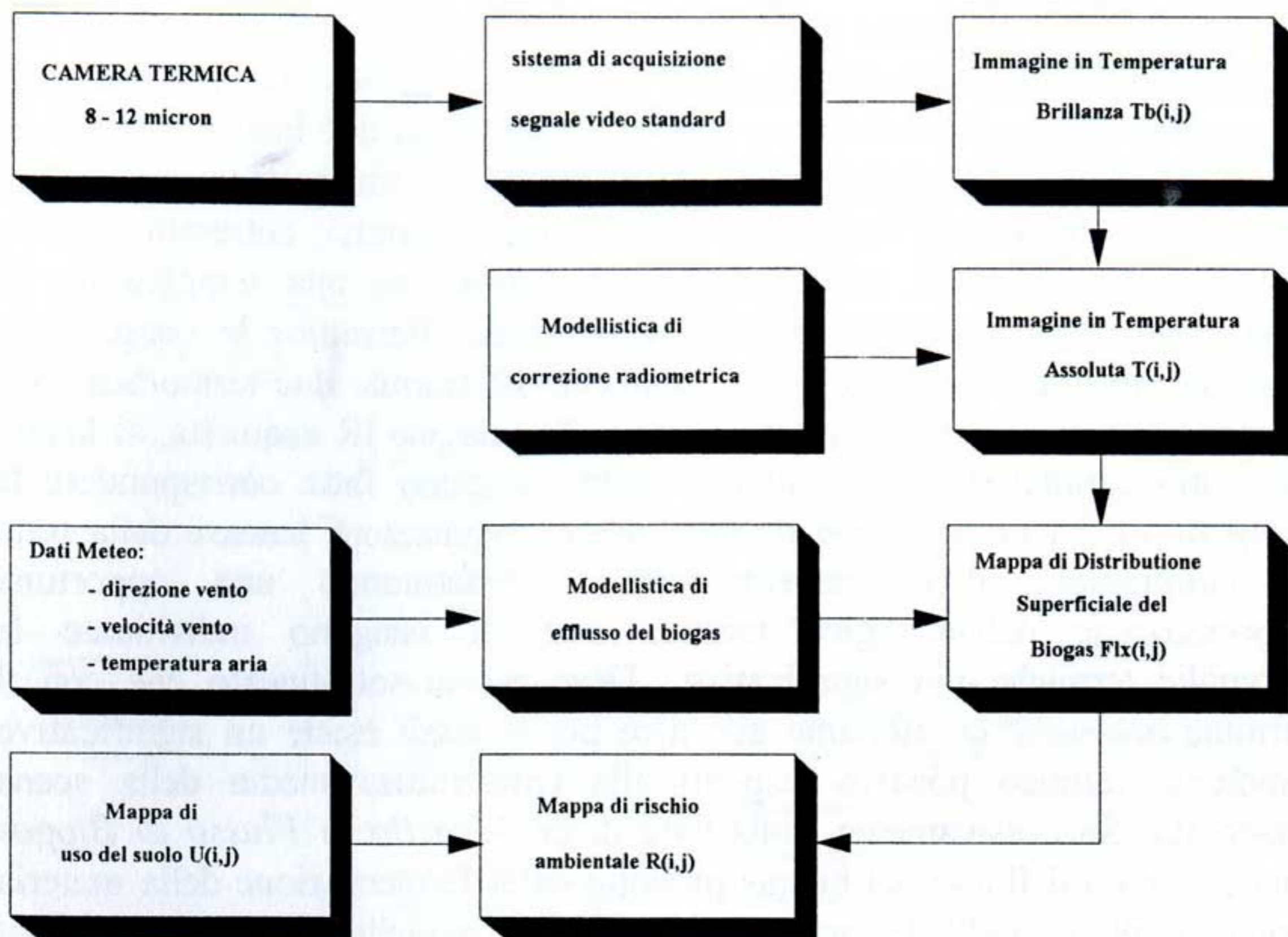


Figura 5.4 Diagramma del data flow relativo all'*Unità Mobile* di acquisizione termografica, in un sistema di monitoraggio TIR di una discarica RSU

A titolo di esempio nelle seguenti figure vengono riportate le immagini in *Temperatura di brillantezza $T_b(i,j)$* di tre aree della discarica di Literno (Isola d'Elba) acquisite il 25 Marzo 1992 alle ore 20.10.

Le immagini IR, che risultano in bianco/nero, sono state colorate con una opportuna palette che ne mette in evidenza le aree a maggior gradiente termico rispetto allo sfondo.

Sotto l'immagine è riportata una scala che riporta, in senso crescente di temperatura, da sinistra a destra, i colori della palette. Nella prima immagine sono rappresentati i gradoni della discarica con, in evidenza, una zona colorata in giallo/rosso corrispondente ad una anomalia termica che, da un'ispezione effettuata in campo, è risultata essere oggetto della fuoriuscita di liquami, caratterizzati da una temperatura sensibilmente più alta (circa 40°C) rispetto alla temperatura del terreno (10°C circa al momento della ripresa).

Nella seconda immagine sono rappresentati ancora alcuni i gradoni della discarica con, in evidenza, alcune zone colorate in giallo/rosso e corrispondenti ad anomalie termiche corrispondenti, stavolta, ad un effettivo efflusso di biogas come verificato da un'ispezione effettuata in campo.

Nella terza immagine è infine rappresentata una zona dell'area di coltivazione della discarica, con la presenza di alcuni sacchi di immondizia riconoscibili facilmente sullo sfondo per la loro caratteristica forma ovale.

Da notare che nell'area di coltivazione della discarica non si ha produzione di metano in quanto le reazioni chimiche dalle quali è caratterizzata sono di tipo aerobico, sebbene si tratti ancora di reazioni esotermiche.

Per questo motivo è importante sottolineare come il sistema MedSPA vada applicato alle aree ormai coperte e per le quali ha senso parlare di produzione metanigena.

5.6.1 Architettura dell'Unità Mobile

La necessità di un controllo periodico della superficie della discarica, dovuto al tempo di digestione dei materiali organici depositati, ha suggerito per il Progetto MedSPA la necessità di un sistema di monitoraggio portatile. Come l'intero Sistema MedSPA anche l'*Unità Mobile di Acquisizione Termografica* è stata configurata di tipo modulare, composta di tre nuclei. Il primo, che costituisce la vera e propria unità portatile del sistema, consiste in un *Nucleo Mobile di Acquisizione* il cui scopo è quello di acquisire e registrare le immagini termiche tramite videoregistratore VHS su videocassetta. Il secondo è costituito da un *Nucleo di Rilettura e Processazione* (eventualmente anch'essa portatile) formato da una scheda di acquisizione e digitalizzazione del segnale video standard registrato e riletto dal videoregistratore e da un Personal Computer. Su quest'ultimo è installato sia il software relativo all'acquisizione e alla processazione dell'immagine, sia quello relativo al modello di flusso di biogas. Infine è previsto un *Nucleo di Editing*, formato da una stampante laser bianco/nero e da una stampante grafica a colori per la presentazione delle mappe di efflusso di biogas. In Figura 5.5 sono riportate le tre unità del sistema, che sono così assemblate:

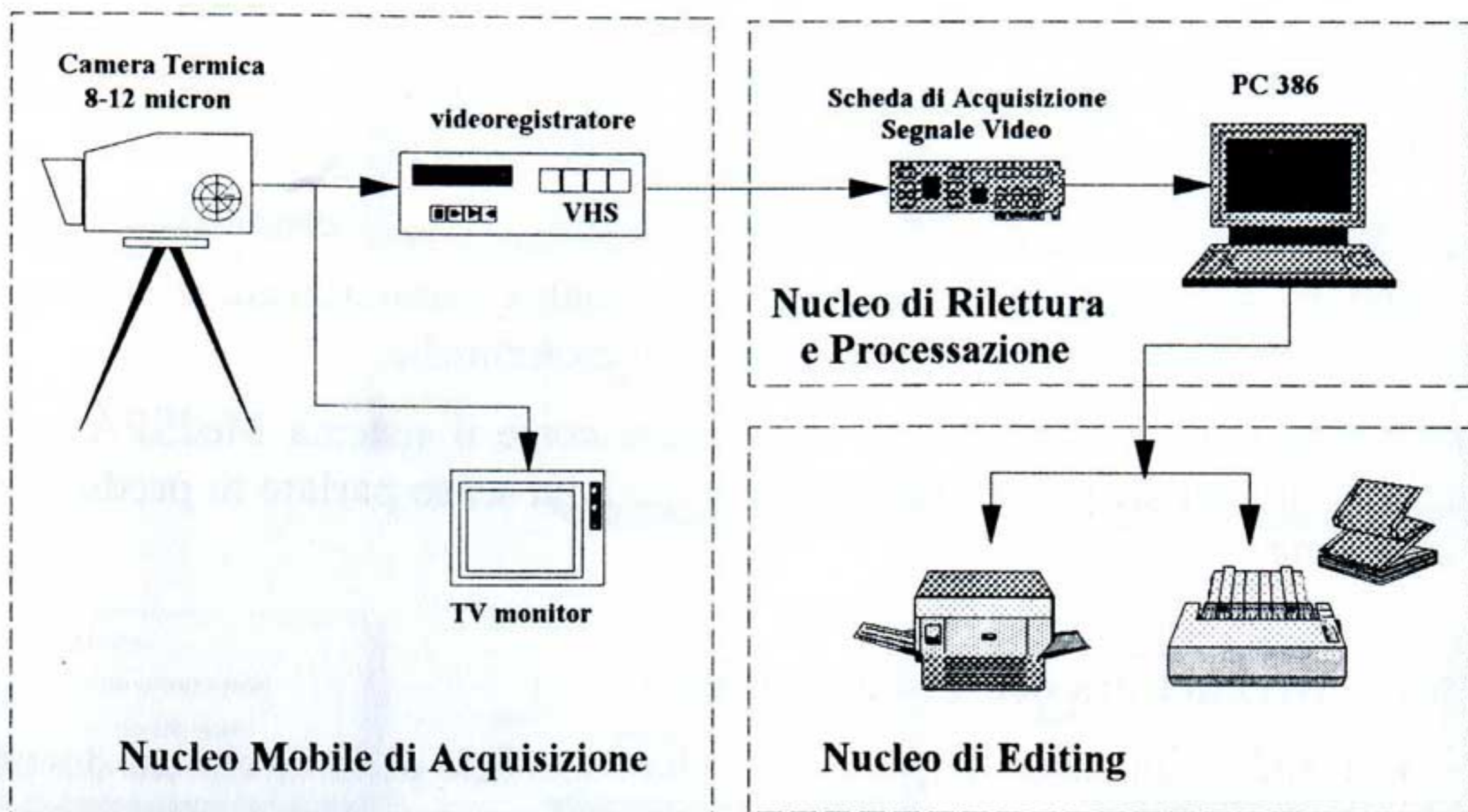


Figura 5.5 Configurazione dell'*Unità Mobile* di acquisizione termografica per discariche RSU: il *Nucleo di Acquisizione Termografica*, che costituisce la vera e propria unità portatile, è preposto all'acquisizione delle immagini IR su videoregistratore; il *Nucleo di Rilettura e Processazione* è preposto sia alla digitalizzazione ed all'archiviazione su PC delle immagini IR, sia alla loro elaborazione per ottenerne le relative termografie e le mappe di efflusso di biogas, utilizzando la necessaria modellistica fisica che risiede su PC; il Nucleo di Editing è infine preposto alla stampa di termografie e mappe tematiche

L'*unità mobile* è stata ipotizzata composta dai seguenti nuclei:

(i) *Nucleo Mobile di Acquisizione*:

- ◇ Camera termica operante 8-12 μm che fornisce un segnale video standard:
- ◇ VHS videotape per l'acquisizione delle immagini fornite dalla camera termica
- ◇ per archiviazione e processazione
- ◇ Monitor TV per visualizzare in tempo reale le immagini IR acquisite dalla camera termica

(ii) *Nucleo di Rilettura e Processazione*:

- ◇ scheda di acquisizione segnale video (MATROX MARVEL) per la digitalizzazione del segnale video standard fornito dal videoregistratore
- ◇ Personal computer COMPAQ 486 DESKPRO 66M per acquisizione/processazione del segnale ed implementazione del modello di efflusso di biogas

iii) Nucleo di Editing:

- ◇ Stampante Laser Bianco/Nero
- ◇ Stampante Grafica a Colori

5.7 Collaudo del sistema

Nell'ambito della fase conclusiva del Progetto MedSPA è stato, infine, ritenuto opportuno organizzare un sopralluogo dimostrativo atto ad illustrare il funzionamento del sistema di monitoraggio IR realizzato per il controllo di discariche di rifiuti solidi urbani (Progetto MedSPA), al commissario esaminatore della Comunità Europea. Il collaudo dimostrativo ha avuto luogo presso la discarica di Literno (LI) alle ore 11.00 del giorno 26 Novembre 1993 (vedi foto 18÷22). Scopo del collaudo sono state le seguenti valutazioni:

- funzionalità dell'Unità Fissa di Rilevamento Incendi nel caso in cui un focolaio d'incendio si sviluppasse in discarica
- grado di precisione offerto dal Modello di Efflusso di Biogas all'interfaccia terreno-atmosfera

A tal fine è stato acceso un piccolo focolaio nell'area della discarica, sfruttando materiali infiammabili già presenti al suo interno mentre il sistema sorvegliava la zona da controllare per mezzo dell'*Unità Fissa*.

La console di lavoro del sistema, costituita da:

- monitor relativo alla telecamera
- monitor relativo al personal computer sul quale viene riportata la cartografia digitalizzata della zona controllata dal sensore 3÷5 μm
- monitor relativo al personal computer sul quale gira il modello di biogas

durante il collaudo era posta all'interno di un fuoristrada (vedi foto 13).

Nella foto 14 è mostrato il menù relativo al software per la generazione della mappa di flusso del biogas, ottenuta dalla termografia della discarica (foto 15) opportunamente elaborata (foto 16).

Il focolaio è stato prontamente individuato dal sistema di avvistamento e localizzato con precisione all'interno del perimetro della discarica.

Contemporaneamente con apposite termoresistenze a lettura venivano acquisite: la temperatura superficiale della discarica in prossimità di due camini collettori; la temperatura superficiale sui camini stessi, ed al loro interno; la temperatura dell'aria e la velocità del vento.

Ciò al fine di ottenere i dati di input per il *Modello di Efflusso di Biogas* che veniva attivato al fine di confrontarne le uscite con i risultati di misure di punto e poterne così valutare la precisione.

Veniva perciò misurato con un anemometro a lettura diretta la portata del biogas all'uscita dei sopracitati camini collettori, opportunamente incappucciati per convogliarne il flusso.

Il grado di precisione ottenuto è apparso soddisfacente compatibilmente con le condizioni meteorologiche e l'ora del giorno, non particolarmente adatta per l'acquisizione di termografie relative all'emissione diretta del terreno.

5.8 Risultati del collaudo

Il collaudo dimostrativo *in situ* ha avuto esito positivo avendo dimostrato che il sistema di rispondere esaustivamente e con una accettabile accuratezza alle esigenze per le quali è stato progettato.

La dimostrazione effettuata presso Literno ha contribuito a portare a conoscenza delle autorità invitate alla dimostrazione le metodologie innovative applicate per la realizzazione del sistema di monitoraggio, che si sono dimostrate strumento assai utile per loro rispettive esigenze professionali.

Sono stati avviati e sono tuttora in corso gli studi necessari per l'approfondimento delle potenzialità applicative del sistema di monitoraggio e per lo sviluppo di un prodotto più efficiente ed attinente alle necessità operative degli specialisti del settore.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ANDREOTTOLA G., COSSU R., "Modello matematico di produzione del biogas in uno scarico controllato", *RS-Rifiuti Solidi*, vol. 2, n. 6, novembre dicembre 1988, Ed. C.I.P.A., Milano.
- (2) BECKER F., Thermal infrared remote sensing principles and applications, *Remote Sensing Application in Agriculture and Hydrology*, 1980, George Fraysse Ed., Ispra Establishment, Ispra, Italy.
- (3) BUETTNER J.K., KERN C.D., The determination of infrared emissivities of terrestrial surfaces, 1965, *J. Geophys. Res.*, 70: 1329-1337.
- (4) BUTTA RENATO, Lo smaltimento dei rifiuti solidi e dei fanghi, 1983, Franco Muzio Editore.
- (5) CHIARANTINI L., COPPO P., Infrared monitoring system for urban solid waste landfills: experimental activities and biogas outflow modeling, *QUIRT '94*, Sorrento (NA), Italy, 23-26 Agosto 1994.
- (6) CHRISTIANSEN T.H., KIELDSEN P., Basic biochemical processes in landfills, *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Ed. Christiansen T.H., Cossu R., E Stegman R., Academic Press, London.
- (7) COSSU R., Role of landfilling in solid waste management, *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Ed. Christiansen T.H., Cossu R., E Stegman R., Academic Press, London.
- (8) DEL PERO G., MARINO C.M., PIZZAFERRI G., "L'impiego delle tecniche di telerilevamento in Italia: esempi di applicazioni ambientali in un contesto geologico", *Atti del VI Congresso Nazionale dell'ordine dei geologi*, Venezia, 25-27 Settembre 1987.
- (9) FUCHS M., TANNER C.B., Surface temperature measurements of bare soils, 1968, *Appl. Meteor.*, 7: 303.
- (10) GERVASONI SONIA, Discariche controllate: normativa, indagini, progettazione, monitoraggio, bonifica, 1991, HOEPLI.
- (11) LABED J., STOLL M.P., Angular variations of land surfaces spectral emissivity in the thermal infrared: laboratory investigations on bare soils, 1991, *Int. J. Of Remote Sensing*, vol. 12: N. 1, 2299-2310.
- (12) LYON, R.S.P., Analysis of rocks by spectral infrared emission (8÷25 μm), 1965, *Econ. Geol.*, 60: 715-736.

(13) MANASSERO M., PASQUALINI E., "Aspetti geotecnici nella progettazione delle discariche controllate", *Atti delle Conferenze di Geotecnica di Torino*, XV Ciclo, La ingegneria geotecnica nella salvaguardia e recupero del territorio, 20-22 novembre 1991, Torino.

(14) MAZZONI T., CACCHIANI M., CHIARANTINI L., Use of thermal infrared images for urban solid waste landfill monitoring, SARDINIA '94 - *Proceedings of the 4th International Landfill Symposium*, Cagliari, Italy, 11-15 October, 1993.

(15) MONGELLI F., MAGGIORE M., CUCCOVILLO T., "Campo termico prodotto da una discarica di rifiuti solidi urbani ed influenza sulle acque sotterranee", *RS -Rifiuti Solidi*, vol. VI, n. 5, settembre - ottobre 1992, Ed. C.I.P.A., Milano.

(16) NERRY F., LABED J., STOLL M.P., Spectral properties of land surfaces in the thermal infrared, 1', Laboratory measurements of absolute spectral emissivities signatures, *J. Of Geophys Res.*, 1990, vol. 95, N.B5, 7027-7044.

(17) SALISBURY J. W., D'ARIA D.M., Emissivities of terrestrial materials in 8÷14 μm atmospheric window, 1992, *Remote Sensing of Environment*, vol. 42, N. 2, 83-106.

(18) SALISBURY J.W., D'ARIA D.M., Infrared (8÷14 μm) remote sensing of soil particle size, 1992, *Remote Sensing of Environment*, vol. 42, N. 2, 157-165.

(19) ZISSIS G.J., WOLFW W.L., The Infrared Handbook, Prepared by the IRIA Center, Environmental Research Institute of Michigan, Washington, DC. 1978.

INDICE

1. IL TELERILEVAMENTO PER LO STUDIO DI PROBLEMATICHE AMBIENTALI	
1.1 Il telerivelamento dell'ambiente	1
1.2 Fondamenti fisici del TLR ed estrazione dell'informazione	5
2. PROBLEMATICHE RELATIVE AL CONTROLLO DI DISCARICHE RSU	
2.1 Introduzione	9
2.2 La discarica controllata	10
2.3 Produzione del biogas	11
2.4 Rischi ambientali connessi alla presenza di discariche	13
2.5 Il monitoraggio di una discarica RSU	16
3. APPLICAZIONI DI UN SISTEMA INFRAROSSO PER IL MONITORAGGIO DISCARICHE RSU	
3.1 Introduzione	21
3.2 Detezione principi d'incendio	23
3.3 Mappatura del flusso di biogas	24
3.3.1 Detezione anomalie termiche	24
3.3.2 Sviluppo della modellistica per la stima del flusso di biogas	26
4. IL PROGRAMMA MEDSPA: MONITORAGGIO TERMICO DELLA DISCARICA DI LITERNO	
4.1 Il programma MedSPA	31
4.2 Scelta dell'area di test	35
4.3 Lo smaltimento rifiuti nel comprensorio elbano	36
4.4 La discarica RSU di Litterno	37
4.5 Progetto di un sistema di monitoraggio discariche RSU	39
5. PROTOTIPO DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO INFRAROSSO SU DISCARICHE RSU	
5.1 Introduzione	43
5.2 Sopralluoghi e campagne di misura	43
5.3 Camere termiche impiegate nel corso delle campagne di misura	46
5.4 Architettura del sistema di monitoraggio infrarosso	49
5.5 Unità Fissa di Rilevazione Principi d'Incendio	51
5.6 Unità Mobile di Acquisizione Termografica	54
5.6.1 Architettura dell'Unità Mobile	57
5.7 Collaudo del sistema	59
5.8 Risultati del collaudo	60

STAMPA
CENTRO GRAFICO ELBANO
PORTOFERRAIO