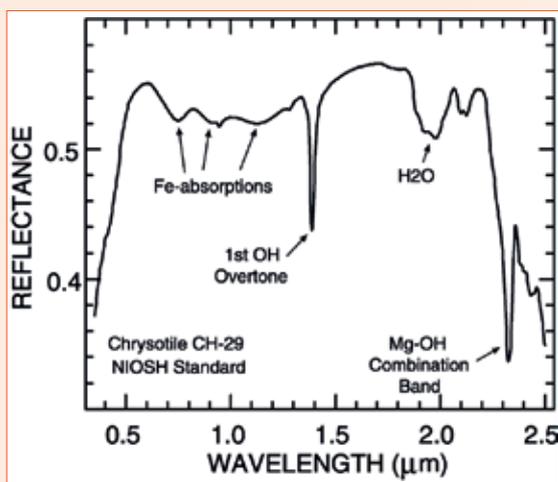


Mappatura delle coperture in cemento-amianto mediante telerilevamento: review e casi di studio italiani

di Sergio Bellagamba, Federica Paglietti, Paolo De Simone, Daniele Taddei



Firma spettrale del crisotilo puro, in cui sono ben visibili i due picchi di assorbimento diagnostici localizzati a 1,385 e 2,323 µm. (USGS - Laboratory Reflectance Spectroscopy (RS) Studies of WTC Samples.).

Grazie alla sua relativa economicità ed alle caratteristiche tecniche, l'amianto è stato largamente impiegato in tutto il mondo per la produzione di oltre 3.000 tipologie di manufatti (oggetti e materiali).

In Italia, in particolare, la maggior parte dell'amianto è stato utilizzato per la produzione di cemento-amianto (CA); si tratta di una miscela di cemento contenente il 10-20% di fibre di amianto che è stata impiegata nella realizzazione di lastre lisce o corrugate per coperture o divisori sia interni che esterni, di edifici civili e industriali. Queste lastre, a distanza di un certo numero di anni dalla messa in opera, tendono a dete-

riorarsi e a rilasciare in atmosfera fibre di amianto, pericolose per la salute umana (Reid *et al.* 2014; Spurny 1989).

I rischi connessi all'inalazione di fibre di amianto sono già da tempo dimostrati da evidenze sperimentali ed epidemiologiche (Bourdes 2000) e correlate a patologie quali l'asbestosi, il mesotelioma della pleura e cancro al polmone, alla laringe o alle ovaie (Camargo *et al.* 2011; Hillerdal 1999; Luqman *et al.* 2014; Offermans 2014). Molti sono i Paesi in tutto il mondo che, conseguentemente, hanno messo al bando tale sostanza cancerogena (International Ban Asbestos Secretariat 2020), ma restano ancora alcune nazioni in cui

La legislazione europea ed italiana ha stabilito l'adozione di piani di mappatura e rimozione dell'amianto da edifici pubblici e privati. Il presente lavoro illustra una panoramica sulle diverse tecniche di telerilevamento applicate alle superfici in cemento amianto.

questa sostanza ed i materiali che la contengono sono estratti, commercializzati ed utilizzati. In questo contesto, il nostro Paese è stato uno tra i primi in Europa a bandire l'estrazione, la produzione e l'utilizzo dei materiali contenenti amianto (MCA), con la legge quadro n. 257/1992 "Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto". Con la legge n.93/2001 "Disposizioni in campo ambientale" è stato inoltre previsto che le Regioni effettuino la mappatura dell'amianto sul territorio nazionale. Successivamente, il D.M. 101/03 "Regolamento per la realizzazione di una mappatura delle zone del territorio nazionale interessate dalla presenza di amianto" ha stabilito le procedure per tale mappatura, definendo altresì i criteri di priorità per la realizzazione degli interventi di bonifica urgenti. Sulla base di tali decreti alcune Regioni e comuni, a cui il compito di tale mappatura è stato demandato dal Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), hanno stabilito di effettuare una prima ricognizione di tali MCA ed in particolare delle coperture in CA, ampiamente impiegate in edifici di uso industriale, agricolo, commerciale e civile, impiegando il telerilevamento in alternativa

Sensore	Altitudine dell'orbita (km)	Periodo di rivisitazione (giorni)	Dimensione dell'area di acquisizione (km ² /giorno)	Risoluzione Spaziale (m)	Risoluzione Spettrale (nm)
Ikonos 2	681	3	121	1	Pancromatico: 445-900
				4	4 Multispettrale:
					Blue: 445 - 516
					Green: 505 - 595
Red: 632 - 698					
Near-IR: 770 - 880					
QuickBird	450	3	267,3	0,6	Pancromatico: 450 - 900
				2,5	4 Multispettrale:
					Blue: 450 - 520
					Green: 520 - 600
Red: 630 - 690					
Near-IR: 760 - 900					
World-View2	770	1,1	975000	0,46	Pancromatico: 450 - 800
				1,85	8 Multispettrale:
					Coastal: 400 - 450
					Blue: 450 - 510
					Green: 510 - 580
					Yellow: 585 - 625
					Red: 630 - 690
					Red Edge: 705 - 745
Near-IR1: 770 - 895					
Near-IR2: 860 - 1040					
World-View3	617	< 1	680000	0,31	1 Pancromatico
				1,24	8 Multispettrale
				3,7	8 SWIR
				30	12 CAVIS
World-View4	617	< 1	680000	0,31	Pancromatico 450-800
				1,24	4 Multispettrale:
					Blue: 450-510
					Green: 510-580
					Red: 655-690
Near-IR: 780-920					

Tab. 1 - Caratteristiche tecniche dei sensori satellitari.

ai tradizionali metodi di censimento (ispezione visiva delle superfici e prelievo sul campo di campioni da analizzare). L'impiego di tali tecniche offre in effetti alcuni vantaggi, tra i quali il principale è quello di consentire una prima individuazione a distanza di estese superfici potenzialmente contaminate e di ridurre il numero di sopralluoghi diretti solo ai casi non perfettamente riconoscibili, con conseguente notevole riduzione dei tempi di esecuzione della mappatura e dei relativi costi. Un ulteriore vantaggio è la possibilità di effettuare in maniera speditiva e ripetitiva i successivi aggiornamenti periodici. L'attività di mappatura delle coperture in CA con tecniche di telerilevamento è stata tuttavia condotta in maniera disomogenea da Regione a Regione, in termini di sensori, piattaforme, regioni spettrali, modelli di elaborazione, estensione e tipologia dell'area studiata, con differenze

notevoli anche in termini di costi e di possibilità di ripetere il rilievo. In questo lavoro ci si è posti l'obiettivo di illustrare un quadro complessivo sull'applicazione del telerilevamento in Italia per l'identificazione e la mappatura delle coperture in CA segnalando le diverse tipologie di sensori, piattaforme, modelli di elaborazione utilizzati per questa applicazione. Ciò verrà realizzato sia facendo riferimento alla letteratura scientifica, sia riportando dati inerenti esperienze applicative maturate a livello nazionale.

Il telerilevamento e le principali piattaforme utilizzate

Un'immagine telerilevata non è una semplice foto; è un'immagine composta da più "strati" denominati bande, la cui quantità e tipologia corrisponde ai canali di acquisizione del sensore usato per la registrazione della radiazione elettromagnetica a diverse

lunghezze d'onda. In base alla quantità di bande che compongono l'immagine si parla di immagini multispettrali (una decina di bande) o iperspettrali (decine/centinaia/migliaia di bande). Nella sua complessità, l'informazione contenuta in ogni singolo pixel nell'immagine descrive quindi il comportamento spettrale delle diverse superfici, cioè la loro capacità di assorbire o riflettere le diverse lunghezze d'onda. Tale comportamento è determinato dalle proprietà chimico-fisiche del materiale in oggetto. L'insieme delle informazioni contenute nelle diverse bande compone la cosiddetta firma spettrale, caratteristica per ogni tipo di materiale e superficie. Tanto più numerose e ravvicinate sono le bande (risoluzione spettrale), maggiore sarà il grado di dettaglio della firma e la possibilità di individuare caratteristiche diagnostiche che facilitino il riconoscimento di un materiale riducendo la probabilità di errore. Talvolta è infatti possibile individuare lunghezze d'onda particolarmente importanti per la caratterizzazione del materiale oggetto di indagine. Conoscere la posizione delle bande diagnostiche è importante, soprattutto quando si devono gestire immagini iperspettrali composte da centinaia di bande, che appesantiscono il dato e rendono più impegnativo il suo processamento. Nonostante non sia quindi facile utilizzare dati iperspettrali per individuare i picchi diagnostici dei MCA si evidenzia che il dato iperspettrale risulta più utile al riconoscimento di questo materiale, in quanto la sua firma spettrale è distinguibile da quella di altri materiali in apparenza simili, come ad esempio il fibrocemento ecologico (matrice cementizia con fi-

Sensore	Campo visivo FOV (gradi)	Campo istantaneo di vista IFOV (milliradiante)	Larghezza immagine (Swath) 1000 m. s.l.m. (m)	Risoluzione Spettrale (nm)	N. bande	Risoluzione Spaziale 1000 m s.l.m. (m)
MIVIS	71.059	2	1427	VIS-NIR 430-830	102	2
				NIR 1.150-1.550		
				IR 1.980-2.480		
				TIR 8.210-12.700		
CASI-1500	40	0,49	730	365-1.050	288	0,5
AISA Eagle	29,9 - 37,7	0,5-0,6	542-673	400-970	60-488	0,5-0,6
APEX	28	0,48	490	VNIR 380-970	312	0,5
				SWIR 940-2.500		
AVIRIS	34	1	618	400-2.500	224	1

Tab. 2 - Caratteristiche tecniche dei sensori aviotrasportati.

bre organiche), e varia inoltre al variare dello stato di conservazione. Pertanto, i lavori di mappatura eseguiti sul territorio nazionale con sensori iperspettrali, più che all'individuazione delle caratteristiche diagnostiche, si affidano allo studio del comportamento dell'intera firma spettrale.

L'acquisizione di dati telerilevati può essere condotta a più livelli impiegando satelliti, aerei o droni in base all'obiettivo del lavoro e ai risultati che si vogliono ottenere. La scelta della piattaforma, cioè del supporto a cui è montato lo strumento di ripresa (sensore), è determinata principalmente dalla scala spaziale a cui si intende impostare l'indagine e dalla dimensione dell'unità oggetto di indagine, oltre che dai costi in termini economici e di tempo.

Le immagini satellitari presentano un *range* di risoluzioni geometriche molto ampio, da centinaia a pochi metri; esistono ormai un gran numero di satelliti commerciali in grado di fornire (su ordinazione e a pagamento) immagini ad elevata risoluzione geometrica, tale da

essere paragonabile a quella di immagini generate da sensori aviotrasportati, con il vantaggio di descrivere un'area più vasta e richiedere meno tempo e risorse economiche per l'acquisizione. Sfortunatamente la maggior parte dei satelliti montano dei sensori multispettrali limitando così la risoluzione spettrale rispetto ai sensori iperspettrali. La bibliografia che riporta casi di impiego di queste immagini per la mappatura non è ampia, ma mette in luce il ricorso alle piattaforme Ikonos, QuickBird, WorldView-2, WorldView-3 e WorldView-4. Tutte e cinque le piattaforme sono state progettate dalla DigitalGlobe e le loro caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 1. L'Asi (Agenzia spaziale italiana) sta per lanciare la missione iperspettrale Prisma. Purtroppo, però, la risoluzione geometrica di 30 m ne preclude completamente l'utilizzo per la tematica dell'amianto.

La necessità di individuare oggetti di estensione contenuta, come le coperture di edifici e fabbricati, su aree relativamente vaste, quali ad esempio i confini

comunali, fa sì che l'utilizzo di sensori aviotrasportati fornisca un buon compromesso tra una sufficiente risoluzione geometrica e l'investigazione di ampie aree in tempi rapidi. Generalmente, gli aeromobili impiegati sono di modeste dimensioni e volano a quote relativamente basse per garantire una buona risoluzione a terra. In commercio sono disponibili numerosi spettrometri, tuttavia la necessità di osservare specifiche caratteristiche spettrali limita la scelta alle apparecchiature che operano nell'appropriato intervallo di lunghezze d'onda. In Tabella 2 sono riportate le caratteristiche tecniche degli spettrometri maggiormente utilizzati in Italia nei diversi lavori di mappatura dei MCA. Si evidenzia che il sensore aviotrasportato maggiormente impiegato è stato il M.I.V.I.S. (*Multispectral infrared and Visible Imaging Spectrometer*). Si tratta di uno strumento modulare composto da quattro spettrometri che registrano la radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie terrestre in diverse finestre spettrali: nel campo del Visibile-Infrarosso Vicino (20 canali tra 430 e 830 nm), nell'infrarosso Vicino (8 canali tra 1.150 e 1.550 nm), nell'Infrarosso Medio (64 canali tra 1.980 e 2.480 nm) ed infine nell'Infrarosso Termico (10 canali tra 8.210 e 12.700 nm), per un totale di 102 canali. Un'area in continuo sviluppo in termini di innovazione di piattaforme di telerilevamento è rappresentata dai sistemi di volo a pilotaggio remoto e senza pilota a bordo (UAS/ UAV), noti anche come droni. Stimolata dalla crescita delle applicazioni militari, la tecnologia UAS/ UAV è sempre più in uso nelle applicazioni di monitoraggio

ambientale. I droni stanno emergendo sempre più nel mercato definendosi come piattaforme flessibili che, in molti casi, hanno il potenziale di integrare le misure di telerilevamento acquisite da satelliti o aerei. Comunemente vengono montate a bordo camere multispettrali in quanto più economiche e più facile da gestire nelle fasi di acquisizione e trasferimento dei dati. In bibliografia sono riportati casi in cui vengono utilizzati anche sensori iperspettrali per differenti rilievi e ricerche on-site (Tabella 3).

La qualità dell'informazione spettrale acquisibile da drone è inoltre integrata con l'elevata informazione tessiturale dei materiali telerilevati e con l'integrazione di informazioni ausiliarie acquisibili da bassa quota. Una risoluzione a terra centimetrica permette di migliorare le capacità fotointerpretative, rendendo individuabili le ondulazioni delle coperture in CA e aprendo nuove possibilità applicative nel campo dell'analisi tessiturale, dei metodi di classificazione ad oggetti (object-oriented) e del monitoraggio dei cambiamenti delle aree urbane (Qin 2014).

Dai paragrafi precedenti si è evinto che la scelta tecnologica

per effettuare rilievi e mappature del CA è ampia e varia e dipende fondamentalmente dall'obiettivo richiesto e dal grado di precisione a cui si vuole arrivare.

Nella Tabella 4 sono riportati il costo medio di acquisizione e le caratteristiche dei diversi dati telerilevati, ottenibili con le varie tecnologie attualmente presenti sul mercato, per la mappatura delle superfici in cemento amianto. È stato possibile ottenere un confronto tra i prezzi richiesti per le acquisizioni di aree estese riportandoli su un'area unitaria (1 km²).

Dalla tabella 4 si può evincere che i dati da satellite possono essere acquistati sia scegliendo l'area e la data di acquisizione, oppure tramite una richiesta di immagini precedentemente acquisite e raccolte in database dedicati. Infine, è possibile, attivando un apposito abbonamento, effettuare autonomamente il download di immagini satellitari da un database online, acquistando previamente un quantitativo prestabilito di gigabyte (ad esempio un volume di 2 GB corrisponde ad un download di diverse immagini corrispondenti a circa 50 km² alla risoluzione di 50 cm).

Le immagini acquisibili da

aereo sono solitamente le più onerose principalmente a causa del costo della pianificazione del volo e dell'affitto del velivolo; i dati ottenibili da questa piattaforma hanno però un elevato grado di riutilizzo in vari progetti che frequentemente giustificano il prezzo.

Nel caso dei dati telerilevati tramite drone, non è stato possibile arrivare ad un costo medio di acquisizione, ma solo ad un range di valori. Essi sono affetti da una serie di variabili molto specifiche che possono cambiare di volta in volta, soprattutto in relazione al sensore montato sul drone, alle necessità e problematiche del sorvolo. Inoltre, non si può confrontare tale piattaforma con altre (aereo e satellite) su una stessa area unitaria (1 km²) in quanto quest'ultima non è idonea al rilevamento di aree estese.

Caratteristiche spettrali del cemento amianto

Il minerale principalmente impiegato nella produzione di CA è il crisotilo (serie mineralogica del serpentino) e/o l'amosite e la crocidolite; le caratteristiche spettrali diagnostiche del crisotilo sono individuabili in due picchi di assorbimento a 1,385 e 2,323 μm (Swayze *et al* 2006), come mostrato in figura 1. La percentuale di crisotilo contenuta nei MCA si aggira intorno al 10-20%, ciò comporta che le caratteristiche spettrali del minerale puro vadano a combinarsi con quelle della matrice cementizia, ciò può rendere a volte, molto difficile il riconoscimento dei picchi caratteristici.

Il riconoscimento di tutti i caratteri diagnostici del crisotilo richiede quindi un elevato livello di dettaglio del dato misurato in termini di risoluzione spettrale (servono bande con am-

Casa produttrice	Sensore	Range spettrale (nm)	N. Bande	Risoluzione Spettrale (nm)	Risoluzione Spaziale (px)	Modalità di acquisizione	Peso (g)
HySpex	VNIR-1024	400-1000	108	5,4	1024 d	P	4000
	Mjolnir V-1240	400-1000	200	3	1240 d	P	4200
	HySpex SWIR-384	1000-2500	288	5,45	384 d	P	5700
Resonon	Pika L	400-1000	281	2,1	900 d	P	600
	Pika XC2	400-1000	447	1,3	1600 d	P	2200
	Pika NIR	900-1700	164	4,9	320 d	P	2700
	Pika NUV	350-800	196	2,3	1600 d	P	2100
NovaSol	SWIR 640 microHSI	850-1700 600-1700	170 200	5	640 d	P	3500
	Alpha-SWIR microHSI	900-1700	160	5	640 d	P	1200
	Extra-SWIR microHSI	964-2500	256	6	320 d	P	2600

Tab. 3 - Elenco dei principali sensori iperspettrali (e delle rispettive caratteristiche) disponibili per l'accoppiamento con gli UAV/ UAS. 1) (Adão *et al* 2017). - Note: d; Pushbroom length line (l'altra dimensione dipende distanza di scansione del sensore); P-Pushbroom; S- Snapshot.

Piattaforma	Tipo di dato	Costo medio di acquisizione (€ km ²)	Scala d'impiego	Riutilizzo dei dati in altre applicazioni	Note tecniche
Satellite	Immagini di mova acquisizione	75	Comune Provincia Regione	Alto	Ortofoto multispettrale 1,85 cm a 8 bande (area minima da rilevare 100 kmq contigui)
	Archivio	60			Ortofoto multispettrali 1,85 cm a 8 bande (area minima da rilevare 25 kmq contigui)
	Banca dati in abbonamento	20			Ortofoto multispettrali 1,24 cm (disponibilità limitata di download in base all'abbonamento effettuato)
Aereo	Immagini di mova acquisizione	750	Comune Provincia Regione	Alto	Ortofoto iperspettrale con risoluzione spettrale VNIR a 2,8 nm e a SWIR 10 nm - risoluzione spaziale 1/2 m
Ortofoto	Archivio	Gratis	Edificio Comune	Medio	Le immagini sono disponibili gratuitamente presso il portale cartografico italiano http://www.pcn.minsubmarine.it/mivis/
Drone	Immagini di mova acquisizione	1000/1500 (€/ha)*	Edificio Comune	Basso	La cifra è variabile in base all'area sorvolata (al max 2-3 ha/giorno), il costo dell'operatore (500/700 €/giorno) ed al sensore montato sul drone

Tab. 4 - Costo medio e caratteristiche dei dati telerilevati - Note * È stata utilizzata un'altra unità di misura (ha) più idonea alla tipologia di piattaforma e all'effettuabilità del rilievo; il costo di acquisizione in km² avrebbe dato un valore in termini economici sovradimensionato e quindi non utilizzabile come servizio di telerilevamento.

piezza molto ristretta per poter mostrare anche i picchi meno pronunciati), che non è soddisfabile da tutti i sensori, anche se iperspettrali. Generalmente, picchi di assorbimento così ben definiti sono visibili solo con dati iperspettrali acquisiti quasi in continuo (intervallo di risoluzione di almeno 1 nm ed elevata risoluzione spettrale) effettuate in laboratorio o sul campo, anche se in quest'ultimo caso l'umidità dell'aria può creare eccessivo rumore in alcune porzioni dello spettro.

Mappatura delle coperture in cemento-amianto effettuate con il telerilevamento in Italia

Dallo studio della bibliografia a scala internazionale e dai lavori di mappatura effettuati sul territorio italiano, si è evinto che l'uso di dati telerilevati ha dimostrato essere un buon strumento per identificare e valutare lo stato di coperture realizzate in CA nonostante la disomogenea applicazione delle procedure e dei sensori utilizzati nelle varie regioni.

In letteratura attualmente si trovano pochi casi di mappatura di MCA a partire da immagini satellitari. Per l'Italia si possono citare i lavori di mappatura in Piemonte (Barrile 2013), Emilia-Romagna e Calabria con immagini Ikonos-2 (object-oriented), in Toscana (WorldView-3 - classificazione mista), nel Lazio (WorldView-2 - pixel-oriented) ed in Abruzzo (QuickBird). Nel caso della Toscana, non è ancora disponibile una pubblicazione scientifica ma è noto che la metodologia impiegata è stata tratta da un caso studio in Malesia (Taherzadeh 2013) in cui vengono applicati metodi object-oriented per la classificazione di immagini WorldView-2 (Taherzadeh *et all* 2013; Gibril *et all* 2017), con accuratze stimate variabili dal 72% al 90% in base all'algoritmo utilizzato per la classificazione. In Italia, la maggior parte delle mappature dei tetti in CA è avvenuta utilizzando il sensore multispettrale M.I.V.I.S. utilizzando metodi di classificazione

prevalentemente *pixel-oriented*, mentre l'utilizzo di tecniche *object-oriented* è riportabile solo per casi di studio in Piemonte, Emilia-Romagna, Toscana e Calabria. Non mancano però casi in cui le due tecniche sono state impiegate congiuntamente (definite "*miste*"). In tabella 5 vengono elencati i più noti casi di studio.

L'ampia diffusione dell'utilizzo dei dati MIVIS dipende dal fatto che è un metodo che permette di realizzare mappature del CA con un buon grado di accuratezza; tuttavia emergono alcune criticità; risulta infatti che la classificazione da immagini M.I.V.I.S. fornisce un dato sottostimato, principalmente a causa di due fattori:

- 1) il mancato riconoscimento delle coperture di piccole dimensioni (superficie < 100 mq), rappresentate da pochi pixel o in alcuni casi singoli pixel;
- 2) la riduzione dell'area dei tetti a seguito della proiezione bidimensionale della scena.

Di recente, diversi comuni italiani si sono avvalsi dei droni per aggiornare le mappature già effettuate precedentemente o per verificare coperture sospette identificate con i più classici metodi di mappatura. Attualmente in Italia i droni sono prevalentemente impiegati in associazione ai sorvoli aerei e non per una mappatura vera e propria, tuttavia dalle ricerche bibliografiche effettuate si evince un crescente interesse verso questa nuova tipologia di piattaforma mobile con sempre più ampi campi di applicazione e ad una maggior tecnicità dei sensori trasportati. L'uso dei droni nelle aree urba-

nizzate, sia a fini di mappatura che di valutazione dello stato di degrado presenta, nonostante tutto, notevoli criticità, anche dal punto di vista della normativa dell'Ente nazionale aviazione civile (Enac) vigente molto vincolante. Il problema può essere superato con l'uso di droni riconosciuti inoffensivi da Enac. In questa categoria rientrano due tipologie di droni: 1) tutti i droni con peso complessivo al decollo inferiore a 0,30 kg; 2) i droni con peso inferiore a 2 kg che soddisfino ai requisiti di inoffensività definiti da Enac (Linee Guida ENAC 2016/003-NAV). I droni della prima categoria sono troppo leggeri per eseguire rilievi di livello professionale su area vasta mentre i droni della seconda categoria sono poco diffusi: esistono a oggi sul mercato italiano solo due modelli ad ala fissa che soddisfano i requisiti di inoffensività. Resta comunque il problema di trovare spazi di atterraggio adeguati per un drone ad ala fissa in un contesto urbano. Non sono inoltre infrequenti nelle aree urbane altre limitazioni al volo dovute alla presenza di aeroporti nelle vicinanze e di obiettivi critici (es. carceri). Quindi i droni oggi sono difficilmente impiegabili in Italia per riprese sulle aree urbane. Sono invece più adatti a rilevamenti puntuali di edifici isolati.

Attualmente questi velivoli rappresentano sicuramente una tecnologia promettente, ma ad oggi esistono ancora forti limitazioni sia di tipo tecnologico che normativo al loro uso nel monitoraggio delle coperture in CA (Zini 2018).

Prospettive future: librerie per la gestione di dati spettrali

Le librerie di dati spettrali raccolti in situ ed ex situ sono un

utile strumento che permette di leggere attraverso i dati acquisiti da remoto informazioni sullo stato delle matrici ambientali, manufatti antropici e degli ecosistemi. L'aumento della consapevolezza dell'utilità di questi dati fa sentire l'esigenza di avere queste informazioni sempre più aggiornate. La facilità con cui questi dati risultano disponibili dipende fortemente dalla qualità e disponibilità dei dati spettrali e dal modo in cui sono presentati e raccolti.

Negli ultimi anni l'Inail Dit porta avanti con successo procedure, metodologie e tecniche di rilevamento innovative per la caratterizzazione, sia a scala di laboratorio che da remoto, di diverse tipologie di MCA ai fini di tutela della salute dei lavoratori e degli ambienti di vita. Nell'ambito delle proprie attività di ricerca l'Inail Dit, insieme ad altri Enti di ricerca, sta dunque predisponendo una libreria spettrale allineata agli standard internazionali contenente l'insieme di dati (spettri, foto, analisi MOCF, SEM, localizzazione gps etc..) relativi a diverse tipologie di MCA, tra cui i materiali in CA, per l'estrazione delle proprietà fisico-chimiche.

Attualmente la versione disponibile e fruibile di tale libreria contiene, oltre a report MOCF e SEM, i dati di riflettanza acquisiti su diversi campioni e in diverse condizioni di misura, mediante lo spettro-radiometro portatile "FieldSpec pro" della Analytical Spectral Devices.

In totale sono già presenti:

- oltre 150 spettri, misurati in situ, relativi a coperture di edifici;
- oltre 20 spettri relativi a campioni di NOA ("Naturally occurring asbestos" amianto di origine naturale);

- oltre 30 spettri relativi a campioni di MCA.
- ulteriori campioni di NOA e MCA di varia natura sono stati oggetto di preparativa in laboratorio per le successive analisi, attualmente in corso di svolgimento.

Agli spettri di riflettanza sono associati anche i metadati necessari alla descrizione dei campioni stessi ed alle immagini fotografiche relative. I metadati includono inoltre le coordinate geografiche della zona di campionamento del materiale e questo rende possibile la consultazione "geografica" della libreria. La libreria è stata sviluppata utilizzando un software open source esportabile ed espandibile; può essere consultata con 3 modalità, di cui 2 "in locale" (richiedendo che la libreria stessa venga copiata sul proprio PC) ed una via web.

Una volta scaricata la libreria sul proprio PC, i contenuti, essendo georiferiti, possono essere caricati e visualizzati utilizzando un software GIS: in particolare, gli spettri, le foto dei campioni ed i metadati sono stati organizzati in un progetto del software open source QGIS.

La seconda modalità di accesso locale è un client basato sul software Microsoft ACCESS: si tratta di una interfaccia che consente di consultare, interrogando dei campi predefiniti, il database delle firme spettrali ed i metadati associati.

L'ultima modalità di consultazione permette di accedere alla libreria via web attraverso una interfaccia geografica su uno specifico indirizzo web. Questa soluzione permette di consultare dal proprio browser, senza la necessità di installare programmi od estensioni, una piattaforma WebGIS.

Regione	Aree mappate	Metodi	Enti/aziende coinvolte pubblicazioni/ reports
Piemonte	Casale Monferrato	Pixel-oriented	Documento di caratterizzazione della Regione Piemonte
Val d'Aosta	Fondo valle	Pixel-oriented	(Frassy et al., 2014)
Lombardia	Bacino dell'Olna con chiusura a nord di Milano, corridoio autostradale A4 nell'area Milano-Bergamo-Brescia, Valcamonica e Val Trompia.	Pixel-oriented	ARPA Lombardia, 2012
	Biassono, Lissone, Monza, Muggiò, Seregno (MB)		Aggiornamento mappatura cemento-amianto
	Broni (PV) Peschiera Borromeo (MI)		(Cilia et al., 2015) (Marino et al., 2001)
Trentino alto Adige	Provincia di Trento	Pixel-oriented	Rapporto sullo stato dell'ambiente, 2016
Emilia Romagna	Parma	Pixel-oriented	(Ferrarini et al., 2003)
	Rimini	Mixed	(Bassani et al., 2007)
	Fidenza Boretto, Brescello, Gualtieri, Guastalla, Luzzara, Novellara, Poviglio, Reggiolo, Collecchio	Pixel-oriented	ResGea srl
Toscana	Follonica	Mixed	(Bassani et al., 2007)
	Prato		Cristina Martelli, Maurizio Tommasini
Marche	Jesi	Pixel-oriented	ResGea srl

Regione	Aree mappate	Metodi	Enti/aziende coinvolte pubblicazioni/ reports
Lazio	Anagni, Aprilia-Anzio, Civitavecchia, Frosinone, GRA-Roma, Pomezia-Albano, Tiburtina	Pixel-oriented	(Fiumi et al., 2014)
	Aree test nelle province di Roma, Viterbo, Rieti, Frosinone, Latina		Centro regionale Amianto – rapporto di giugno 2013
Abruzzo	Chieti – scalo e zona industriale	Pixel-oriented	Centro di Ateneo di Archeometria e Microanalisi (CAAM) dell'Università Gabriele d'Annunzio di Chieti-Pescara
Molise	Intera Regione	Pixel-oriented	Servizio Statistico e Cartografico Territoriale della Regione Molise relazione tecnica giugno 2006
Campania	Provincia di Napoli, Ischia, Procida	Pixel-oriented	(Fiumi, 2011)
Puglia	Zona agricola di Taranto	Pixel-oriented	(Mansarelli et al., 2017)
	Intera regione		Piano amianto 2014-2023
Basilicata	Area di studio poligono che comprende porzioni di territorio di S. Severino Lucano, Castelluccio Superiore, Viggianello, Episcopia, Lauria, Chiaromonte	Pixel-oriented	Pisno amianto
Calabria	Tutti i comuni	Pixel-oriented	ResGea srl
Sicilia	Gela	Pixel-oriented	ResGea srl

Tab. 5 – Mappature del CA effettuate nel territorio italiano

Le applicazioni WebGIS sono utilizzabili attraverso il browser Internet che può essere integrato con i sistemi informativi territoriali (SIT) delle Regioni e di diversi Comuni: questi rendono accessibili ai cittadini informazioni di carattere ambientale, urbanistico, territoriale offrendo una navigazione su base car-

tografica delle stesse.

Con questo strumento, che l'Istituto intende rendere fruibile gratuitamente sul proprio portale web nel prossimo futuro, gli utenti, sia nazionali che internazionali, avranno a disposizione un'ampia casistica di valori di riflettanza spettrale (firme spettrali) da utilizzare

come riferimento utile per la validazione di propri dati acquisiti da remoto. L'Inail, infatti, in qualità di Ente governativo italiano incaricato di effettuare ricerca scientifica volta al miglioramento della sicurezza degli addetti negli ambienti di lavoro e di vita, ritiene utile supportare le Pubbliche Amministrazioni incaricate di realizzare la mappatura dei siti contaminati da amianto, in Italia o all'estero, rendendo disponibili tali dati scientifici di riferimento, spettrali e non. Ciò al fine di fornire un contributo in termini di prevenzione e protezione dei rischi correlati a tale agente cancerogeno.

Conclusioni

Il lavoro sopra esposto riporta un quadro complessivo di riferimento sui diversi sistemi di telerilevamento, applicati in Italia, per identificare e mappare le coperture in CA; dallo studio effettuato emerge che i risultati delle mappature finora espletate hanno un buon grado di accuratezza nel riconoscimento delle coperture in CA. Tali sistemi innovativi permettono infatti l'identificazione, il riconoscimento e la classificazione da remoto del CA, anche in termini di composizione (per esempio "materiale della matrice" e "amianto"). Ciò consente di effettuare da un lato l'analisi su grandi porzioni di territori in tempi relativamente brevi e dall'altro di realizzare una migliore caratterizzazione sulla natura chimico-fisica delle coperture in CA. I dati ottenibili con tali strumenti da remoto risultano, inoltre, non finalizzati ad un unico scopo e dunque riutilizzabili in più ambiti: sia per mappare, che per monitorare e pianificare gli interventi di bonifica agevolando in tal modo il lavoro degli Enti preposti

alla gestione del territorio. Per ogni situazione specifica vanno tuttavia individuati gli idonei parametri e strumenti tecnici da applicare caso per caso, tra cui la risoluzione spaziale alla quale l'indagine deve essere condotta, le caratteristiche dei sensori impiegati, le piattaforme sulle quali installarli, gli intervalli spettrali da utilizzare, le strategie di campionamento ed analisi (per

esempio pixel-e/o object oriented e della geo-referenzazione delle informazioni acquisite). L'osservazione delle superfici in Ca da remoto è dunque vantaggiosa ma complessa, in quanto le informazioni devono essere acquisite, gestite ed interpretate da personale con specifiche competenze e maturate esperienze specialistiche. Lo sviluppo incessante di nuove

tecniche avanzate di remote sensing permetterà in futuro di ridurre ulteriormente i tempi ed i costi del censimento delle coperture in CA e fornire report dettagliati utili al decisore pubblico per pianificare meglio gli interventi da attuare e le relative priorità, in considerazione degli scarsi fondi pubblici disponibili per il risanamento ambientale.

BIBLIOGRAFIA

- Adão, T., Hruška, J., Pádua, L., Bessa, J., Peres, E., Morais, R. & Sousa, J.J. (2017) Hyperspectral imaging: A review on UAV-based sensors, data processing and applications for agriculture and forestry. *Remote Sensing*, 9 (11), 1110.
- Barrile, V., Bilotta, G. & Meduri G.M. (2013). Riconoscimento di asbesto nelle coperture degli edifici con analisi object-based di immagini satellitari. *Atti 17a Conferenza Nazionale ASITA 2013*, 111-117.
- Bourdes, V., Boffetta, P. & Pisani, P. (2000) Environmental exposure to asbestos and risk of pleural mesothelioma: review and meta-analysis. *European Journal of Epidemiology*, 16, 411-417
- Camargo, M., Stayner, K., Straif, M., Reina, U., Al-Alem, P., Demers, & Landrigan P. (2011) Occupational exposure to asbestos and ovarian cancer. *Environ. Health Perspect.*, 119, pp. 1211-1217. doi:10.1289/ehp.1003283
- Decreto 18 marzo 2003, n. 101 Regolamento per la realizzazione di una mappatura delle zone del territorio nazionale interessate dalla presenza di amianto, ai sensi dell'articolo 20 della legge 23 marzo 2001, n. 93. *Gazz. Uff.* 2003, 106, 1-60.
- Gibril, M.B.A., Shafri H.Z.M. & Hamedianfar, A. (2017) New semi-automated mapping of asbestos cement roofs using rule-based object-based image analysis and Taguchi optimization technique from WorldView-2 images. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (2), 467-491.
- Hillerdal, G. (1999) Mesothelioma: Cases associated with non-occupational and low dose exposures. *Occupational and Environmental Medicine*, 56, 505-513
- International Ban Asbestos Secretariat. [online] <http://ibasecretariat.org/> (Visitato il 10 Febbraio 2020)
- Legge 27 marzo 1992, n. 257 Norme relative alla cessazione dell'impiego dell'amianto. *Suppl. Ordin. Alla Gazz. Uff.* 1992, 87, 1-13.
- Legge 23 marzo 2001, n. 93 Disposizioni in campo ambientale - *Gazz. Uff.* n.79 del 04-04-2001.
- Linee Guida 2016/003-NAV - Ed. n.1 on 1/06/2016 - Aeromobili a pilotaggio remoto con caratteristiche di inoffensività. [online] https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2018-Set/LG_2016_003_NAV.pdf. (Visitato il 13 Aprile 2020)
- Luqman, M., Javed, M.M., Daud, S., Raheem, N., Ahmad, J. & Khan, A.U. (2014) Risk factors for lung cancer in the Pakistani population. *Asian Pacific journal of cancer prevention*, 15, 3035-3039.
- Offermans, N.S., Vermeulen, R., Burdorf, A., Goldbohm, R.A., Kauppinen, T., Kromhout, H. & Van den Brandt, P.A. (2014) Occupational asbestos exposure and the risk of pleural mesothelioma, lung cancer and laryngeal cancer in the prospective Netherlands Cohort Study. *J. Occup. Environ. Med.*, 56, 6-19.
- Qin, R. (2014) An object-based hierarchical method for change detection using unmanned aerial vehicle images. *Remote Sensing*, 6 (9), 7911-7932.
- Reid, A., De Klerk, N.H., Magnani, C., Ferrante, D., Berry, G., Musk, A. W. & Merler, E. (2014) Mesothelioma risk after 40 years since first exposure to asbestos: A pooled analysis. *Thorax*, 69, 843-850
- Swayze, G.A., Clark, R.N., Sutley, S.J., Hoefen, T.M., Plumlee, G.S., Meeker, G.P., Brownfield, I.K., Livo, K.E. & Morath, L.C. (2006) Spectroscopic and x-ray diffraction analyses of asbestos in the World Trade Center dust: Asbestos content of the settled dust. In: *Chemical Society Symposium Series 919*, Oxford University Press., pp. 40-65.
- Taherzadeh, A. & Shafri, H. Z. M. (2013) Development of a generic model for the detection of roof materials based on an object-based approach using WorldView-2 satellite imagery. *Advances in Remote Sensing*, 2, 312-321.
- USGS - Laboratory Reflectance Spectroscopy (RS) Studies of WTC Samples. [online]. <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0429/spectral/> (Visitato il 3 Aprile 2020)
- Zini E. "Il contributo dei droni per la mappatura. *Ecoscienza*. Numero 1 [online] https://www.arpae.it/cms3/documenti/cerca_doc/ecoscienza/ecoscienza2018_1/zini_ecoscienza_1_2018.pdf (Visitato il 12 Maggio 2020)

PAROLE CHIAVE

CEMENTO-AMIANTO; TELERILEVAMENTO; MAPPATURA; LIBRERIE SPETTRALI

ABSTRACT

Asbestos is still a common problem in a lot of country in the world. It was widely used during the 20th century thanks to its numerous physical and mechanical characteristics.

Both the European and the Italian legislations have banned the manufacture, importation, processing and distribution in commerce of asbestos-containing products and have recommended action plans for the mapping and safe removal of asbestos from public and private buildings.

The aims of this paper is to elaborate a specific overview on the application of remote sensing for mapping the asbestos cement roofs, reporting the Italian experience as a case study, considering different types of sensors, platforms, processing models used for this application.

AUTORE

SERGIO BELLAGAMBA - S.BELLAGAMBA@INAIL.IT

PAGLIETTI FEDERICA - F.PAGLIETTI@INAIL.IT

DE SIMONE PAOLO - P.DESIMONE@INAIL.IT

INAIL - ISTITUTO NAZIONALE ASSICURAZIONE INFORTUNI SUL LAVORO

DIT - DIPARTIMENTO INNOVAZIONI TECNOLOGICHE E SICUREZZA DEGLI IMPIANTI, PRODOTTI E INSEDIAMENTI ANTROPICI

DANIELE TADDEI - DANIELE.TADDEI@UNIROMA1.IT

SAPIENZA - UNIVERSITÀ DI ROMA, DIPARTIMENTO INGEGNERIA CHIMICA MATERIALI AMBIENTE (DICMA)