



**UNIVERSITA "LA SAPIENZA" DI ROMA  
FACOLTA DI INGEGNERIA**

---

**DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale  
Via Eudossiana 18, 00184 Roma**

**DOTTORATO IN INFRASTRUTTURE E TRASPORTI  
Ciclo XXIX  
CURRICULUM INFRASTRUTTURE**

**SISTEMI DI TELERILEVAMENTO PER LA  
CARATTERIZZAZIONE DEI CONGLOMERATI  
BITUMINOSI E DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI**

**CANDIDATO**

*Dott. Alessandro Mei*

**RELATORE:**

*Prof. Ing. Antonio D'Andrea*

**COORDINATORE DOTTORATO:**

*Prof. Ing. Antonio Musso*

**CORRELATORI:**

*Dott.ssa Rosamaria Salvatori*

*Dott. Ing. Nicola Fiore*



*...a mia figlia Sofia.*

# INDICE

INDICE .....	4
1. INQUADRAMENTO.....	6
2. INTRODUZIONE.....	7
2.1 LE INFRASTRUTTURE VIARIE.....	7
2.1.1 Conglomerati bituminosi .....	7
2.1.2 Pavimentazioni stradali e principali ammaloramenti.....	8
2.2 SISTEMI DI TELERLEVAMENTO OTTICO PASSIVO .....	11
2.2.1 Principi fondamentali .....	11
2.2.2 Trattamento ed elaborazione delle immagini .....	15
2.3 CARATTERISTICHE SPETTRALI DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI .....	20
2.3.1 Pavimentazioni recenti .....	20
2.3.2 Pavimentazioni deteriorate .....	20
2.3.3 Correlazioni tra dati spettrali e ammaloramenti .....	21
3. STRUTTURA PROGETTO DI RICERCA .....	23
4. Step1 - SPERIMENTAZIONE DI LABORATORIO .....	24
4.1 PROVE SU INERTI e PROVINI.....	25
4.1.1 Dati e preparativa campioni.....	25
4.1.2 Predisposizione per misure spettrometriche.....	30
4.1.3 Osservazioni e risultati .....	34
4.2 PROVE DI ADESIONE.....	47
4.2.1 Metodologia e dati.....	47
4.2.2 Risultati e correlazioni.....	55
4.2.3 Correlazioni tra sistemi.....	71
5. Step 2 - SPERIMENTAZIONE DI CAMPO .....	75
5.1 MODELLAZIONE INDICI SPETTRALI .....	75
5.1.1 Metodologia e dati .....	75
5.1.2 Risultati e osservazioni.....	77
5.2 ROVER FOR ASPHALT ANOMALIES SURVEY (RAAS) .....	84
5.2.1 Metodologia e dati .....	84
5.2.2 risultati e osservazioni .....	91
6. Step 3 - TELERILEVAMENTO .....	114
6.1 ELABORAZIONE IMMAGINI IPERSPETTRALI MIVIS.....	114
6.1.1 metodologia e dati .....	114
6.1.2 risultati e osservazioni .....	121
6.2 VALUTAZIONE DELL'AMMALORAMENTO STRADALE TRAMITE DATI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE.....	125
6.2.1 Pre-processing radiometrico .....	125
6.2.2 Elaborazione dell'immagine.....	128

CONCLUSIONI.....	139
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	143
RINGRAZIAMENTI .....	147

# 1. INQUADRAMENTO

Negli ultimi anni si riscontra un crescente interesse circa le numerose applicazioni che possono derivare dall'uso di immagini telerilevate in materia di monitoraggio e gestione della rete stradale. Per le loro caratteristiche geometriche e spettrali le superfici asfaltate sono infatti un elemento territoriale ben individuabile su immagini riprese a diverse risoluzioni (spaziali e spettrali) e spesso rappresentano anche un elemento indispensabile per analisi multi temporali negli studi territoriali. Le informazioni derivate dall'analisi di immagini e da rilievi a terra possono essere inoltre utilizzate, se inserite all'interno di un *Geographical Information System* (GIS), per la realizzazione di cartografie aggiornabili ed interrogabili. L'utilizzo di sensori ad alta risoluzione sia spaziale che spettrale, ha permesso di derivare informazioni sulle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali indagati soprattutto a piccola scala. Per analizzare il reticolo stradale, in letteratura vengono utilizzate sia immagini multispettrali (Potuckova et al. 2010, Gao et al. 2009) sia immagini iperspettrali AVIRIS [Herold et al 2008] CASI (Andreou et al. 2011) e MIVIS [Pascucci et al, 2008], abbinando alle procedure per l'elaborazione delle immagini campagne di misura spettroradiometriche e/o indagini mediante *Pavement Management Systems*. Le immagini satellitari presentano elevate potenzialità per l'estrazione e la classificazione delle pavimentazioni stradali sebbene per la loro interpretazione sia comunque necessario un accurato studio delle caratteristiche spettrali degli asfalti, dei diversi componenti utilizzati per la loro messa in posto nonché delle numerose tipologie di alterazioni e deterioramenti che possono essere riconosciuti su tali materiali.

Le superfici costituite da conglomerati bituminosi presentano generalmente valori di riflettanza spettrale complessivamente molto bassa. Nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350 e 2500 nm, la risposta radiometrica degli asfalti, misurata in campo, è dominata dalla presenza del bitume, il quale assorbe quasi totalmente la radiazione solare incidente, mentre la natura degli inerti e le loro dimensioni incidono solo marginalmente sull'andamento spettrale [Herold et al., 2004]. Una superficie asfaltata può essere modificata dall'azione meccanica dovuta al traffico veicolare e dal deterioramento naturale del bitume causato principalmente dalla reazione con l'ossigeno presente in atmosfera, dall'azione fotochimica dovuta alla radiazione solare e dal riscaldamento superficiale. A seguito di questi processi si manifesta la perdita dei composti oleosi con conseguente variazione nella composizione dello strato superficiale e redistribuzione degli inerti [Bell, 1989].

Diversi autori illustrano la necessità di integrare i dati remoti con dati derivanti da analisi di laboratorio. L'utilizzo di tale combinazione, può permettere di mettere a punto una procedura di elaborazione immagini volta sia all'estrazione della geometria stradale sia alla definizione di alcuni indici spettrali caratteristici relativi alla tipologia del manto stradale, ipotizzando inoltre la presenza di alcune aree particolarmente soggette a fenomeni di alterazione. Sebbene i risultati ottenuti finora abbiano delineato delle procedure pienamente riproducibili, viene comunque specificata la necessità di una validazione e di confronto con misure in situ e di laboratorio (Prearo et al. 2005, Herold et al. 2008).

Sulla base di queste considerazioni, le attività del presente dottorato di ricerca sono state finalizzate allo studio delle relazioni che intercorrono tra dati derivanti da sensori ottici e le caratteristiche fisico-chimiche dei materiali costituenti i conglomerati bituminosi attraverso un approccio interdisciplinare. A tale scopo si è fatto uso di analisi di laboratorio classiche nell'ambito dell'ingegneria dei materiali alle quali sono state associate analisi ottiche tramite sensoristica appartenente al mondo del telerilevamento. E' stata quindi effettuata una campagna di acquisizione di dati in campo al fine di studiare diverse tipologie di conglomerati bituminosi. Le attività di studio sono state inoltre volte alla quantificazione di indici spettrali in grado di definire le caratteristiche dello strato di usura di una strada ed in particolare alla rimozione del bitume superficiale e alla differenziazione in base al tipo di usura. Lo studio delle caratteristiche spettrali dei diversi tipi di conglomerati bituminosi ha infine consentito di ampliare le conoscenze in relazione ad un loro utilizzo per la valutazione dello stato di usura delle strade mediante diversi sensori satellitari.

E' doveroso infine sottolineare che tale progetto di ricerca è stato svolto in collaborazione con il Gruppo di Ricerca *Sviluppo di Dispositivi e Metodologie di Osservazione della Terra* dell' Istituto sull'Inquinamento Atmosferico (IIA) - Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

## 2. INTRODUZIONE

### 2.1 LE INFRASTRUTTURE VIARIE

#### 2.1.1 *Conglomerati bituminosi*

I conglomerati bituminosi utilizzati per le pavimentazioni stradali sono costituiti principalmente da una miscela di bitume e materiale inerte. Il termine bitume indica, in questo contesto, una miscela di idrocarburi naturali o residuati derivanti dal petrolio, che fa da legante per il materiale roccioso che costituisce lo scheletro [European Asphalt Pavement Association EAPA; <http://www.eapa.org/>]. Gli aggregati rocciosi che ne compongono lo scheletro hanno litologia e dimensioni diverse in funzione delle disponibilità locali di inerti e della destinazione di uso ma usualmente sono costituiti da  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ , e  $\text{MgO}$  (Claine et al. 1984, Robl et al., 1991, Bassi, 1993).

Il conglomerato bituminoso è un materiale a comportamento elasto-plasto-viscoso, la cui risposta alle sollecitazioni esterne, in termini di deformazione, dipende non solo dall'entità, ma anche dal tempo e dalle modalità di applicazione dei carichi, nonché dalla temperatura. Questo è costituito da miscele accuratamente proporzionate di aggregati grossi, aggregati fini e filler impastati con del bitume.

Gli aggregati sono graduati con cura dalla dimensione massima fino al filler allo scopo di ottenere una miscela con una percentuale di vuoti controllata; la quantità di bitume immessa successivamente è in rapporto al contenuto di vuoti. Quando questi componenti sono progettati accuratamente forniscono una pavimentazione con un'elevata durabilità e in grado di sopportare i carichi del traffico pesante sempre più diffuso sulle strade.

Gli aggregati costituiscono quindi lo scheletro di tutti gli strati che compongono la sovrastruttura stradale; questi sono divisibili in categorie differenti tra di loro soprattutto per l'origine. Questi aggregati sono ottenuti da rocce con particolari caratteristiche di resistenza mediante un processo di frantumazione artificiale per mezzo di frantoi (figura 2.1-1) e successiva vagliatura. Il materiale risultante dalla vagliatura è un prodotto con un prestabilito assortimento granulometrico e spigoli vivi. Gli aggregati di questo tipo vengono impiegati soprattutto negli strati più superficiali e quindi più sollecitati della sovrastruttura.



Figura 2.1-1: Cava aggregati nella cava di Palau (Olbia-Sardegna).

Una ulteriore tipologia di aggregati è rappresentata da quelli di origine artificiale i quali possono derivare da sottoprodotti dell'industria quali scorie di altoforno (loppe granulari e frantumate), ceneri volanti, da plastiche riciclate, oppure derivanti dalla fusione ad alte temperature di determinati minerali o rocce (ad es. la bauxite o alcune argille). Il loro utilizzo e le loro proprietà, oltre a risolvere, in parte, il problema dello

smaltimento, permettono di essere impiegati solo “localmente”, lì dove le proprietà degli aggregati richieste non sono possedute dagli aggregati naturali.

Il bitume viene definito come “materiale virtualmente non volatile adesivo ed impermeabile derivato dal petrolio oppure presente nell’asfalto nativo completamente o quasi completamente solubile in toluene molto viscoso o quasi solido a temperatura ambiente” (Norma UNI EN 12597 *Bitumen and bituminous binders*). Si tratta di un materiale semisolido a temperatura ambiente e termoplastico che principalmente viene utilizzato come legante all’interno dei conglomerati bituminosi. Il processo di produzione del bitume più comune è quello della distillazione frazionata mediante il quale si ottiene il frazionamento del grezzo sfruttando le differenze esistenti fra le temperature di ebollizione dei suoi vari componenti. Dal punto di vista fisico, il bitume dà luogo ad un sistema multifasico caratterizzato da una fase oleosa (malteni) contenente una fase dispersa; questa è rappresentata da molecole adsorbite (resine) che circondano molecole con struttura chimica complessa (asfalteni). Le resine fanno da “zona di transizione” tra gli asfalteni e la fase oleosa nella quale gli asfalteni sono insolubili. Ciascuna classe ha una propria funzione nel quadro totalitario del comportamento fisico del bitume. Gli asfalteni sono, in gran parte, responsabili del comportamento del bitume come corpo viscoso dotato di plasticità ed elasticità, le resine svolgono invece un’azione disperdente degli asfalteni conferendo flessibilità al momento di sollecitazioni, mentre i malteni rappresentano la componente bituminosa fluida e perciò rendono il bitume scorrevole a caldo conferendogli la capacità di “bagnare” o ricoprire estese superfici di altro materiale. Ciò fa del bitume una sostanza complessa che può variare composizione dipendentemente dalla origine del petrolio grezzo e del processo di raffinazione. La natura chimica è essenzialmente composta da circa l’80%-87% di carbonio, il 9-11% di idrogeno, tra il 2 e l’8% di ossigeno, tra lo 0 e l’1% di azoto e zolfo nonché da metalli in tracce (Herold et al. 2007).

Esiste infine la categoria dei bitumi modificati, ossia arricchiti con polimeri al fine di incrementare le prestazioni e il comportamento. Rispetto ad un bitume tradizionale i bitumi modificati hanno pertanto delle caratteristiche fisiche e reologiche diverse ed un intervallo di elastoplasticità mediamente più elevato. Il polimero conferisce quindi al bitume una migliore resistenza all’invecchiamento, alla deformazione e ne riduce la fragilità alle basse temperature.

### **2.1.2 Pavimentazioni stradali e principali ammaloramenti**

Una pavimentazione è formata da una successione di strati costituiti da materiali di caratteristiche fisiche e meccaniche diverse (fig.2.1-2), scelti a seconda della funzione che tali strati assolvono all’interno della struttura e a seconda del tipo di sollecitazione prevalente a cui sono sottoposti. Tale composizione deriva da considerazioni di tipo tecnico-economico: ogni strato è costituito dal materiale più idoneo a rispondere alle sollecitazioni indotte dal traffico, la cui entità decresce dall’alto verso il basso. La riduzione delle tensioni procedendo in profondità dipende dalla rigidità e dallo spessore di ogni singolo strato (Ferrari e Giannini, 1996). Al variare dei materiali impiegati e dell’ordine con cui sono disposti nella struttura, si possono distinguere diversi tipi di sovrastrutture stradali quali flessibili, semirigide, rigide, composite, modulari e in terra (Di Mascio et al. 2010, APG 2008).

Il conglomerato bituminoso, come è noto, varia la sua consistenza con la temperatura ed ha rigidità variabile con la velocità di applicazione del carico. Il comportamento visco-elastico del conglomerato bituminoso è responsabile di deformazioni continue sotto un carico pressoché costante: ciò evita il ricorso al taglio dei giunti, ma causa fenomeni di ammaloramento quali l’ormaiamento in presenza di carichi prolungati (ad esempio nei parcheggi).

Il fenomeno di *creep* è pressoché assente per carichi che variano rapidamente quali sono quelli che si hanno al passaggio dei veicoli. In tali condizioni il conglomerato bituminoso si comporta praticamente come un solido elastico ed è perciò suscettibile di rotture fragili. Le variazioni termiche o fenomeni di instabilità volumetrica degli strati inferiori inducono nelle pavimentazioni in generale un regime di deformazione che produce uno stato tensionale variabile lentamente nel tempo. I conglomerati bituminosi, soggetti a tali tensioni, manifestano un sensibile fenomeno di *creep* che porta a compensare le deformazioni indotte dalle variazioni termiche e volumetriche. I vantaggi derivanti dalle proprietà reologiche del conglomerato bituminoso costituiscono anche la fonte dei problemi relazionati alle pavimentazioni flessibili. La variabilità della consistenza con il regime termico, richiede che la temperatura di utilizzo della pavimentazione non ricada nel campo in cui il bitume è fragile o molle (SITEB, 1996).

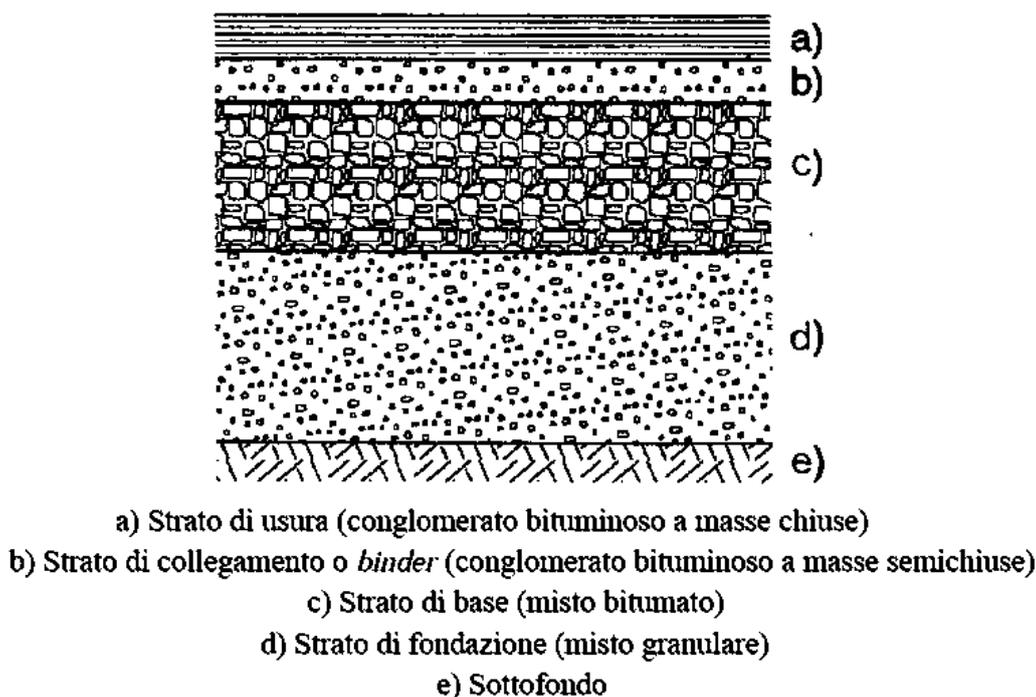


Figura 2.1-2: Schema di una pavimentazione flessibile.

Lo strato di usura ha principalmente il compito di garantire le caratteristiche di aderenza e di sopportare le azioni tangenziali esercitate dai veicoli. Viene perciò realizzato con un conglomerato bituminoso di buona qualità, che garantisca nel tempo valori elevati e costanti di resistenza al taglio e una adeguata macro-tessitura (Report *FHWARD-03*; Miller et al. 2003, Di Mascio et al. 2010, Linee guida ANAS, 2008).

Lo strato di collegamento risente, in maniera minore rispetto all'usura, delle azioni tangenziali prodotte dal traffico, e non deve soddisfare l'esigenza dell'aderenza: il conglomerato bituminoso confezionato per lo strato di binder può offrire quindi una resistenza al taglio inferiore a quella dello strato di usura essendo confezionato con aggregati meno duri e percentuali di bitume leggermente inferiori. Lo strato di base risente invece solo di sollecitazioni di compressione e flessione dovute al peso dei veicoli che transitano sulla strada. Le sollecitazioni di flessione si traducono, nella parte inferiore dello strato, in tensioni di trazione la cui entità varia in funzione del tipo di traffico. Per tale motivo il materiale dello strato di base può essere composto da misto granulare non legato solo nei casi di traffico pesante nullo o scarso. Quando il numero e il peso dei veicoli commerciali diventa rilevante, bisogna prevedere materiali legati che sviluppino sufficienti resistenze a trazione. Allo scopo sono impiegate miscele bitumate (conglomerati bituminosi e misti bitumati) o, per traffici di tipo autostradale e aeroportuale, sono ormai da molti anni utilizzati i misti cementati, con i quali si realizza una pavimentazione semirigida.

Nel processo di gestione delle infrastrutture viarie, la valutazione dello stato delle pavimentazioni stradali rappresenta uno degli aspetti fondamentali per garantire standard funzionali adeguati e predisporre un'appropriata programmazione degli interventi di manutenzione. La gestione delle pavimentazioni stradali richiede l'elaborazione di specifici programmi di organizzazione delle attività finalizzati al loro mantenimento in una determinata condizione con il minor costo possibile per un prefissato periodo di tempo. I dati necessari per la gestione delle sovrastrutture possono suddividersi in due categorie (secondo le indicazioni delle normative statunitensi): dati di inventario, stabili nel tempo, e dati prestazionali, destinati ad evolversi nel corso della vita utile della sovrastruttura. Al fine di mantenere la funzionalità della pavimentazione stradale è necessario effettuare una programmazione degli interventi che si basi su quanto più possibile accurati e soprattutto aggiornati nel minor tempo possibile. Tale programmazione deve essere tuttavia basata su una accurata conoscenza e catalogazione degli ammaloramenti che insistono su un determinato tratto stradale. A tal fine l'istituzione del cosiddetto Catasto Stradale permette di ottenere tali informazioni. Se da una parte l'utilizzo di questi database possono essere considerati di fondamentale importanza per il mantenimento di corretti standard sia in termini di funzionalità, di resistenza strutturale, di regolarità e sia in termini di sicurezza del piano viabile, dall'altra peccano, il più delle volte, di essere imprecisi e non aggiornati. Poter identificare con sistemi remoti alternativi, quali quelli legati al

telerilevamento ottico, vuol dire dover effettuare una profonda analisi di caratteristiche specifiche dei conglomerati bituminosi come la quantità di bitume che li compongono, che li ricoprono o la presenza di ammaloramenti.

Di seguito vengono riportati i principali ammaloramenti stradali che più spesso si riscontrano durante indagini di tipo ingegneristico stradale. Benché questa lista non rappresenti una casistica completa, questa è tarata sui tipi di ammaloramento potenzialmente identificabili tramite l'impiego di sistemi di telerilevamento. L'esame del degrado del manto stradale, rientra all'interno di quel complesso di operazioni ed attività che hanno lo scopo di conservare le caratteristiche funzionali e strutturali delle pavimentazioni nell'arco del periodo di vita utile dell'infrastruttura viaria (Riferimento normativo per la manutenzione stradale Bollettino Ufficiale n° 125/88 Consiglio Nazionale delle Ricerche) nonché è rappresentato da quella combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o riportare una entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta (Norma UNI 9910). Le azioni di supervisione di una infrastruttura viaria possono comunemente avvenire mediante metodologie di rilievo puntuali o continue ad alto rendimento, devono compiersi seguendo una classificazione standardizzata suddividendo gli ammaloramenti per difetti di *regolarità*, come ad esempio le fessurazioni, di *aderenza* quali la disgregazione degli inerti e di *portanza* come le buche profonde e le fessurazioni ramificate. Di seguito vengono riportati alcuni esempi di queste categorie maggiormente studiate in ambito di analisi di ammaloramento delle strade tramite l'utilizzo di sensori remoti satellitari.

- Le fessurazioni possono avere forme diverse ed essere tra loro interconnesse e riguardare anche un'ampia superficie stradale. L'ammaloramento può denotare l'insorgere di fenomeni di fatica e può avvenire senza compromissione della planarità della superficie. Tra i metodi di misurazione abbiamo solo quello visivo (monitoraggio visivo e fotografico, asta e metro, tabelle di rilevamento). L'indicatore di stato è l'ACA (*Area Of Cracking*), il quale indica lo stato di fessurazione di una pavimentazione, definito come il rapporto tra l'area fessurata e l'area totale della pavimentazione. Per misurare praticamente l'area di fessurazione si deve rilevare l'estensione delle superfici fessurate le quali sono definite da rettangoli che racchiudono la zona ammalorata. Tra le cause si annoverano le oscillazioni diurne della temperatura che provocano alla matrice asfaltica l'impossibilità di espandersi e contrarsi.
- La disgregazione di inerti riguarda la progressiva disintegrazione di uno strato di asfalto dalla superficie verso il basso a causa del dislocamento dei granuli. Tra i metodi di misurazione abbiamo quello visivo (monitoraggio visivo e fotografico, asta e metro, tabelle di rilevamento) o strumentale (*Texture meter*, *SCRIM*, *Grip tester*). L'indicatore di stato è l'ARV (*Ravelled Area*). Numericamente è espresso dal rapporto percentuale dell'area sgranata rispetto all'area totale. Tra le cause vi è l'utilizzo di materiali e conglomerati bituminosi scadenti, la Perdita del legante tra granuli e aggregato bituminoso a seguito di: inadeguata compattazione durante la fase di costruzione o all'utilizzo di pezzame molto fino (vedi polvere) che costringe alla fine il legante a legarsi a lui invece che ai granuli.
- Le buche profonde si presentano su pavimentazioni invecchiate o mal realizzate; interessa progressivamente i vari strati della sovrastruttura; gli strati di usura e binder vengono letteralmente scalzati per l'azione congiunta del traffico e dell'acqua meteorica con decadimento delle caratteristiche di regolarità e di sicurezza della pavimentazione. Questo ammaloramento è tipico delle strutture non correttamente dimensionate, realizzate con materiali scadenti o poggiate sovrapponendo direttamente gli strati superficiali sul sottofondo. L'infiltrazione progressiva dell'acqua che ristagna, produce risalita di materiale fino che degrada le caratteristiche originarie degli strati. Tra i metodi di misurazione abbiamo quello visivo (monitoraggio visivo e fotografico, asta, tabelle di rilevamento) o strumentale (ARAN, Profilometro laser). L'indicatore di stato è l'NPT (*Number Standard Potholes*), è il fenomeno che consiste nella perdita localizzata di materiale dalla superficie della pavimentazione che si estende sino ad intaccare gli strati sottostanti.
- Le fessurazioni ramificate (o a pelle di coccodrillo) Sono serie di fessurazioni interconnesse che si estendono anche su ampie superfici; generalmente si formano in un primo tempo crepe longitudinale e successivamente si interconnettono dando l'aspetto di dorso di coccodrillo a volte. Le lesioni risultano inizialmente chiuse ma progressivamente tendono ad aprirsi e a distaccarsi compromettendo l'impermeabilizzazione della struttura. La dimensione massima delle superfici tra i rami della fessurazione può raggiungere qualche decimetro. L'ammaloramento, evidente in superficie, ha origine negli strati portanti di base o di fondazione o, anche, nel sottofondo per cedimento strutturale.

## 2.2 SISTEMI DI TELERLEVAMENTO OTTICO PASSIVO

Il Telerilevamento consente l'acquisizione a distanza di informazioni su oggetti attraverso diverse tecniche di elaborazione dei dati permettendone lo studio sia in termini qualitativi che quantitativi. Le tecniche di Telerilevamento permettono quindi di conoscere le caratteristiche delle superfici investigate, sfruttando l'energia elettromagnetica (emessa, trasmessa o riflessa) come veicolo di trasporto delle informazioni.

### 2.2.1 Principi fondamentali

Quando un'onda elettromagnetica incide sulla superficie di un oggetto, è possibile osservare i fenomeni di riflessione, trasmissione e di assorbimento. La legge fondamentale che regola l'aspetto quantitativo dello studio della propagazione della radiazione elettromagnetica è la "Legge di Kirchhoff", basata sul principio di conservazione dell'energia. Essa indica che quando la radiazione elettromagnetica incide su una superficie essa viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa (Figura 2.2.1) secondo la seguente relazione:

$$I_0 = I_R + I_A + I_T$$

Dove:  $I_0$  è l'energia incidente,  $I_A$  è l'energia assorbita,  $I_R$  è l'energia riflessa e  $I_T$  è l'energia trasmessa

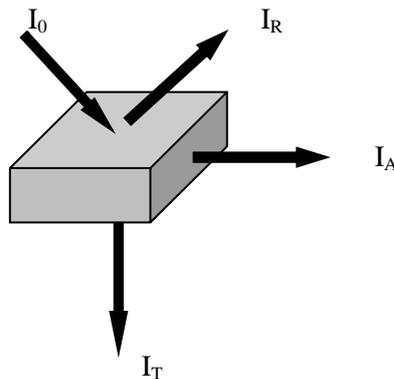


Figura. 2.2-1 - Rappresentazione schematica della Legge di Kirchhoff.

Per ognuno di questi fenomeni di interazione energia – materia (riflessione, assorbimento e trasmissione) è possibile calcolare un coefficiente che esprime in modo quantitativo l'interazione tra materia ed energia elettromagnetica. Nello studio dell'interazione tra la radiazione solare e l'atmosfera, assume particolare importanza il calcolo del coefficiente di trasmissione o "trasmittanza":

$$\tau = \frac{I_T}{I_0}$$

Tale coefficiente è un valore cumulativo che non tiene conto delle variabilità del fenomeno nel dominio delle lunghezze d'onda. Alcuni materiali possono infatti risultare trasparenti in determinate bande di lunghezze d'onda ed essere opachi in altre. Riferendo tutte le grandezze finora esaminate a specifiche lunghezze d'onda, sarà possibile calcolare la "trasmittanza spettrale".

Per lo studio delle superfici naturali è invece necessario valutare i processi di riflessione e considerare quindi il coefficiente di riflessione o "riflettanza", espresso come:

$$\rho = \frac{I_R}{I_0}$$

Anche in questo caso si può calcolare la “riflettanza spettrale” che esprimerà il rapporto tra la luce riflessa dal suolo e quella incidente su di esso, in funzione della lunghezza d’onda. Per ogni pixel dell’immagine è possibile estrarre i valori di riflettanza al variare della lunghezza d’onda. Queste curve, che rappresentano il comportamento spettrale delle superfici, rappresentativo delle caratteristiche chimico-fisiche della superficie indagata, vengono definite firme spettrali poiché permettono di riconoscere ed individuare la tipologia e le caratteristiche delle superfici (Figura 2.2.2).

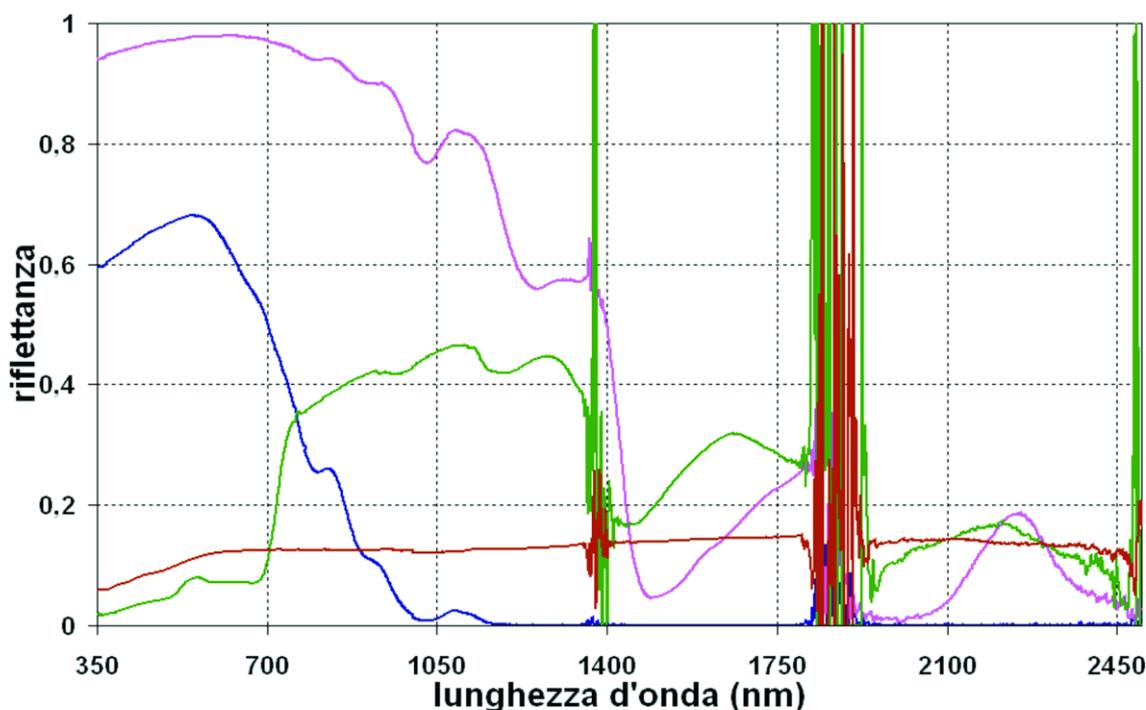


Figura 2.2-2: Esempi di firme spettrali acquisite in campo. Nel VIS i valori di riflettanza più alti sono della neve (curva magenta). In blu è riportata la firma del ghiaccio e in verde e marrone rispettivamente la vegetazione e la sabbia.

Ogni costituente della superficie terrestre, sia esso suolo, vegetazione o materiali artificiali è in grado di riflettere, assorbire e trasmettere la radiazione incidente in percentuali diverse a seconda delle proprie caratteristiche chimico-fisiche. Lo scopo del telerilevamento è, infatti, riuscire a stabilire una corrispondenza tra la qualità e la quantità di energia riflessa e la natura o lo stato delle superfici dalle quali proviene.

Nella maggior parte delle applicazioni ambientali, come quella che viene proposta in questa tesi di dottorato, si utilizzano dati remoti ottici di tipo passivo. Nel caso del telerilevamento passivo la sorgente di radiazione elettromagnetica è data dal Sole e i sensori sono in grado di registrare la radiazione proveniente dalla superficie terrestre. Tale registrazione avviene secondo un campionamento a griglia e secondo una codifica in codice binario; il valore numerico di ciascuna cella elementare che compone la griglia (detta pixel da *picture element*) rappresenta la risposta radiometrica di quella porzione della superficie terrestre, integrata in un determinato intervallo di lunghezze d’onda. Generalmente, i sensori misurano la radiazione riflessa nell’intervallo spettrale che va dal visibile all’infrarosso vicino e medio (350 - 2500nm). L’immagine può essere rappresentata, quindi, con un vettore a due dimensioni, ordinato per righe e colonne. Le righe e le colonne identificano la posizione del pixel sull’immagine. Ad ogni pixel è assegnato un *Digital Number* (DN) che rappresenta l’intensità media del segnale riflesso o emesso dalla superficie (Figura 2.2.3). Il DN è un numero che viene generato secondo un intervallo dipendente dalle caratteristiche tecniche del sensore; i DN varieranno da 0-255 se l’intensità dell’energia riflessa è registrata in 8bit, o tra 0 e 1023 se il segnale è registrato con 16 bit.

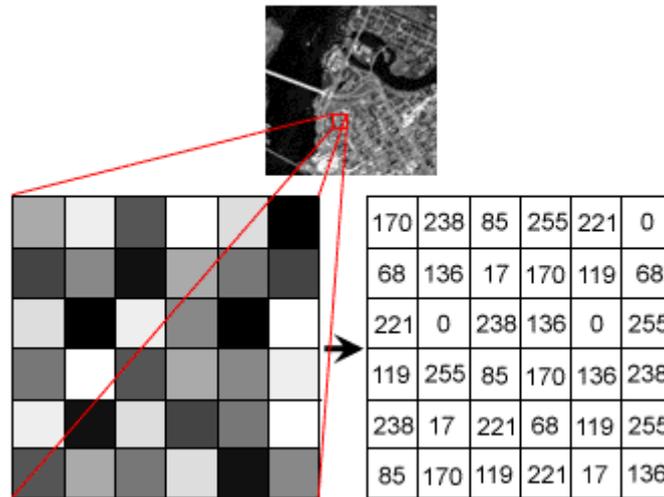


Figura 2.2-3: Visualizzazione delle immagini

Come già detto, la modalità con cui le superfici riflettono, trasmettono o assorbono la radiazione elettromagnetica è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali che le compongono. Analizzando la quantità di radiazione riflessa alle diverse lunghezze d'onda è pertanto possibile distinguere i diversi materiali che costituiscono la superficie terrestre (suolo vegetazione, affioramenti rocciosi, corpi idrici), motivo per cui i sensori satellitari sono predisposti per riprendere la stessa porzione di territorio a diversi intervalli di lunghezza d'onda (bande). Il numero delle bande, la loro ampiezza e la loro posizione nello spettro elettromagnetico definiscono la risoluzione spettrale dell'immagine. Un'immagine telerilevata può, quindi, essere concepita come composta da tante matrici di pixel (bande) quanti sono gli intervalli di lunghezza d'onda del sensore. Si definiscono, pertanto, immagini multispettrale quelle composte da 3-7 bande ed immagini iperspettrali quelle per le quali il numero di bande a disposizione raggiunge il centinaio.

L'analisi iperspettrale sfrutta l'interazione di un oggetto con una sorgente di luce e consente l'estrazione della firma spettrale tipica di ciascun materiale investigato.

Lo spettro elettromagnetico (Figura 2.2.4) è l'intervallo di tutte le possibili lunghezze d'onda (o frequenze) delle onde elettromagnetiche e può essere suddiviso in 7 regioni (o bande):

- Raggi  $\gamma$ : lunghezza d'onda  $\lambda$  inferiore a 0.01 nm;
- Raggi X: lunghezze d'onda comprese fra 0.01 nm e 1 nm;
- Raggi ultravioletti (UV): lunghezze d'onda comprese fra 1 nm e 400 nm;
- Radiazione visibile (VIS): lunghezze d'onda comprese fra 400 nm (luce violetta) e 750 nm (luce rossa);
- Radiazione infrarossa (IR): lunghezze d'onda comprese fra 750 nm e  $10^5$  nm, divise in sottobande: infrarosso vicino (780-1700 nm, NIR), infrarosso medio (1700-4200 nm, MIR), infrarosso termico (4200-14000 nm, TIR) e infrarosso lontano (14000-100000 nm, FIR);
- Microonde (MW): lunghezze d'onda comprese fra  $10^5$  nm e  $10^8$  nm;
- Onde radio: lunghezza d'onda superiore a  $10^8$  nm.

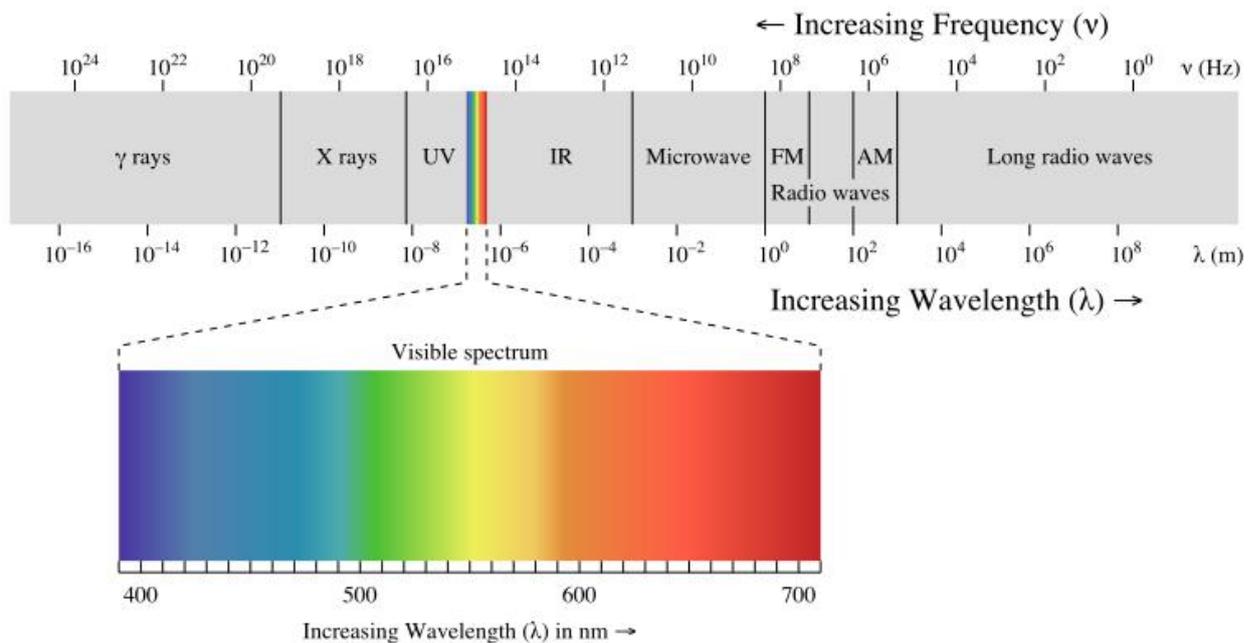


Figura 2.2-4: Spettro delle onde elettromagnetiche.

In linea generale le caratteristiche fondamentali di una immagine telerilevata possono essere distinte nei seguenti punti:

- **Risoluzione spettrale.** Per risoluzione spettrale si intende il numero delle bande rilevate e la loro larghezza: maggiore è il numero di bande, e di conseguenza minore la loro larghezza, maggiore sarà la capacità di identificare gli oggetti ripresi in base alle loro caratteristiche radiometriche. Il numero di bande rilevate dal sensore utilizzato differenzia il telerilevamento iperspettrale dal più comunemente utilizzato multispettrale. Con quest'ultimo vengono acquisite immagini in un numero limitato di bande distinte, ampie e solitamente non contigue. I sensori iperspettrali, al contrario, riescono a rilevare numerosi intervalli di lunghezze d'onda molto stretti e ravvicinati tra loro, quasi a realizzare l'analisi di tutto lo spettro elettromagnetico.
- **Risoluzione geometrica.** La risoluzione geometrica è data dall'impronta a terra di un singolo pixel e dipende quindi dall'*Instantaneous Field Of View* (IFOV), cioè dall'angolo di campo istantaneo definito per costruzione del sensore stesso. Maggiore è la risoluzione geometrica, più facile sarà il riconoscimento visivo degli oggetti a terra.
- **Risoluzione radiometrica.** Per risoluzione radiometrica ci si riferisce alla sensibilità del rivelatore di un certo sensore nel percepire e codificare in segnale le differenze di flusso radiante riflesso o emesso dalle superfici analizzate.
- **Risoluzione temporale.** Per risoluzione temporale si intende il periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area. Una elevata risoluzione temporale consente di ripetere le osservazioni a cadenze temporali costanti o programmabili di una stessa area in tempi differenti. Un altro vantaggio è la visione sinottica del territorio. Questa caratteristica, scarsa per i fotogrammi aerei che ricoprono piccole zone, al contrario è assai elevata nelle immagini satellitari in grado di registrare una porzione del territorio molto vasta e in tal modo rendendo possibile una rappresentazione di insieme dell'area di studio.

## 2.2.2 *Trattamento ed elaborazione delle immagini*

L'uso dei sensori passivi permette di estrarre informazioni circa l'oggetto che stiamo investigando suddividendo i pixel di una immagine in classi. La sempre maggiore diffusione di sensori multispettrali ha favorito lo sviluppo dei processi automatici di classificazione che mirano a raggruppare i vari pixel di una immagine in classi in base ad opportuni principi di similarità. Ad ogni classe è poi possibile attribuire una etichetta mediante il confronto tra i valori misurati per ogni classe con i valori noti a priori per le diverse tipologie di oggetti indagati. Per ottenere questo risultato, i dati multispettrali vengono rappresentati in uno spazio a  $k$  dimensioni, dove  $k$  indica il numero delle bande spettrali utilizzate dal sensore. In questo spazio, ogni pixel di un'immagine individua un punto le cui coordinate sono date dai valori delle misure spettrali del pixel in ogni banda. Un pixel è quindi rappresentabile come un vettore  $x$  a  $k$  componenti spettrali indicato con  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_k\}$ .

La possibilità di utilizzare diverse combinazioni di bande spettrali permette di ottenere immagini in cui gli elementi territoriali di interesse risultano maggiormente evidenti. Le procedure di elaborazione ed analisi delle immagini possono essere raggruppate in procedure di *pre-processing*, *image enhancement*, *image transformation* e di *image classification*.

### 2.2.2.1 *Pre-processing*

Queste procedure comprendono tutte quelle elaborazioni a cui vengono sottoposti i dati prima che inizi la fase di interpretazione ed analisi, ossia le procedure di correzione radiometrica e geometrica. Le correzioni radiometriche si applicano per correggere le irregolarità dovute alla ricezione del segnale quali calibrazione del sensore o anomalie di scansione, o effetti legati alle modalità geometriche delle riprese. Queste correzioni possono essere necessarie anche per eliminare gli effetti dell'assorbimento o alla diffusione della radiazione solare da parte dell'atmosfera.

In questa fase di pre-elaborazione, i valori in DN vengono convertiti e calibrati per ottenere valori espressi come grandezze fisiche, quali radianza o riflettanza, al fine di poter confrontare immagini riprese in periodi diversi o con sensori diversi.

Le correzioni geometriche includono sia le correzioni che devono essere apportate alle immagini per eliminare le distorsioni dovute alle variazioni nella geometria del sistema di ripresa dei dati (variazione degli angoli Sole-Terra-sensore), sia le correzioni applicate per riportare le coordinate delle immagini (riga e colonna) alle coordinate geografiche (latitudine e longitudine).

Per effettuare questo ultimo tipo di correzioni è necessario identificare le coordinate immagine (riga, colonna) di alcuni punti, definiti *ground control points*, ed associarle con le coordinate geografiche degli stessi punti misurati in campo o derivate da una carta geografica. Le coppie di coordinate vengono poi elaborate per definire una specifica equazione di trasformazione. Le procedure statistiche utilizzate per effettuare queste trasformazioni (ricampionamento) sono principalmente *nearest neighbour*, interpolazione bilineare, e convoluzione cubica.

Il ricampionamento *nearest neighbour* attribuisce al pixel nell'immagine corretta, il valore del pixel più vicino nell'immagine originale. Questo metodo non altera il valore dei pixel ma, in alcuni casi, il valore di un pixel può essere duplicato o andare perduto.

Il ricampionamento mediante *interpolazione bilineare* calcola una media pesata dei valori dei 4 pixel dell'immagine originale più vicini alla nuova collocazione del pixel. Il calcolo della media altera il valore del pixel e crea valori di DN completamente nuovi. Questo metodo non è adatto se le immagini devono essere successivamente classificate in funzione dei valori di risposta spettrale; in questa eventualità le correzioni devono essere applicate dopo aver classificato le immagini.

Il ricampionamento mediante *convoluzione cubica* calcola, invece, una media pesata dei 16 pixel dell'immagine originale più vicini. Anche in questo modo si ha un'alterazione dei valori originari pertanto è preferibile apportare queste correzioni dopo aver elaborato le immagini.

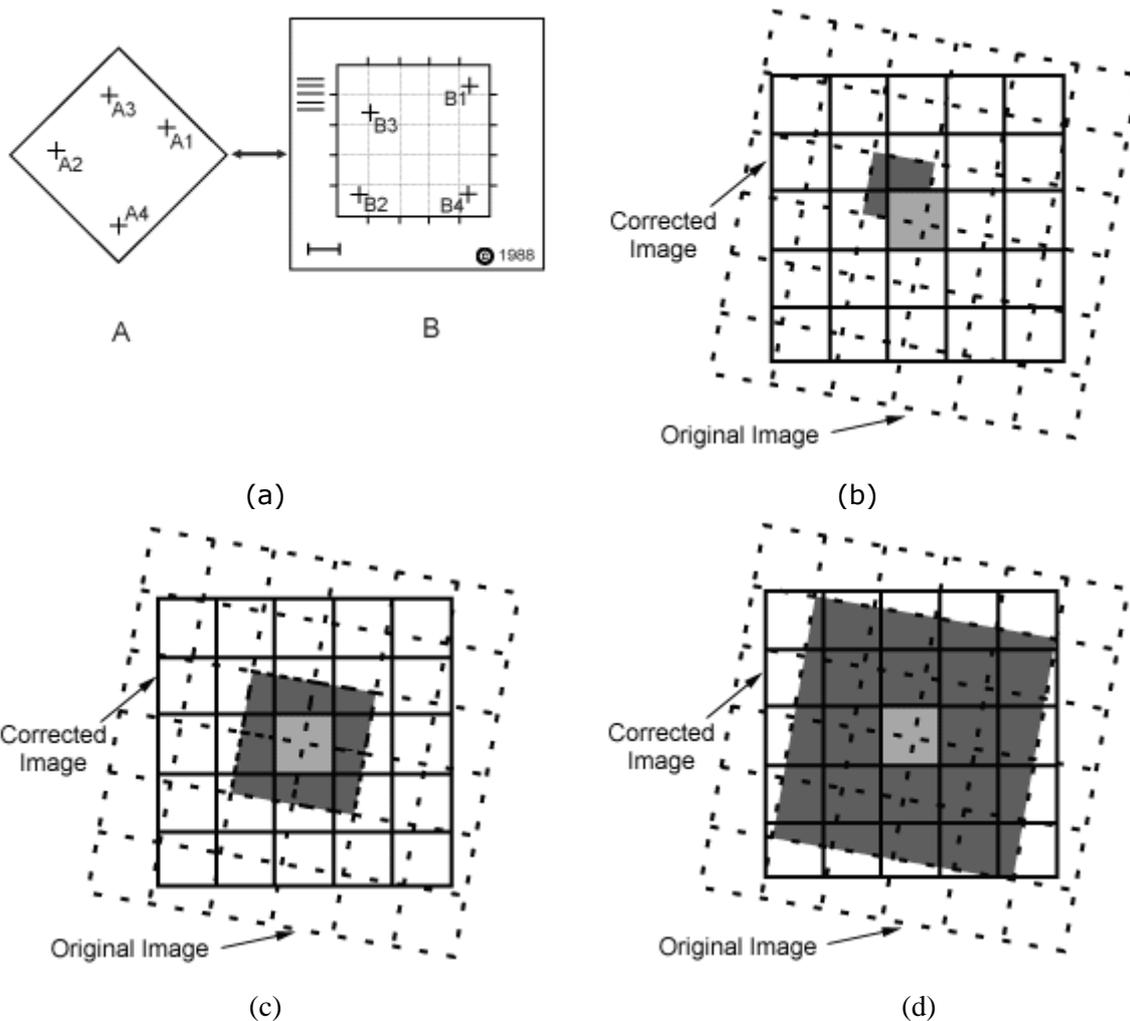


Figura 2.2-5: Correzione geometrica dell'immagine (a); Ricampionamento nearest neighbour (b) Ricampionamento interpolazione bilineare (c); Ricampionamento convoluzione cubica (d).

### 2.2.2.2 Image Enhancement

Le procedure di enfattizzazione delle immagini si applicano principalmente per facilitare l'interpretazione visuale e sono essenzialmente di due tipi: di miglioramento del contrasto e di filtraggio. Le procedure di miglioramento del contrasto (*contrast stretch*) si utilizzano per migliorare il contrasto tra gli elementi territoriali presenti nelle immagini; le procedure di filtraggio, invece, permettono di aumentare, o eliminare, specifici andamenti lineari.

Le tecniche di *contrast stretch* prevedono, infatti, che i valori numerici realmente presenti nell'immagine vengano ridistribuiti su tutto l'intervallo disponibile, aumentando così il contrasto tra gli elementi presenti nell'immagine. Il primo passo per la corretta applicazione delle procedure di *stretch* è, quindi, realizzare un istogramma con i valori di DN dell'immagine. I valori dei DN sono riportati sull'asse delle ascisse e la frequenza di ogni valore sull'ordinata. Per applicare un *miglioramento* lineare del contrasto è sufficiente individuare sull'istogramma il valore di DN minimo e massimo ed assegnare poi al valore minimo di DN il valore 0 e al massimo il valore 255, ridistribuendo linearmente i restanti valori di DN. In questo modo le porzioni dell'immagine cui competono bassi valori di DN appariranno molto più scure e quelle con i valori alti molto più chiare; l'aumento di contrasto favorirà, pertanto, la definizione degli elementi dell'immagine (figura 2.2-6a).

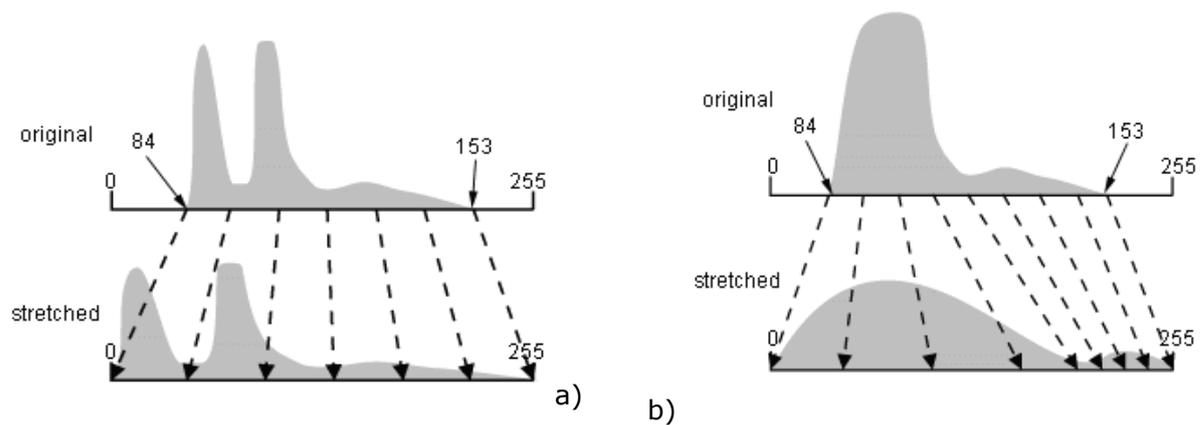


Figura 2.2-6 Contrast stretch lineare (a) ed equalizzazione del contrasto (b).

In alcuni casi è opportuno invece applicare funzioni non lineari di ridistribuzione dei valori di DN. Tra queste procedure è particolarmente diffusa la tecnica di equalizzazione dell'istogramma (*histogram equalized stretch*) che assegna un maggior numero di valori ai valori di DN più ricorrenti nell'istogramma e pertanto i dettagli delle aree ad essi corrispondenti vengono maggiormente enfatizzati rispetto a quelli delle aree cui corrispondono valori di DN meno frequenti (figura 2.2-6b).

Le operazioni di filtraggio spaziale (*Spatial filtering*) rappresentano un insieme di procedure che permettono di enfatizzare o eliminare specifici elementi delle immagini, basandosi sulla loro frequenza spaziale. La definizione di frequenza spaziale è legata al concetto di tessitura dell'immagine, cioè alla frequenza delle variazioni di tono che si riscontrano nell'immagine stessa. Una comune procedura di filtraggio prevede lo spostamento di una finestra di dimensioni limitate attraverso l'immagine e l'applicazione di un algoritmo che, utilizzando i valori dei pixel contenuti nella finestra, consente di assegnare un nuovo valore di DN al pixel centrale. Le specifiche dell'algoritmo utilizzato consentono di enfatizzare o sopprimere le caratteristiche originali dell'immagine.

Un filtro di tipo passa basso permette di enfatizzare le aree omogenee di grandi dimensioni che presentano toni simili e riduce i dettagli più minuti dell'immagine, rendendo più liscio il suo aspetto. I filtri passa alto, invece, sono utilizzati per enfatizzare i dettagli più minuti dell'immagine, ed infine, i filtri direzionali rendono più evidenti le strutture lineari, come strade, bordi dei campi o strutture geologiche quali le faglie.

### 2.2.2.3 Image Transformation

Vengono definite procedure di *Image Transformation* quelle procedure che coinvolgono l'elaborazione di diverse immagini, siano esse bande di un'unica immagine multispettrale o immagini di una stessa area acquisite in tempi diversi (dati multitemporali). In ogni caso queste procedure, partendo dai dati originari, generano nuove immagini che mettono meglio in evidenza particolari caratteristiche o proprietà fisiche delle immagini.

I cambiamenti avvenuti nel territorio nel corso degli anni possono essere identificati sulle immagini telerilevate tramite le procedure di "sottrazione" delle immagini; per evidenziare, invece, le sottili variazioni nelle risposte spettrali delle diverse superfici presenti nell'immagine possono essere utilizzate procedure che calcolano i rapporti tra bande (*spectral rationing*).

Esistono inoltre tecniche di trasformazione basate su procedure statistiche multivariate che permettono di ridurre la ridondanza dei dati e valutare il grado di correlazione tra le diverse bande. Una delle metodologie più utilizzate è l'analisi in componenti principali che permette di ridurre le dimensioni dei dati utilizzati, ad esempio il numero di bande, comprimendo le informazioni in un numero minore di bande.

### 2.2.2.4 Image Classification

L'analisi e l'elaborazione delle immagini consiste nell'analizzare i valori di riflettanza/radianza alle diverse lunghezze d'onda al fine di distinguere i materiali superficiali presenti sull'immagine. Per agevolare il riconoscimento dei diversi tipi di superfici, l'ampiezza e i limiti degli intervalli spettrali in cui vengono registrate le immagini multispettrali sono definiti in funzione delle proprietà radiometriche delle superfici che si intende monitorare.

La possibilità di elaborare statisticamente i DN di cui è costituita un'immagine rende possibile classificare le immagini ossia associare ad ogni pixel dell'immagine una tipologia di copertura in base al confronto tra i valori digitali dei pixel stessi e le caratteristiche di riflettività-riflettanza di superfici di riferimento. Si ottiene così una mappa digitale riproducibile in diversi modi che può essere incorporata nei sistemi informativi territoriali.

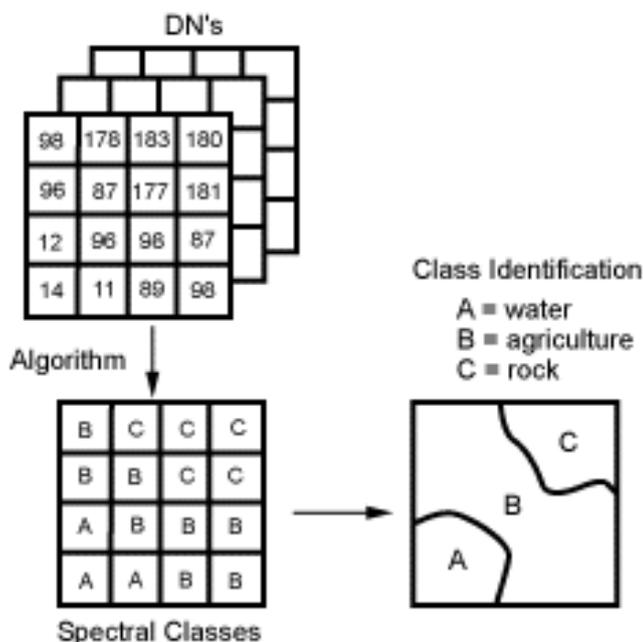


Figura 2.2-7 Classificazione e realizzazione di una carta tematica

Esistono diverse procedure di classificazione che permettono di individuare nell'immagine multi o iperspettrale le classi di uso/copertura del suolo con caratteristiche spettrali omogenee. I classificatori possono essere di tipo *parametrico*, cioè basati su modelli di distribuzione definiti da parametri geometrico-statistici (distanza, media deviazione standard) e *non-parametrico*, cioè basati su modelli i cui parametri interni non hanno una valenza geometrico-statistica.

La maggior parte degli algoritmi di classificazione delle immagini definiscono in modo rigido (*hard*) la classe di appartenenza dei pixel, senza tener conto che il valore radiometrico di ogni pixel rappresenta un valore medio di radianza proveniente da due o più tipologie di superficie. Esistono poi dei classificatori, definiti *soft*, che hanno la capacità di classificare le informazioni radiometriche dei pixel tramite una funzione complessa che tiene conto delle proporzioni dei materiali superficiali che contribuiscono alla risposta radiometrica complessiva del pixel. Questo approccio consente pertanto una maggiore accuratezza nella classificazione. Mentre una classificazione di tipo *hard* assegna ogni pixel dell'immagine ad una unica classe, una classificazione *soft* è basata sul concetto di grado di appartenenza (o probabilità di assegnazione) dei pixel alle diverse classi. Ad ogni pixel vengono cioè assegnati tanti gradi di appartenenza quante sono le classi. Per ogni classe viene generata un'immagine che definisce per ogni cella il grado di appartenenza alla classe di riferimento. In tal modo, verificando per lo stesso pixel i diversi gradi di appartenenza, si possono fare delle ipotesi e classificare anche i pixel misti.

Gli algoritmi di classificazione a loro volta si suddividono in *unsupervised*, senza intervento dell'analista e in *supervised*. I classificatori *un-supervised* prescindono dalla conoscenza della realtà al suolo: i dati vengono analizzati e raggruppati in classi (*cluster*) solo in base ai valori di radianza dei pixel (firme spettrali) e l'operatore definisce unicamente il numero delle classi da riconoscere. La classificazione *supervised*, invece, si basa sulla conoscenza da parte dell'operatore di alcune aree campione, rappresentative di classi di superfici, note e ben localizzate sull'immagine, che vengono utilizzate come *training set*, per classificare tutta la scena. Tali procedure prevedono che i valori spettrali dei pixel dell'immagine siano confrontati con quelli delle diverse classi in modo da essere assegnati alla classe ritenuta più simile. Gli algoritmi con cui vengono effettuati i confronti sono compresi tra i metodi di classificazione parametrici precedentemente descritti.

Per le immagini multispettrali i metodi di classificazione più utilizzati sono: il metodo del *Parallelepipedo*, della *Minima Distanza* e della *Massima Verosimiglianza*. Tutti questi metodi prendono in considerazione i parametri statistici ricavabili dai valori di DN dei pixel che ricadono nelle aree campione relative alle singole classi.

Con il metodo del *Parallelepipedo*, nello spazio a  $n$  dimensioni (dove  $n$  equivale al numero delle bande) per ogni classe, vengono definiti degli spazi (parallelepipedi nello spazio tridimensionale) intorno al valore di DN medio dell'area campione; tutti i pixel il cui valore ricade nello spazio così definito vengono poi attribuiti a quella specifica classe.

Con il metodo della *Minima Distanza*, definito il valore medio corrispondente alle singole bande spettrali per ogni area campione, viene calcolata la distanza euclidea (o di Mahalanobis) tra i singoli pixel dell'immagine e i valori medi di DN delle diverse classi ed ogni pixel viene assegnato alla classe più vicina. È possibile inoltre stabilire una distanza massima (valore di soglia) oltre il quale il pixel viene considerato troppo lontano per appartenere ad una classe e pertanto rimane "non classificato".

Il Metodo di *Massima Verosimiglianza* presuppone che la distribuzione dei valori di DN dei pixel che appartengono ad una stessa classe sia una distribuzione Gaussiana. I valori di DN dell'area campione vengono pertanto utilizzati per definire i parametri di questa distribuzione e viene valutata la probabilità dei pixel di appartenere o meno alla classe. All'interno dello spazio tridimensionale le classi assumono la forma di ellissoidi (non più parallelepipedi) con contorni equi-probabili.

Per poter aumentare le potenzialità di analisi del territorio è possibile integrare dati di tipologia e provenienza diversa. Le continue innovazioni nel campo delle tecnologie spaziali hanno reso disponibili una vasta gamma di immagini telerilevate, pertanto è attualmente possibile integrare dati multi-temporali, multi-sensore e dati con diversa risoluzione spaziale. I dati multitemporali, ossia ripresi in stagioni e/o anni diversi, vengono utilizzati con successo per il monitoraggio delle variazioni di uso del suolo e, se applicati ai fini del monitoraggio della rete viaria e delle variazioni spazio temporali dei conglomerati bituminosi in genere, possono fornire un valido supporto su diversi fronti. L'integrazione con i dati provenienti da fonti diverse raggiunge la sua massima potenzialità con l'utilizzo dei Sistemi Informativi Territoriali.

## 2.3 CARATTERISTICHE SPETTRALI DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI

Le pavimentazioni stradali sono costituite da conglomerati bituminosi i quali presentano valori di riflettanza spettrale complessivamente molto bassi. Nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350nm e 2500nm, la risposta radiometrica degli asfalti, misurata in campo e in laboratorio, è dominata dalla presenza del bitume, il quale assorbe quasi totalmente la radiazione solare incidente, mentre la natura degli inerti e le loro dimensioni incidono solo marginalmente sull'andamento spettrale [Herold et al., 2004, Mei et al., 2012]. Una superficie asfaltata può essere modificata dall'azione meccanica dovuta sia all'azione meccanica del traffico veicolare sia dal deterioramento naturale del bitume. In linea generale il deterioramento e l'invecchiamento degli asfalti si riflette sull'andamento spettrale, infatti, alle lunghezze d'onda del visibile, gli asfalti appena deposti presentano una risposta spettrale più bassa di quelli deposti già da qualche anno a causa della maggiore percentuale di bitume presente sulla superficie.

### 2.3.1 *Pavimentazioni recenti*

Nelle pavimentazioni recenti, la riflettanza spettrale è generalmente molto bassa e gli idrocarburi che li costituiscono determinano i processi di assorbimento. Il minimo di riflettanza si osserva in prossimità dei 350nm con un trend di aumento verso lunghezze d'onda maggiori. I composti idrocarburici mostrano transizioni elettroniche nella regione dell'ultravioletto e visibile causando questo forte assorbimento.

In questa regione spettrale, a causa della natura complessa di idrocarburi di bitume, l'assorbimento è molto importante e non sono osservabili bande caratteristiche. La diminuzione della sovrapposizione degli effetti (processi elettronici e presenza del bitume) che causano l'elevato assorbimento della radiazione incidente, porta all'aumentare la riflessione di tali superfici verso lunghezze d'onda maggiori, analogamente a quanto si può osservare nel caso delle firme spettrali di carbone e scisti bituminosi (Cloutis, 1989; Hoerig et al, 2001).

Per lunghezze d'onda maggiori ed in particolare nella regione dello SWIR, appaiono alcuni assorbimenti caratteristici. Tuttavia, in tale intervallo di lunghezze d'onda, l'effetto combinato delle diverse componenti organiche (tra cui i gruppi  $\text{CH}_3$  e  $\text{CH}_2$ , il gruppo carbonilico  $\text{CO}$  / carbossilico  $\text{COOH}$  e i composti aromatici), che indurrebbero picchi di assorbimento importanti, è soppresso dai complessivi bassi valori di riflettanza dei conglomerati bituminosi ad eccezione del più elevato picco posto nella regione dei 1700nm e tra i 2200 nm e 2500nm (Cloutis, 1989; Kuehn et al., 2004). Nello specifico si tratta dei picchi a 1720nm, 1750nm e 2200nm-2500nm. Quest'ultima regione in particolare, è possibile osservare un doppietto di assorbimento molto ben sviluppato a 2310nm e 2350nm in cui il primo a 2310nm è solitamente il più sviluppato.

### 2.3.2 *Pavimentazioni deteriorate*

Nel caso di un asfalto vecchio questo può essere sottoposto a fenomeni di *aging* e di deterioramento meccanico. Il deterioramento naturale del bitume è causato principalmente dalla reazione con l'ossigeno presente in atmosfera, dall'azione fotochimica dovuta alla radiazione solare e dal riscaldamento superficiale. A seguito di questi processi si manifesta la perdita dei composti oleosi con conseguente variazione nella composizione dello strato superficiale e redistribuzione degli inerti [Bell, 1989]. La perdita di composti oleosi è un processo relativamente veloce rispetto ai cambiamenti che avvengono a seguito della composizione dovuta a fenomeni di ossidazione e di variazioni strutturali dovute a redistribuzione degli inerti. Tramite tali processi i conglomerati bituminosi sono soggetti ad una riduzione delle loro viscosità e più propensi a subire danni strutturali come l'insorgere di fenomeni di fessurazione.

Gli effetti che tali ammaloramenti hanno sull'andamento spettrale rappresenta un insieme di fattori che portano alla rimozione del bitume superficiale e all'affiorare degli inerti. La scomparsa dei composti idrocarburici causano quindi un incremento dei valori di riflettanza su tutto il range spettrale considerato (350-2500nm). Tale differenza è maggiore nelle regioni del NIR e dello SWIR con un incremento di più del 10% in riflettanza. Il processo di ossidazione e l'esposizione della componente litica caratterizza la comparsa dei picchi di assorbimento degli ossidi di ferro alle lunghezze d'onda di 520, 670 e 870nm. Gli assorbimenti tipici dovuti alla presenza degli idrocarburi a 1700nm e 2300nm svaniscono quindi negli asfalti non recenti e sono rimpiazzati dall'assorbimento causato dagli aggregati: la perdita dei composti oleosi determina pertanto la scomparsa dei picchi caratteristici degli idrocarburi. Vi è inoltre un significativo cambio di pendenza durante la transizione dell'assorbimento indotto dagli idrocarburi a quella indotta dalla componente litica con un aumento di pendenza tra 2120nm e 2200nm (dove l'assorbimento a 2200nm è il più evidente) dovuto ai silicati. Tuttavia nell'intervallo 2250-2300nm la pendenza è maggiore per le pavimentazioni nuove [Noronha

et al. 2002, Herold et al. 2005, 2008]. L'assorbimento degli idrocarburi è particolarmente evidente a 1750nm e dopo i 2100nm con un significativo doppietto a 2310nm e a 2350nm [Cloutis, 1989].

### 2.3.3 Correlazioni tra dati spettrali e ammaloramenti

Un interessante studio è stato effettuato nel lavoro di Herold et al. 2008 nel quale è stata posta particolare attenzione alla possibile correlazione tra le caratteristiche di differenti tipi di pavimentazioni stradali (sia nuove che deteriorate) e la loro rispettiva risposta radiometrica. I dati di ammaloramento sono stati codificati in termini di *Pavement Condition Index* (PCI) e *Structure Index* (SI) i quali sono stati calcolati con metodi ufficialmente riconosciuti. Da tale studio viene evidenziato come, sia nel caso di un asfalto nuovo che di uno vecchio, questi abbiano una simile efficacia nel far registrare le loro caratteristiche sull'andamento della firma spettrale. L'esempio che viene riportato è tra una pavimentazione con età compresa tra 1 e 3 anni, che presenta generalmente valori di PCI compresi tra 100 e 86 e un SI fisso a 100, e di una strada di età compresa tra i 3 e i 10 anni la quale presenta invece valori di PCI più bassi compresi tra 86 e 32 e un SI che scende da 100 a 63. Pertanto il *foot print* radiometrico risulta essere più marcato nelle prime fasi di alterazione mentre gli effetti a lungo termine influiscono di meno sull'andamento della firma. La differenza spettrale tra i valori radiometrici estratti alle lunghezze d'onda 830nm e 490nm, ha consentito di mettere in relazione il *Pavement Condition Index* (PCI) e il dato spettrale pur ottenendo valori di accuratezza molto bassi ( $R^2 = 0.63$ ) (Herold et al. 2008).

Tra le tipologie di ammaloramento più comuni, che al tempo stesso è un indicatore della qualità di una pavimentazione, vi è il *cracking*, o fessurazione. Le fessurazioni, ed in particolare quelle di tipo a coccodrillo, indicano difetti strutturali dovuti all'azione del traffico veicolare. Tali fessurazioni, come già visto, possono facilitare l'infiltrazione di acqua, aumentare la rugosità superficiale e può degenerare nella formazione di buche. L'aumento di rugosità superficiale e la presenza di ombre generate da esse causa delle differenze in riflettanza dell'ordine del 7-8% nel NIR e SWIR tra pavimentazioni recenti e quelle con alta severità di fessurazione. La forma concava nella regione del VNIR è più marcata nelle superfici non fessurate mentre le pavimentazioni fessurate presentano nelle regioni 1700nm e 2300nm un più marcato assorbimento dovuto alla presenza di idrocarburi. L'aumento della presenza di idrocarburi in pavimentazioni soggette a fessurazione è indotto dal fatto che tale processo espone all'atmosfera gli strati più bassi che hanno una composizione più prossima a quella originale di fabbricazione; tale processo si manifesta quindi con una più marcata presenza di picchi di assorbimento legati a idrocarburi.

Pertanto, i fenomeni di *aging* causano l'aumento della luminosità di tali superfici e la diminuzione dell'assorbimento legato alla presenza di idrocarburi, mentre i danni strutturali causano una riduzione dei valori di riflettanza (minore luminosità) ed un aumento della componente idrocarburea (Figura 2.2-8).

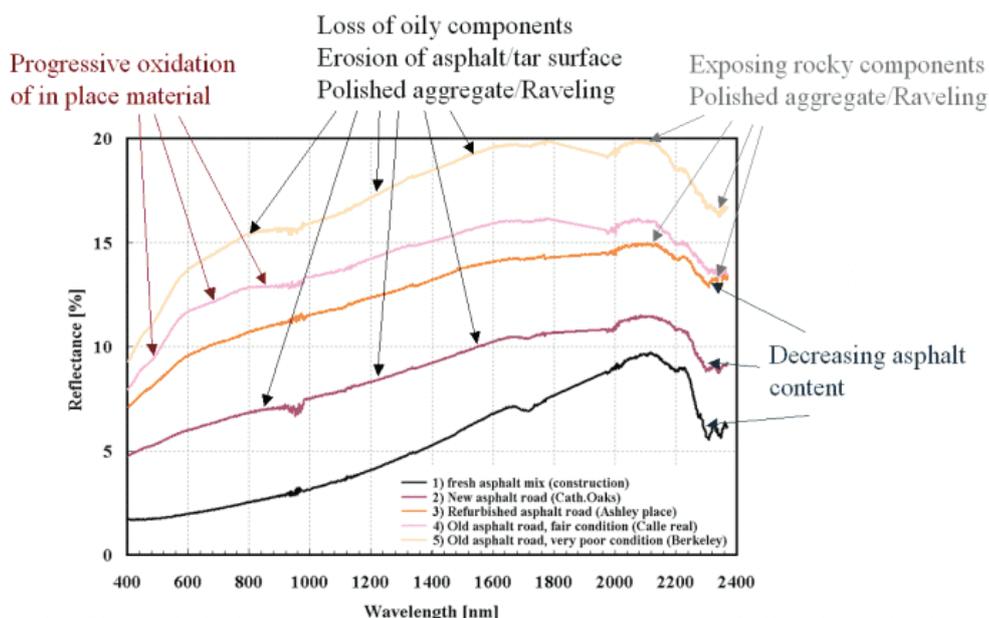


Figura 2.2-8 Alcune firme spettrali di asfalti raffiguranti diverse fasi di vita di una pavimentazione (tratto da National Consortia on Remote Sensing in Transportation al sito <http://ncrst.digitalgeographic.com/research/>)

E' stato notato, analogamente a quanto rilevato precedentemente nel caso del PCI e SI, che le variazioni in riflettanza ed assorbimento da idrocarburi sono meno forti nel caso di pavimentazioni affette da fessurazione rispetto alle nuove pavimentazioni. Ciò denota effettivamente la possibilità di incorrere in alcune limitazioni applicative sull'utilizzo di sistemi iperspettrali per la stima delle condizioni delle strade.

Un'altra tipologia di ammaloramento è data dalla disgregazione di inerti (*raveling*) il quale genera una dislocazione degli aggregati all'interno del conglomerato bituminoso attraverso la riduzione o la perdita del legame tra inerte e bitume. Il fenomeno di *raveling* espone alla superficie una maggiore quantità di inerti i quali possono affiorare anche in forma disgregata. Questo processo generalmente fa aumentare la luminosità della superficie dovuto un aumento della componente minerale e un meno marcato effetto dell'assorbimento legato agli idrocarburi. La componente minerale è ben evidente e ben marcata nelle componenti di ossidazione del ferro presenti come già visto a 520, 670 e 870 nm nonché a 2320nm dove influisce la componente carbonatica.

Le pavimentazioni stradali comprendono quindi un'innumerabile varietà di combinazioni, ivi comprese la presenza di macchie d'olio, la presenza di crescita di vegetazione nelle fessure, la gommatura di alcuni tratti ed altro. Tutto ciò influisce sulla possibilità di attribuire con esattezza una determinata risposta spettrale ad un tipo di pavimentazione, sia essa ammalorata oppure no. Dalle ricerche emerse fino ad ora è evidente la necessità di ripartire da una analisi sistematica di ogni costituente che compone un conglomerato bituminoso effettuando analisi dettagliate di laboratorio, di campo e infine di *remote sensing*. Tale obiettivo viene posto in questa tesi la cui struttura è descritta nel Capitolo 3.

### 3. STRUTTURA PROGETTO DI RICERCA

Il presente progetto di ricerca propone un approccio multidisciplinare per lo studio dei conglomerati bituminosi e del loro grado di deterioramento. Tale studio unisce indagini classiche di laboratorio a tecniche di misura radiometriche nel campo del visibile ed dell'infrarosso. Le proprietà ottiche dei materiali indagati, quali gli inerti usati per la costituzione dei conglomerati bituminosi, sono state analizzate effettuando misure ottiche mediante l'utilizzo di diverse piattaforme sensoristiche. L'analisi radiometrica ha consentito di individuare indici in grado di correlare i dati ottici alle diverse tipologie di conglomerati bituminosi. L'applicazione di tali indici ad immagini satellitari ad alta risoluzione ha permesso quindi di determinare lo stato di vetustà di ampie porzioni di reticolo stradale.

Le attività di ricerca sono state suddivise in 3 Step fondamentali i quali raggruppano rispettivamente attività di laboratorio, attività di campo e analisi di immagini telerilevate.

Lo **Step 1** raggruppa principalmente le attività di laboratorio attraverso la realizzazione di un numero di significativo campioni e la predisposizione di una camera oscura per effettuare indagini spettroradiometriche. In questa prima fase del progetto sono state investigate le relazioni esistenti tra firme spettrali e caratteristiche fisico-chimiche degli aggregati contenuti nelle miscele utilizzate per la realizzazione di provini di conglomerati bituminosi. Sono state altresì analizzate le relazioni tra firme spettrali e percentuali di bitume utilizzate per il confezionamento di provini.

Le prove di laboratorio hanno inoltre previsto la realizzazione di prove di affinità del bitume secondo la Norma UNI EN 12697-11. I materiali risultanti dalle singole prove sono stati analizzati con diverse metodologie. Le indagini sono state eseguite con uno spettroradiometro (Fiedspec 4 A.S.D.), una fotocamera digitale reflex (NIKON modello D7000) ed un sensore iperspettrale da banco ad immagini (VIS-NIR *Specim Inspector spectrometer*). L'insieme di questi dati è stato utilizzato per l'identificazione di una metodica non soggettiva utile alla quantificazione della porzione di bitume asportata durante le prove.

Lo **Step 2** ha previsto l'analisi di dati ottici acquisiti in campo con la finalità di studiare le correlazioni tra dato radiometrico e percentuale di ricoprimento superficiale degli aggregati da parte del bitume e conseguentemente di riconoscere e differenziare le pavimentazioni ammalorate. Ciò ha consentito di individuare l'intervallo di lunghezze d'onda che meglio descrive le caratteristiche dei conglomerati bituminosi. E' stata infine effettuata una sperimentazione tramite l'applicazione di una piattaforma multispettrale ottica, costituita da un obiettivo RGB digitale e una camera multispettrale (Tetracam), montata un *rover* terrestre a pilotaggio remoto (RAAS) per la determinazione dell'ammaloramento delle pavimentazioni in un'area test.

Infine, durante lo **Step3** sono stati applicati gli indici spettrali ai dati telerilevati in considerazione dei risultati ottenuti negli Step precedenti al fine di valutare lo stato di usura delle pavimentazioni stradali e la rimozione superficiale del bitume. E' stata a tal fine presa in considerazione una immagine satellitare di tipo multispettrale ad alta risoluzione WORLDVIEW-3 ed una immagine ripresa dal sensore aviotrasportato iperspettrale MIVIS.

## 4. Step1 - SPERIMENTAZIONE DI LABORATORIO

Le indagini radiometriche, attraverso l'acquisizione delle firme spettrali dei materiali, offrono la possibilità di ottenere un gran numero di informazioni. Tali misure, non distruttive e realizzabili in continuo, consentono di esprimere graficamente l'andamento spettrale della radiazione riflessa da una superficie, andamento correlato alle caratteristiche chimico-fisiche della superficie stessa. L'analisi delle firme spettrali consente quindi di discriminare le diverse tipologie di superfici naturali o antropiche, per tale motivo tali indagini sono utilizzate in ambiti multidisciplinari ed in particolar modo in ambito del *Remote Sensing* consentendo di identificare nelle immagini superfici di natura diversa.

Come evidenziato nella parte introduttiva di questa tesi, vi è l'evidenza di come alcune proprietà dei conglomerati bituminosi, quali la composizione dei materiali e l'usura, influiscano sulla risposta spettrale registrata dai sensori radiometrici. Tuttavia è ancora una questione aperta la possibilità di riconoscere e quantificare le relazioni che intercorrono tra valori radiometrici e specifiche caratteristiche dei conglomerati bituminosi (es. il tipo di ammaloramento o la quantità di bitume che ricopre gli aggregati) e/o la loro composizione (es. il chimismo e processi di alterazione complessi).

La prima parte delle attività di dottorato è stata focalizzata pertanto, analogamente a quanto già proposto con altre tecnologie quali il laser scanning (Bitelli et al. 2012), ad individuare un metodo di indagine che permettesse di superare alcuni degli aspetti critici legati ai rilievi in campo e da remoto, affrontando lo studio a livello di laboratorio. La sperimentazione di laboratorio, eseguita in condizioni ambientali controllate e della quale si dà conto in questo capitolo, è stata inizialmente orientata alla caratterizzazione radiometrica dei materiali inerti tal quali nonché di diverse miscele di conglomerato bituminoso utilizzate per lo strato di usura. La risposta radiometrica dei conglomerati bituminosi, nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350nm e 2500 nm, è dominata dalla presenza del bitume il quale assorbe quasi totalmente la radiazione solare incidente, mentre la natura degli inerti e le loro dimensioni incidono solo marginalmente sull'andamento spettrale [Noronha et al.2002; Salvatori et al.2009, Mei et al. 2011a]. I conglomerati bituminosi presentano quindi valori di riflettanza spettrale che complessivamente tendono ad aumentare con l'età e la degradazione della superficie per perdita di bitume. Inoltre, nei conglomerati bituminosi "vecchi", è presente un significativo cambio di pendenza nella firma spettrale sia nell'intervallo visibile-infrarosso vicino (450nm – 830nm) che tra 2100-2200 nm e tra 2250-2300 nm dovuto rispettivamente all'influenza dei minerali silicatici "affioranti" e degli idrocarburi [Levinson et al. 2007; Herold et al. 2008].

In questa prima fase di analisi è stata, quindi, presa in considerazione la possibilità di distinguere le diverse tipologie di inerti utilizzati nello strato di usura, di stimare la percentuale di bitume utilizzato per il confezionamento di miscele di conglomerato bituminoso, di distinguere tra strato di usura e binder, di valutare la percentuale di bitume superficiale asportato mediante prova di affinità del bitume. I risultati conseguiti hanno rappresentato la base per il proseguimento delle attività sperimentali realizzate sia in campo che tramite l'analisi di immagini acquisite da piattaforma aerea e satellitare su tratti sperimentali.

## 4.1 PROVE SU INERTI e PROVINI

In termini di sicurezza stradale, le prestazioni delle pavimentazioni sono condizionate dalla progettazione delle miscele bituminose (*Mix-Design*) e dal comportamento degli stessi alla degradazione meccanica, indotta sia dal traffico veicolare, sia dagli agenti atmosferici che causano una costante variazione delle caratteristiche meccaniche. Tali variazioni comportano l'insorgere di fenomeni di degrado superficiale quali fessurazioni, sgranamenti o risalita di bitume. L'insorgere di tali ammaloramenti dipende inoltre sia dalle caratteristiche fisico-chimiche degli aggregati lapidei, che influiscono su fenomeni di abrasione o di frammentazione, sia dalle diverse percentuali di classi granulometriche adottate nella composizione delle miscele.

Per tale motivo in questo capitolo sono state effettuate una serie di analisi spettrometriche di laboratorio in condizioni ambientali controllate per valutare la possibilità di effettuare una distinzione di aggregati lapidei basaltici utilizzati nello strato di usura differenziandoli in funzione della porosità, della granulometria e del contenuto in acqua, sia separatamente che in forma miscelata. E' stata poi valutata la possibilità di distinguere, utilizzando sempre gli stessi inerti, le miscele confezionate per lo strato di usura da quelle confezionate per il binder. Infine, le diverse miscele, in forma sciolta e costipata, sono state utilizzate per stabilire le relazioni tra le firme spettrali e le diverse percentuali di bitume utilizzato per il confezionamento di provini. Per fare ciò sono stati utilizzati 3 diversi dataset per lo studio degli aggregati e delle miscele, per la distinzione tra strato di usura e binder e per l'analisi del cluster spettrale.

### 4.1.1 Dati e preparativa campioni

#### 4.1.1.1 Dataset 1 – AGGREGATI E MISCELE

Per questo studio è stato utilizzato un aggregato leggero di natura basaltica particolarmente indicato per il confezionamento di conglomerati bituminosi per strati di usura in virtù del basso valore della massa volumica e dell'alta resistenza alla frammentazione. Tali aggregati, distinti in porosi e non porosi, sono stati ottenuti per frantumazione di roccia basaltica proveniente dalla Cava di Montalto di Castro, nel comune di Montalto di Castro (VT), e sono classificabili da un punto di vista petrografico come *tefrite leucititica*. La roccia in posto si presenta di colore grigio scuro a frattura concoide e sono presenti vacuoli e cavità di origine sferica dovute alla porosità primaria. La roccia basaltica è costituita da plagioclasti e pirosseni con fenocristalli immersi in una pasta di fondo costituita da plagioclasio e da ortopirosseni. Il plagioclasio appare sia zonato che geminato senza segni di alterazione e con ossidi di ferro e titanio; i pirosseni formano agglomerati con i plagioclasti.

Tuttavia tali inerti, sono caratterizzati da proprietà fisiche e di resistenza differenti perché appartenenti a diversi livelli dell'ammasso roccioso. Le differenze fra i due tipi di aggregato consistono in una maggiore porosità ed una minore resistenza alla frammentazione dell'aggregato prelevato nella parte superiore dell'ammasso (più poroso) rispetto a quello prelevato nella parte sottostante (meno poroso). In tabella 4.1-1 vengono mostrate sinteticamente le proprietà degli aggregati mentre in figura 4.1-1 vengono riportati i campioni analizzati tal quali.

Tabella 4.1-1: Caratteristiche degli aggregati

	Graniglia compatta (5-11mm) GRCB	Graniglia compatta (2-6.3mm) GRCA	Sabbia compatta (0-5mm) SAC	Graniglia porosa (5-11mm) GRPB	Graniglia porosa (2-6.3mm) GRPA	Sabbia Porosa (0-5mm) SAP
Massa volumica apparente dei granuli (EN 1097-6[Mg/m <sup>3</sup> ])	2.76	2.78	2.78	2.63	2.64	2.76
Massa volumica dei granuli pre-essiccati (EN 1097-6[Mg/m <sup>3</sup> ])	2.63	2.60	2.57	2.42	2.43	2.40
Massa volumica dei granuli satura (EN 1097-6[Mg/m <sup>3</sup> ])	2.68	2.67	2.65	2.50	2.51	2.53
Assorbimento d'acqua (EN 1097-6[%])	1.9	2.5	3.0	3.3	3.3	5.4
Massa volumica in mucchio (EN 1097-3[Mg/m <sup>3</sup> ])	1.39	1.39	1.41	1.23	1.33	1.41
Coeff. Los Angeles [%] (EN 1097-2)	14			22		
Valore di Levigabilità CLA (EN 1097-8)	49.8			46.4		



Figura 4.1-1: Fotografie degli aggregati utilizzati riportati in tabella con l'aggiunta del filler (FR) derivante dallo stesso materiale.

### **Preparativa delle miscele**

Per la realizzazione di un conglomerato bituminoso si tende generalmente a raggiungere la massima densità impiegando la minor quantità possibile di bitume rispetto agli aggregati ottimizzando la selezione di granuli con dimensioni assortite. Ciò comporta che i granuli a dimensioni inferiori riescano a incunarsi nei vuoti lasciati dai granuli più grandi. Per ottimizzare tale miscelazione gli inerti devono essere oggetto di un proporzionamento dimensionale che avviene tramite la progettazione di una curva granulometrica in grado di variare gradualmente le dimensioni dei granuli fino ad ottenere una miscela chiusa con percentuale di vuoti nota. In tal modo la pavimentazione sarà più stabile nel tempo riducendo l'insorgenza di fenomeni di rifluimento del bitume. Secondo la normativa UNI EN 933-1, l'analisi granulometrica prevede la determinazione mediante vagliatura della distribuzione dimensionale degli aggregati utilizzati. Per tale analisi vengono impiegati dei vagli con dimensioni standardizzate (UNI EN 13043) impilati l'uno sull'altro, in ordine crescente di apertura dal basso verso l'alto. In cima alla batteria dei setacci viene posto il campione e il tutto agitato in modo tale che il materiale vi passi attraverso fino a che ad ogni setaccio, non passi più dello 0,1% della massa trattenuta nel tempo di 1 minuto. Infine ciascuna frazione trattenuta nei setacci viene pesata in modo tale da calcolare per ciascun setaccio la percentuale trattenuta. Al fine di costruire la curva granulometrica dell'aggregato viene calcolato la percentuale di passante ottenuta per differenza a 100 del trattenuto. Gli aggregati utilizzati in questa fase sono stati essiccati in forno e miscelati in diverse proporzioni al fine di ottenere due miscele distinte, una con tefrite leucitica compatta (MIX C) e una con tefrite leucitica porosa (MIX P), rispondenti alle specifiche per strato di usura di ANAS Figura 4.1-2.



Figura 4.1-2: fasi della miscelazione degli aggregati ed essiccazione in forno

Tabella 4.1-2: Analisi granulometrica

<b>MIX C(Agregato compatto)</b>								
<b>Diametro Setacci (mm)</b>	<b>SAC sabbia 0-5</b>	<b>GRCA Graniglia 2-6.3</b>	<b>GRCB Graniglia 5-11</b>	<b>Filler</b>	<b>GRPA Trachite 2-6.3</b>	<b>GRPB Trachite 5.6-11</b>	<b>SAP Trachite 0-4</b>	<b>Passante (%)</b>
100	100	100	100	100	100	100	100	100,0
63	100	100	100	100	100	100	100	100,0
40	100	100	100	100	100	100	100	100,0
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100,0
20	100	100	100	100	100	100	100	100,0
16	100	100	100	100	100	100	100	100,0
14	100	100	100	100	100	100	100	100,0
12,5	100	100	100	100	100	100	100	100,0
10	100	100	98,4	100	100	100	100	99,5
8	100	100	68,8	100	100	100	100	90,6
6,3	100	100	37,4	100	100,0	82,8	100	81,2
4	99,9	75,2	1,8	100	89,1	17,5	99,9	61,8
2	72,6	21,6	0,0	100	4,0	0,2	80,3	35,2
1	32,8	8,3	0,0	100	0,0	0,1	50,1	19,8
0,5	19,5	5,4	0,0	100	0,0	0,1	29,8	15,2
0,25	12,7	4,3	0,0	100	0,0	0,1	16,5	12,9
0,125	9,2	3,6	0,0	95,0	0,0	0,1	8,5	11,3
0,063	6,9	2,9	0,0	80,0	0,0	0,1	3,4	9,3
<b>Percentuale (%)</b>	<b>27</b>	<b>35</b>	<b>30</b>	<b>8</b>				<b>100</b>
<b>MIX P (Agregato poroso)</b>								
<b>Diametro Setacci (mm)</b>	<b>SAC Sabbia 0-5</b>	<b>GRCA Graniglia 2-6.3</b>	<b>GRCB Graniglia 5-11</b>	<b>Filler</b>	<b>GRPA Trachite 2-6.3</b>	<b>GRPB Trachite 5.6-11</b>	<b>SAP Trachite 0-4</b>	<b>Passante (%)</b>
100	100	100	100	100	100	100	100	100,0
63	100	100	100	100	100	100	100	100,0
40	100	100	100	100	100	100	100	100,0
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100,0
20	100	100	100	100	100	100	100	100,0
16	100	100	100	100	100	100	100	100,0
14	100	100	100	100	100	100	100	100,0
12,5	100	100	100	100	100	100	100	100,0
10	100	100	98,4	100	100	100	100	99,8
8	100	100	68,8	100	100	100	100	95,3
6,3	100	100	37,4	100	100,0	82,8	100	87,2
4	99,9	75,2	1,8	100	89,1	17,5	99,9	65,5
2	72,6	21,6	0,0	100	4,0	0,2	80,3	30,9
1	32,8	8,3	0,0	100	0,0	0,1	50,1	21,6
0,5	19,5	5,4	0,0	100	0,0	0,1	29,8	16,1
0,25	12,7	4,3	0,0	100	0,0	0,1	16,5	12,5
0,125	9,2	3,6	0,0	95,0	0,0	0,1	8,5	9,9
0,063	6,9	2,9	0,0	80,0	0,0	0,1	3,4	7,3
<b>Percentuale (%)</b>			<b>15</b>	<b>8</b>	<b>30</b>	<b>20</b>	<b>27</b>	<b>100</b>

L'analisi granulometrica riportante le percentuali di aggregati utilizzate per la realizzazione delle due miscele vengono riportate in Tabella 4.1-2 mentre nella Figura 4.1-3 vengono mostrate sia le miscele in forma sciolta non bitumata che le rispettive curve granulometriche.

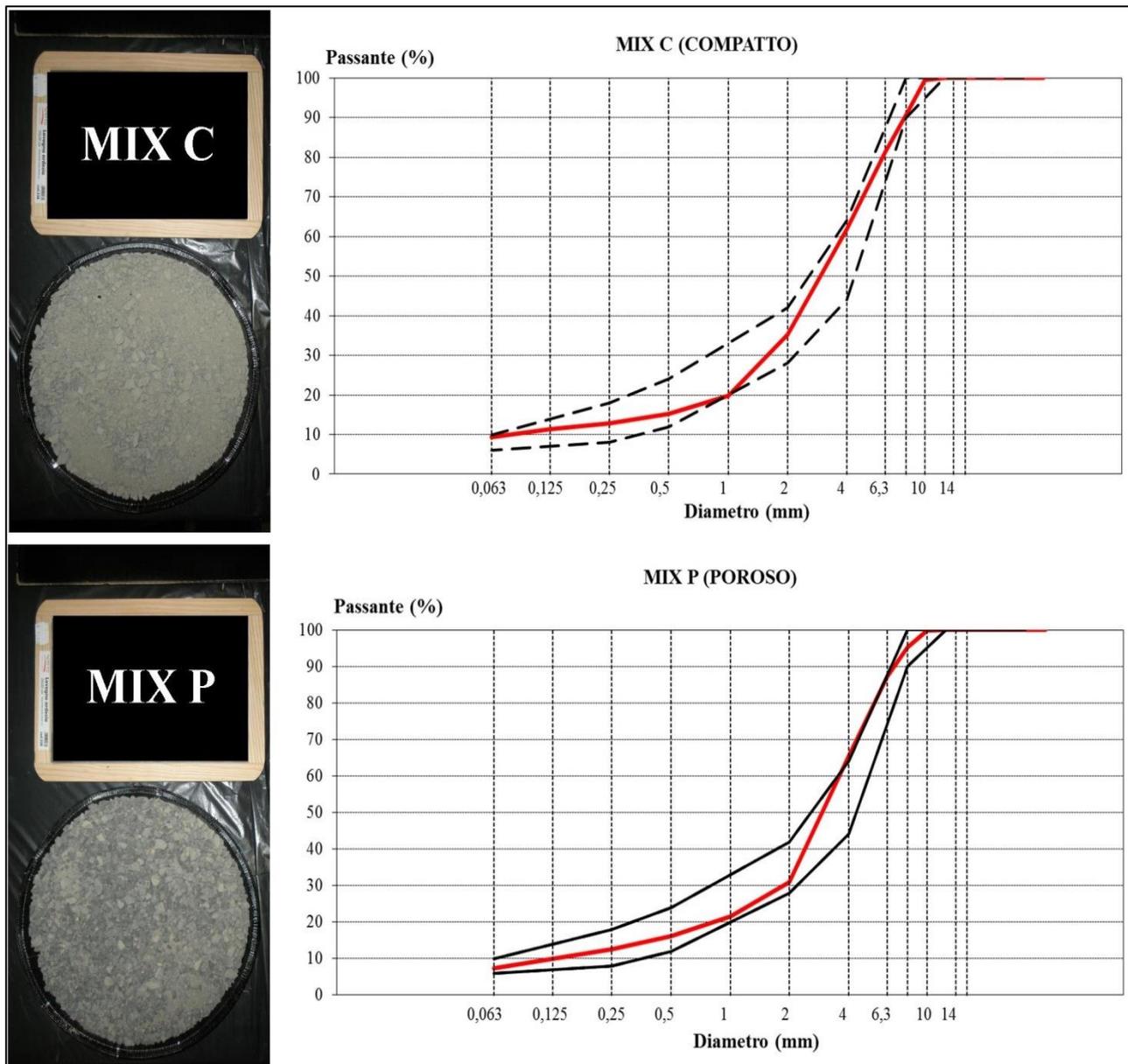


Figura 4.1-3: Curve granulometriche delle miscele

### Miscelazione con bitume

Generalmente, il quantitativo di bitume da adoperare nella realizzazione di un conglomerato bituminoso ottimale per il tipo di pavimentazione che si vuole realizzare viene stabilito confezionando più serie di provini con contenuti di bitume crescenti e comunque entro i valori prescritti dal Capitolato.

Per ognuna delle miscele di aggregati realizzati vengono aggiunte 4 diverse percentuali di bitume (b1, b2, b3, b4) con un variazione in bitume dell'ordine dello 0.5% (figura 4.1-4 e grafico 4.1-1), al fine di ottenere 8 miscele di conglomerato bituminoso da confezionare sia sotto forma di provini che posti sciolti su piatti (figura 4.1-4).



Figura 4.1-4: Le diverse fasi della preparazione dei conglomerati bituminosi: aggiunta bitume e miscelazione.

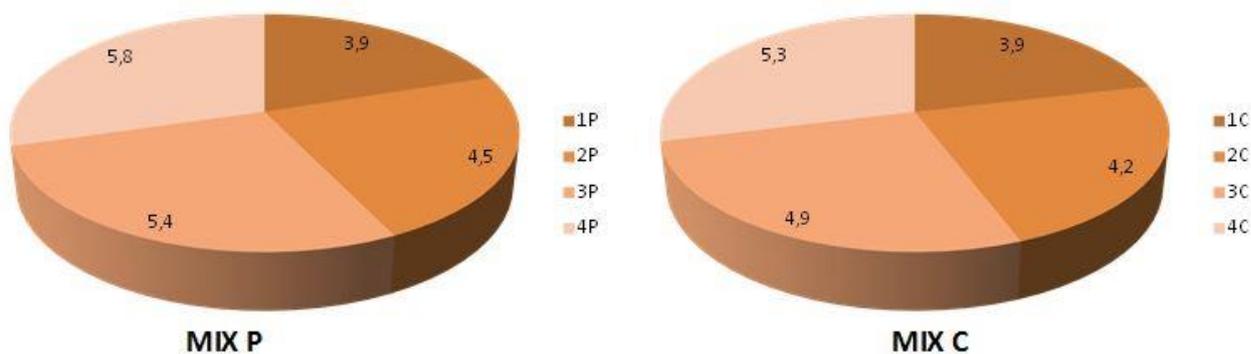


Grafico 4.1-1: Percentuali di bitume utilizzato per la realizzazione dei conglomerati bituminosi

Ai fini delle analisi spettroradiometriche, è stato quindi realizzato il seguente dataset:

- 6 inerti di diversa tipologia
- 2 miscele sciolte non bitumate
- 8 provini costipati secondo il metodo Marshall
- 8 miscele di aggregati e bitume ancora non costipati.



Figura 4.1-5: Conglomerati bituminosi costipati in provini di 10cm di diametro e in piatti di alluminio di 20cm di diametro.

Le analisi sono volte ad analizzare le correlazioni esistenti tra inerti presi singolarmente, miscele non bitumate, conglomerati bituminosi compattati e sciolti in funzioni delle firme spettrali acquisite. Inoltre viene valutata la possibilità di stimare la percentuale di bitume utilizzata per il confezionamento delle miscele attraverso lo studio dei cluster derivanti dall'utilizzo di opportune lunghezze d'onda.

#### 4.1.1.2 Dataset 2 – USURA E BINDER

Si vuole qui verificare l'effettiva possibilità di individuare possibili differenze in termini radiometrici tra miscele tipiche per lo stato di usura e per lo stato di collegamento (binder). Per fare ciò è stato predisposto un secondo dataset (dataset 2) caratterizzato da un aggregato di natura basaltica di tipo leggero di diametro compreso tra i 32 e i 150 mm ed uno di tipo ballast di diametro compreso tra i 31,5 e i 50 mm (figura 4.1-6). Per questa sperimentazione sono state realizzate quattro miscele, due per l'usura e due per il binder.

#### AGGREGATO LEGGERO

32 – 150 mm

#### BALLAST

31.5 – 50 mm

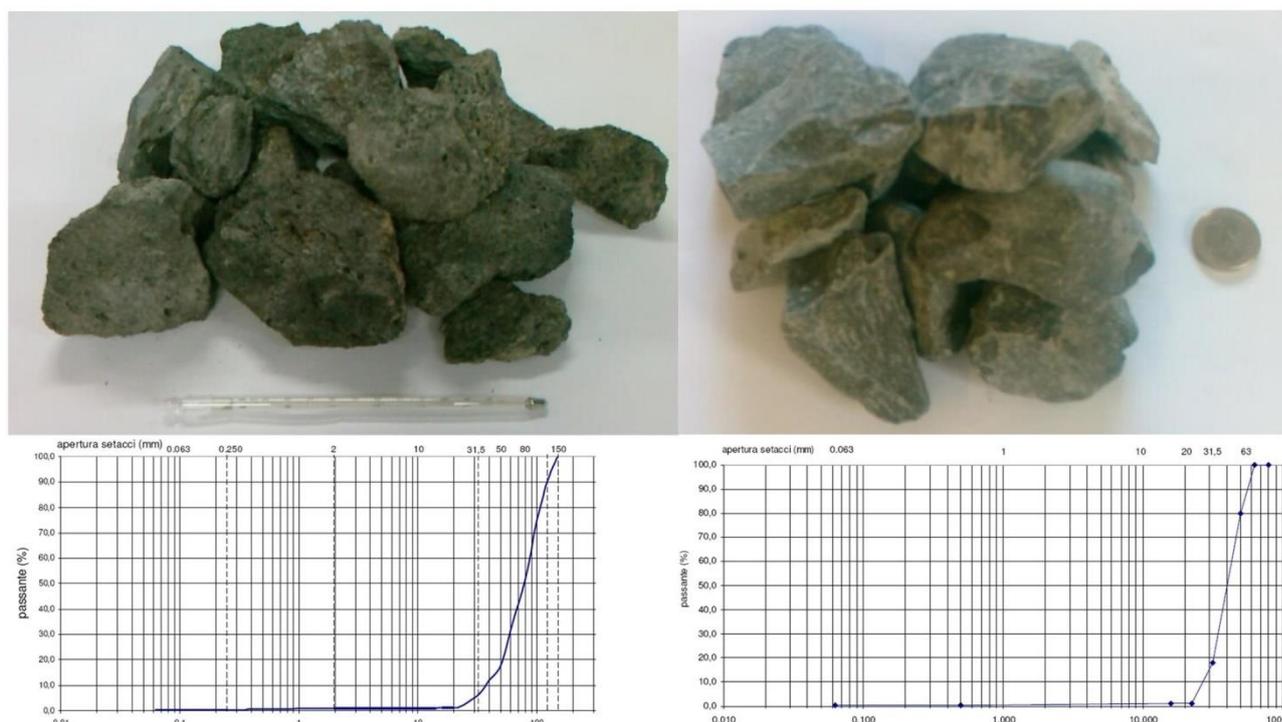


Figura 4.1-6: Aggregati utilizzati nella sperimentazione

#### 4.1.1.3 Dataset 3 – CLUSTER SPETTRALE

Al fine di rendere maggiormente robusta l'analisi del cluster spettrale, il dataset 3 è costituito da il dataset 1 e 2 nonché dall'aggiunta di 32 firme spettrali derivanti da l'analisi di ulteriori campioni costituiti da materiali della stessa natura del dataset 1.

#### 4.1.2 Predisposizione per misure spettro radiometriche

Il campioni preparati sono stati sottoposti ad analisi radiometrica mediante l'utilizzo di uno spettro radiometro FieldSpec 4 della *Analytical Spectral Devices* (Inc. Boulder, CO, USA). Questo strumento, che acquisisce in un intervallo compreso tra i 350 e 2500 nm mediante fibra ottica, registra i dati di misura in *real time* attraverso un collegamento *wireless* ad un computer portatile (tabella 4.1-3).

Si tratta di uno strumento ottico che registra, in funzione della lunghezza d'onda, la risposta spettrale del materiale in esame attraverso la produzione di un segnale elettrico, al quale corrisponde un flusso di energia radiante. In condizioni di illuminazione ideale e stabile, quali quelle di laboratorio, permette di eseguire le misurazioni tramite la sola fibra ottica (*bare fiber*). L'intervallo di campionamento spettrale è di 1,4 nm per la regione 350-1000 nm e 2 nm per la regione 1000-2500 nm. Lo spettro radiometro si avvale di tre *detector*

(VNIR, SWIR1 e SWIR2) che utilizzano un reticolo concavo, riflessivo ed olografico che proietta la luce dalle fibre in un reticolo di diffrazione olografico (la luce viene indirizzata verso un insieme di fotodiodi disposti in linea). Tale *array* comprende 512 elementi di rilevamento individuali. La regione dell'infrarosso medio è misurata da due spettrometri che acquisiscono negli intervalli 900-1850nm e 1700-2500nm, con risoluzione spettrale di 10-12nm, ed intervallo di campionamento di 2nm. Il fascio di fibre ottiche che raccoglie la radiazione riflessa ha un campo di vista conico variabile a seconda dell'ottica adoperata.

Tabella 4.1-3: Caratteristiche dello strumento utilizzato per il rilievo radiometrico.

Intervallo spettrale	350-2500 nm
Risoluzione spettrale	3 nm @ 700 nm 8 nm @ 1400/2100 nm
Intervallo di campionamento	1.4 nm @ 350-1000 nm 1.1 nm @ 1001-2500 nm
Tempo di scansione	100 milliseconds
<i>Detectors</i>	VNIR detector (350-1000 nm): 512 element silicon array SWIR 1 detector (1001-1800 nm): Graded Index InGaAs Photodiode, Two Stage TE Cooled SWIR 2 detector (1801-2500 nm): Graded Index InGaAs Photodiode, Two Stage TE Cooled
<i>Input</i>	1.5 m fiber optic (25° field of view)
<i>Noise Equivalent Radiance (NEdL)</i>	VNIR 1.0 x 10 <sup>-9</sup> W/cm <sup>2</sup> /nm/sr @ 700 nm SWIR1 1.4 x 10 <sup>-9</sup> W/cm <sup>2</sup> /nm/sr @ 1400 nm SWIR2 2.2 x 10 <sup>-9</sup> W/cm <sup>2</sup> /nm/sr @ 2100 nm
Peso	5.44 kg (12 lbs)

Gli spettroradiometri in generale vengono abitualmente utilizzati per lo studio di materiali allo stato solido, ma è importante tenere conto che la misura è condizionata da fenomeni di assorbimento funzione della composizione dell'aria interposta lungo il cammino ottico tra la strumentazione ed il *target*. L'assorbimento, da parte delle molecole che vengono eccitate dalla radiazione elettromagnetica, avviene per quelle radiazioni la cui lunghezza d'onda coincide con quella di risonanza delle molecole stesse. Il fenomeno è regolato dalla legge di Lambert-Beer (Hinkley, 1976). Nello studio dei solidi gli effetti del mezzo gassoso costituiscono un artefatto che deve essere minimizzato, pertanto la realizzazione delle misure in laboratorio tende a renderle pari a zero. I parametri sperimentali di misura sono stati determinati ottimizzando la geometria del sistema al fine di ottenere un segnale stabile, riducendo così l'errore strumentale. Al fine di garantire una misura perfettamente centrata sul pannello di riferimento e sul campione si è scelto di operare con la sola fibra ottica, avente un campo di vista pari a 25°, posta ad una distanza di 8 cm dai provini di asfalto e di 20 cm dai piatti contenenti inerti e conglomerati bituminosi sciolti (figura 4.1-7).



Figura 4.1-7 settaggio strumentazione.

Tutte le misure sono state eseguite in un sala appositamente allestita ed oscurata alla luce solare mentre, come sorgente luminosa, è stata utilizzata una *Pro-Lamp* della ASD da 50 Watt. Tale lampada è stata appositamente realizzata per effettuare misure di riflettanza diffusa in laboratorio con spettro luminoso costante.

Il Fieldspec può acquisire i dati sia in forma di radianza, che calcolare direttamente il fattore di riflettanza, dal rapporto tra la radiazione solare incidente riflessa dalla superficie del target e la radiazione incidente riflessa da una superficie di riferimento. Il vantaggio maggiore di questa metodologia di misura è la capacità di minimizzare errori sistematici legati alla geometria delle riprese; lo svantaggio è la sua dipendenza dalla superficie di controllo. Quest'ultima dovrà infatti:

- essere lambertiana ovvero garantire una riflessione isotropa della radiazione incidente;
- non essere degradata spettralmente in modo significativo, a causa della esposizione alla luce solare o del "tempo";
- essere resistente all'usura;
- fornire una firma spettrale i cui valori siano uguali a 1, o comunque valori vicino al 100%.

Le superfici di riferimento sono generalmente costituite da pannelli "bianchi", di cui si può verificare facilmente l'usura e il livello di pulizia. Tra i materiali maggiormente utilizzati vi è l'Halon, che pur essendo alquanto costoso, è particolarmente adatto per un uso prolungato in campagna perché lavabile e facilmente trasportabile. Una importante caratteristica del Fieldspec, particolarmente utile per le acquisizioni in campo, è la modalità con cui sono registrati i dati: ogni firma spettrale è calcolata dalla media di un numero di acquisizioni predeterminate dall'operatore e che possono essere comprese tra 10 e 3000. Il radiometro è stato utilizzato in modalità di acquisizione "riflettanza", ossia per l'acquisizione diretta del rapporto tra la luce incidente e la luce riflessa, utilizzando come pannello di riferimento, una superficie bianca di *Spectralon*, assunto come superficie lambertiana cioè in grado di riflettere la radiazione incidente in modo isotropo (Figura 4.1-8). Le proprietà ottiche di questo materiale (un fluotopolimero ad alta densità), infatti, assicurano una risposta spettrale costante nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 300-2500nm ( 99% tra 400-1500 e >95% oltre 1500nm).

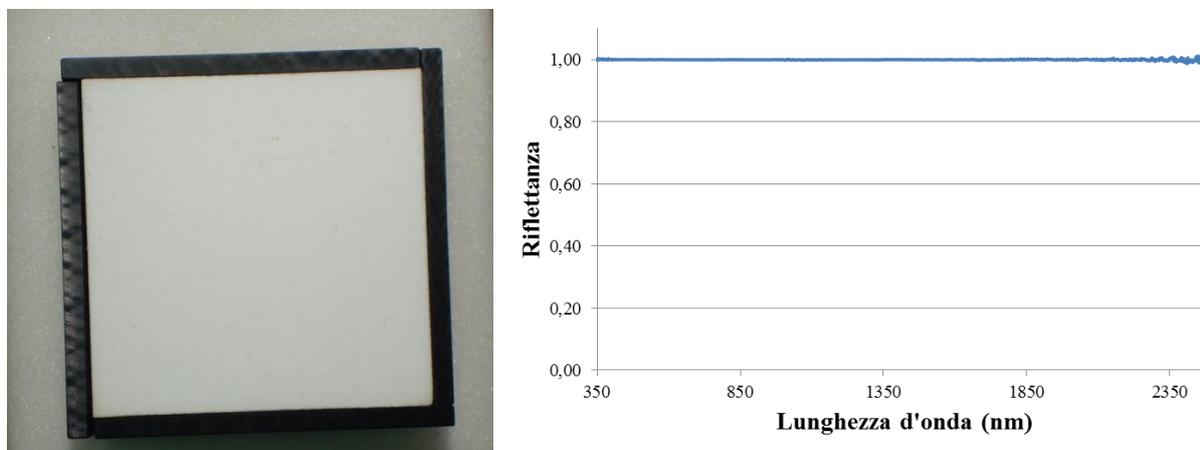


Figura 4.1-8 Pannello di riferimento in Spectralon

Ogni misura è stata effettuata con 50 cicli di integrazione per minimizzare ulteriormente le eventuali oscillazioni della sorgente di illuminazione mentre, per ovviare ai problemi legati alle eterogeneità granulometriche del campione, sono stati mediati gli spettri acquisiti ruotando il campione di 90°. I dettagli della geometria ottica adottata è riportata in Tabella 4.1-4.

Essendo i campioni prevalentemente scuri, tranne per le miscele ancora prive di bitume, le prime misure effettuate hanno fin da subito evidenziato la difficoltà di percepire le piccole variazioni. Utilizzando il pannello di *Spectralon* bianco come riferimento, per i singoli provini, si osserva infatti un appiattimento importante del segnale che si attesta su valori di riflettanza mai superiori a 0.1. Al fine di garantire una buona qualità del dato analitico, la firma spettrale del pannello di riferimento è stato acquisita sia all'inizio che alla fine di ogni sessione di misura.

*Tabella 4.1-4: Geometria del sistema di acquisizione*

<b>Oggetto</b>	<b>Grandezza</b>	<b>Valore</b>
Diametro provino	cm	10
Spessore provino	cm	≈ 7
Diametro piatto	cm	20
Spessore piatto	cm	4
Distanza dalla fonte luminosa	cm	25
Potenza fonte luminosa	watt	50
Inclinazione fonte luminosa	gradi	30
Distanza sensore ottico (provini)	cm	8
Distanza sensore ottico (piatti)	cm	20
Numero di acquisizioni	-	50/100/ 150
Numero di posizioni	-	4
Apertura ottica del sensore	gradi	25

Infine, per ogni campione misurato, è stata acquisita una foto digitale mediante Nikon D7000 facendo attenzione a riprodurre le medesime condizioni di illuminazioni e geometria, eseguendo la calibrazione manuale del bianco per uniformare le immagini e renderle confrontabili tra loro.

### 4.1.3 Osservazioni e risultati

#### 4.1.3.1 Risultati sperimentazione su Dataset 1

Durante la prima fase sperimentale sono state effettuate misure spettrometriche sui diversi tipi di inerti utilizzati: GRCA, GRCA, SAC (tefrite leucitica compatta), SAP, GRPA, GRPB (tefrite leucitica porosa), FILLER e sul bitume. In figura 4.1-9 sono evidenziati gli spettri di tutti gli aggregati (umidità naturale) e del bitume.

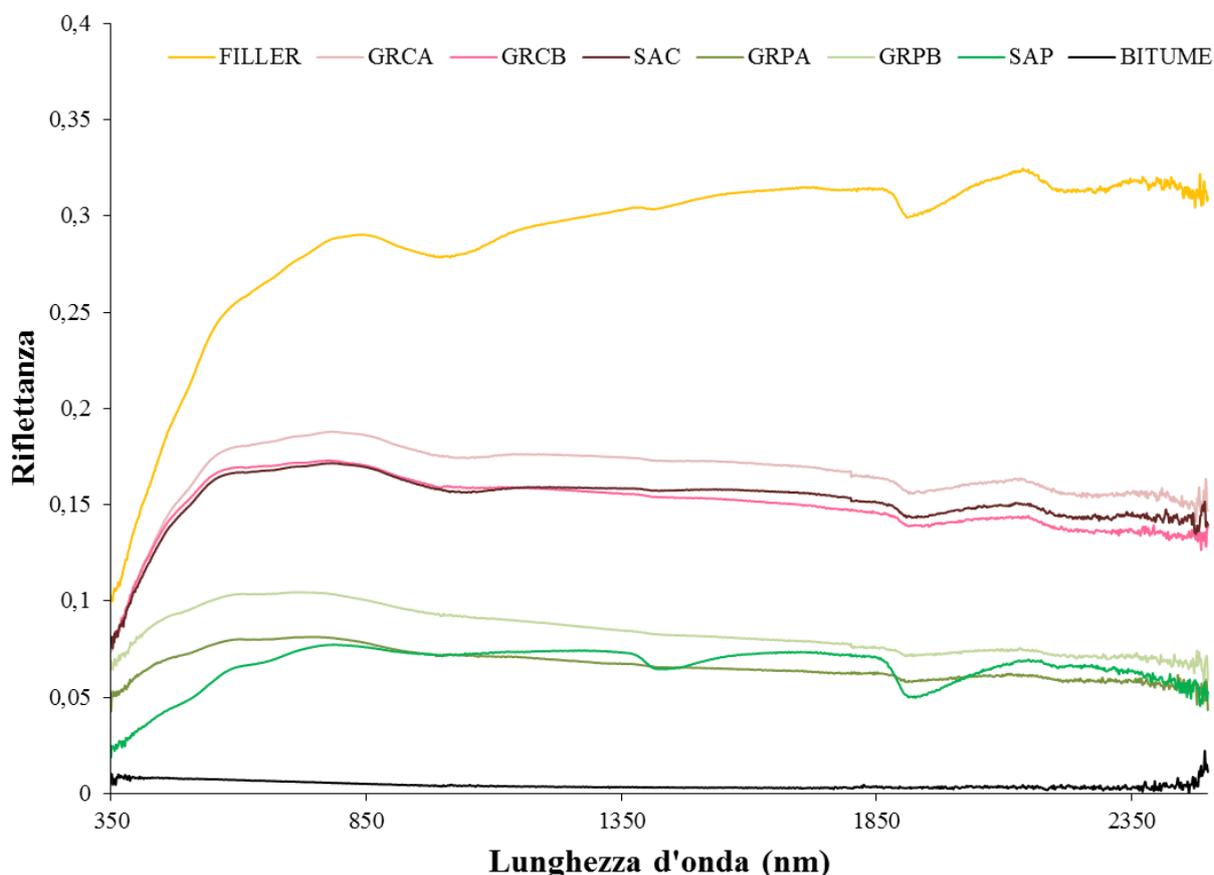


Figura 4.1-9: Firme spettrali del bitume e degli aggregati ad umidità naturale

L'analisi delle firme corrispondenti ai materiali tal quali permette di osservare che le due tipologie di tefrite leucitica presentano entrambe un incremento dei valori di riflettanza nel visibile e si attestano nello primo infrarosso a valori intorno ai 0.08, per l'aggregato poroso, rispetto ai 0.17 per l'aggregato compatto.

Come è possibile notare, benché l'inerte analizzato sia dello stesso litotipo (tefrite leucitica) e della stessa granulometria, la differenza in porosità fa assumere alle relative curve spettrali dei valori medi di riflettanza sostanzialmente diversi. Benché l'andamento complessivo dei due set di dati siano molto simili si notano delle differenze importanti nella parte dello spettro tra il visibile e il vicino infrarosso, ossia tra 350 e 850nm dove le firme relative agli inerti non porosi presentano una convessità più accentuata e dove è presente una maggiore variabilità dei valori di riflettanza che partono da circa 0.7 a 350 nm a mediamente 0.17 a 800nm. Un'ulteriore variazione si osserva a 1900nm dove è presente un picco di assorbimento. Tale picco è ben marcato sugli inerti non porosi e sulla sabbia porosa dove ne compare un'ulteriore a 1400nm. La firma spettrale relativa al filler mostra i valori di riflettanza più alti (intorno ai 0.3) su tutto lo spettro elettromagnetico ed evidenzia, oltre al picco di assorbimento già detto a 1900nm anche un secondo a 900nm.

A partire dalle schede petrografiche descrittive fornite con gli inerti, si è potuto osservare alcune analogie tra le firme spettrali di questi materiali e la composizione mineralogica del litotipo analizzato. In effetti i picchi di assorbimento a 900nm e a 1900nm sono caratteristici del pirosseno e del plagioclasio (Rencz, 1999). Inoltre tra 300 e 900nm l'andamento spettrale è simile all'andamento degli orto-pirosseni che sono prevalenti sia come fenocristalli che come pasta di fondo delle rocce di origine vulcanica (Clark, 1993).

Tuttavia la differenza di porosità e le caratteristiche di assorbimento dell'acqua dei due tipi di tefrite si manifesta con ben distinti valori di riflettanza, più bassi per l'inerte poroso rispetto a quello non poroso. In generale è infatti possibile evidenziare il fatto che la clusterizzazione dei due set di dati, porosi (P) e compatti (C), trova corrispondenza nella differenza in massa volumica. In effetti, se si fa riferimento alla tabella 4.1-1 è possibile osservare come gli inerti porosi presentano una massa volumica sempre inferiore a quella degli inerti compatti attestandosi ai seguenti valori medi: Massa volumica apparente dei granuli  $2.77 \text{ Mg/m}^3$  (C) e  $2.68 \text{ Mg/m}^3$  (P), Massa volumica dei granuli pre-essiccati  $2.60 \text{ Mg/m}^3$  (C) e  $2.42 \text{ Mg/m}^3$  (P), Massa volumica in mucchio  $1.39 \text{ Mg/m}^3$  (C) e  $1.32 \text{ Mg/m}^3$  (P).

Per quel che riguarda invece il *filler*, dopo una rapida inflessione nel visibile, questo presenta valori più elevati di riflettanza mantenendosi costante su valori prossimi allo 0.3; questa maggiore riflettanza è dovuta anche alla grana fine che tende ad ottenere una superficie maggiormente riflettente. In particolare nell'infrarosso vicino la riflettanza spettrale di questo materiale, che è costituito quasi totalmente da pirosseni e plagioclasti, è funzione della dimensione dei grani; maggiore è la granulometria (dimensione dei grani) tanto più è la quantità di luce assorbita con conseguente abbassamento della riflettanza (Clark et al. 1999). Infine l'acquisizione della firma del bitume presenta, come era nelle attese sperimentali, un andamento con valori di riflettanza su tutto lo spettro prossimi allo zero.

Questi aggregati sono stati poi posti ad essiccare in forno per un'ora e poi rianalizzati nuovamente. Sono stati quindi confrontati gli spettri ottenuti in condizioni di umidità naturale e dopo essiccazione. In figura 4.1-10 vengono riportate le firme spettrali del filler e degli inerti porosi che meglio evidenziano tali variazioni.

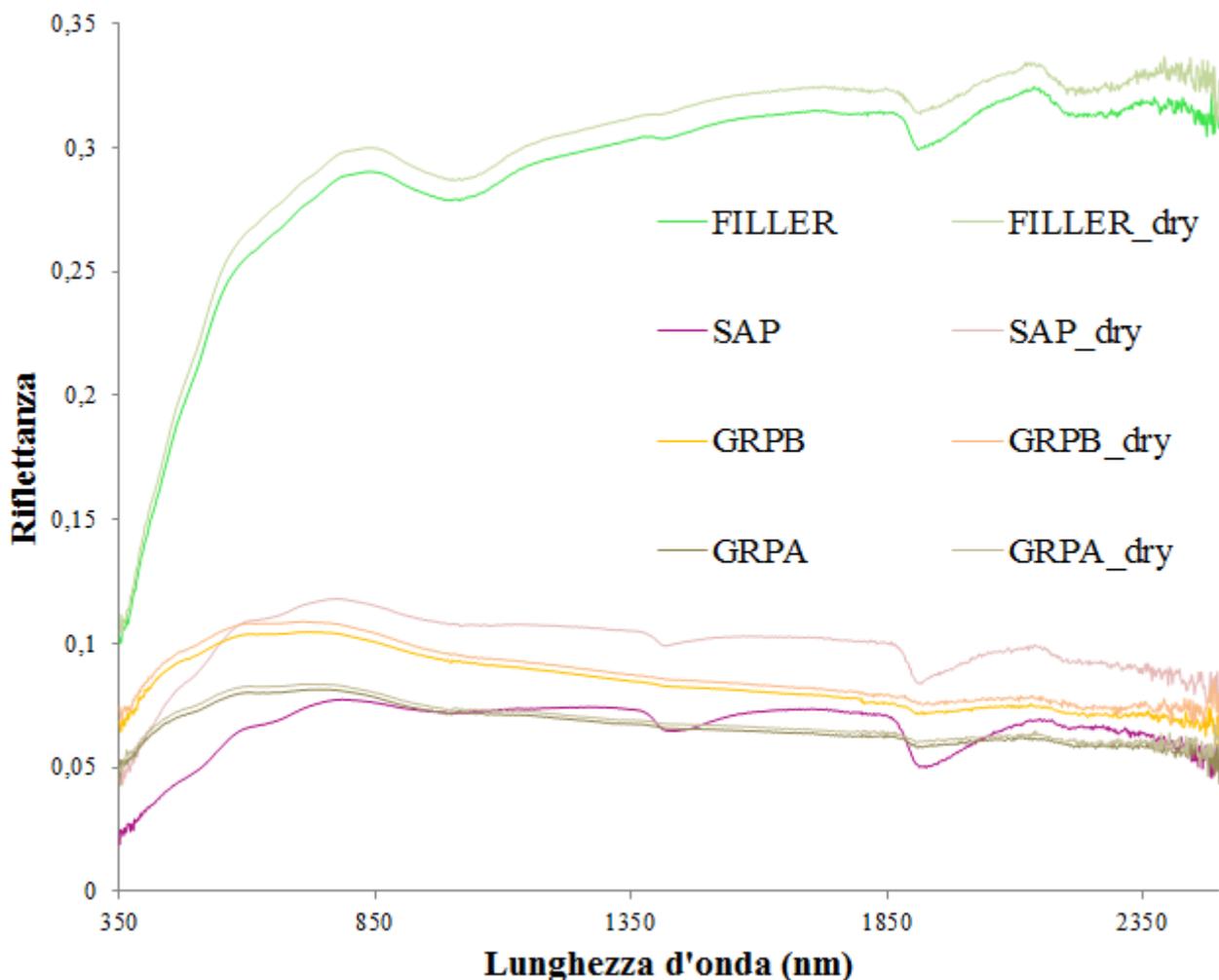


Figura 4.1-10: firme spettrali degli inerti porosi prima e dopo l'essiccazione.

Come è possibile osservare, la risposta radiometrica dei materiali analizzati mostra che i campioni essiccati hanno dei valori di riflettanza mediamente più elevati su tutto lo spettro analizzato. I picchi a 1400nm e 1900nm individuati nel filler, nella sabbia porosa rimangono presenti benché meno marcati. Tale differenza è maggiormente evidente nelle granulometrie sabbiose rispetto agli inerti più grossolani. Anche

nel filler tale differenza è molto evidente. Ciò è dovuto ad una maggiore capacità di adsorbimento dell'acqua da parte di granulometrie fini rispetto a quelle a granulometria più grossolana. Questo è evidenziato in tabella 4.1-1 nella quale si osserva che i maggiori valori di assorbimento d'acqua (EN 1097-6) delle due serie di dati appartengono alle sabbie. La sabbia compatta (SAC) presenta infatti il 3.0% rispetto ai 2.5% del GRCA e del 1.9% del GRCB mentre la sabbia porosa (SAP) presenta il valore più alto in assoluto pari al 5.4 % e comunque molto più elevato rispetto ai GRPA e GRPB i quali mostrano invece il 3.3% di assorbimento.

La differenza nelle firme è inoltre osservabile tramite la massa volumica dei granuli (tabella 4.1-1) sia degli inerti porosi che di quelli compatti. Mediamente infatti si osserva la maggiore presenza di vuoti è evidenziata osservando i dati di Massa volumica dei granuli pre-essiccati, ossia privati del loro contenuto in acqua. I valori medi degli inerti porosi ( $2.42 \text{ Mg/m}^3$ ) sono infatti molto minori rispetto a quelli degli inerti compatti ( $2.60 \text{ Mg/m}^3$ ).

Analogamente a quanto fatto per gli inerti presi singolarmente, le due diverse miscele, composte dalle percentuali riportate in tabella 4.2, sono state analizzate sia con il contenuto d'acqua naturale (ossia quello con il quale è pervenuto in laboratorio) che dopo essiccamento in forno. L'analisi delle misure effettuate sugli stessi campioni dopo essiccazione in forno restituisce firme spettrali del tutto simili a quelle elaborate sui campioni ad umidità naturale benché presentino valori di riflettanza più elevati. Ciò è dovuto prevalentemente al fatto che i campioni, privi di acqua superficiale, tendano a schiarirsi inducendo un più o meno marcato aumento di riflettanza.

Fissando il valore di massa volumica dei granuli pre-essiccati del filler allo stesso valore di quello della sabbia compatta ( $2.57 \text{ Mg/m}^3$ ), è stato possibile calcolare il valore di massa volumica dei granuli pre-essiccati per le due miscele proporzionando con le percentuali dei diversi costituenti. Non avendo a disposizione dati relativi alle caratteristiche di massa volumica ed assorbimento del filler sono stati adoperati i dati relativi alla sabbia compatta ritenendo che, alla granulometria del filler, l'influenza dei vuoti sia minima. I valori così stimati saranno affetti da un errore minimo ma costante per entrambi i calcoli. La miscela compatta risulta quindi avere  $2.60 \text{ Mg/m}^3$  mentre quella porosa  $2.46 \text{ Mg/m}^3$ . Analogamente è stato fatto per il valore di assorbimento d'acqua prendendo come riferimento il valore dell'assorbimento della sabbia compatta (3%). La miscela compatta risulta quindi avere un assorbimento del 2.50 % mentre quella porosa è del 3.66%. Considerando poi che è stata utilizzata la stessa percentuale di filler (8%) in entrambe le miscele, l'errore può essere ritenuto trascurabile. Analogamente è stato fatto per calcolare la massa volumica dei granuli saturi delle due miscele che risultano avere valori di  $2.66 \text{ Mg/m}^3$  per la miscela compatta e  $2.55 \text{ Mg/m}^3$  per quella porosa.

Il delta tra le due miscele, calcolato in termini di massa volumica dei granuli pre-essiccati e di massa volumica dei granuli saturi nonché di assorbimento d'acqua è di  $0.14 \text{ Mg/m}^3$ ,  $0.11 \text{ Mg/m}^3$  e 1.16% rispettivamente per la miscela compatta e quella porosa. E' quindi evidente che nelle miscele, come già evidenziato negli inerti singoli, è possibile riscontrare alcune differenze in termini radiometrici. In figura 4.1-11, si possono notare le differenze tra pre e post essiccamento; queste differenze sono comunque minime sia per la miscela compatta che per quella porosa. Tale evidenza è ben rimarcata dalla scarsa variazione in termini di massa volumica dei granuli saturi e pre-essiccati delle due miscele che si attesta in  $0.06 \text{ Mg/m}^3$  e  $0.09 \text{ Mg/m}^3$  rispettivamente per quella compatta e per quella porosa. La maggiore differenza in massa volumica rilevata per la miscela porosa, seppur lieve, è comunque evidenziata dalla più marcata differenziazione delle due firme spettrali.

Queste miscele, dopo l'aggiunta di quantità note di bitume (vedi grafico 4.1-1), sono state confezionate in 4 provini aventi 10 cm di diametro e in 4 piatti aventi 20cm di diametro. Per ogni campione sono state acquisite 8 firme spettrali ottenute ruotando il provino di  $90^\circ$  ogni due acquisizioni. E' stata calcolata la media e la deviazione standard di ogni set di misure per ottenere una firma caratteristica del campione. Alla firma media di queste è stata aggiunto e sottratto il valore di deviazione standard al fine di valutare la possibilità di sovrapposizione tra le firme e quindi di una loro difficile differenziazione.

Le misure spettro radiometriche sulle miscele di conglomerato bituminoso sono state effettuate sia sul materiale sciolto sia sui provini Marshall. Nelle figure 4.1-12, 4.1-13, 4.1-14, 4.1-15 vengono mostrati gli spettri caratteristici delle 16 miscele di conglomerato bituminoso ottenute con inerti porosi e compatti, sciolti e costipati, per ciascuna percentuale di bitume.

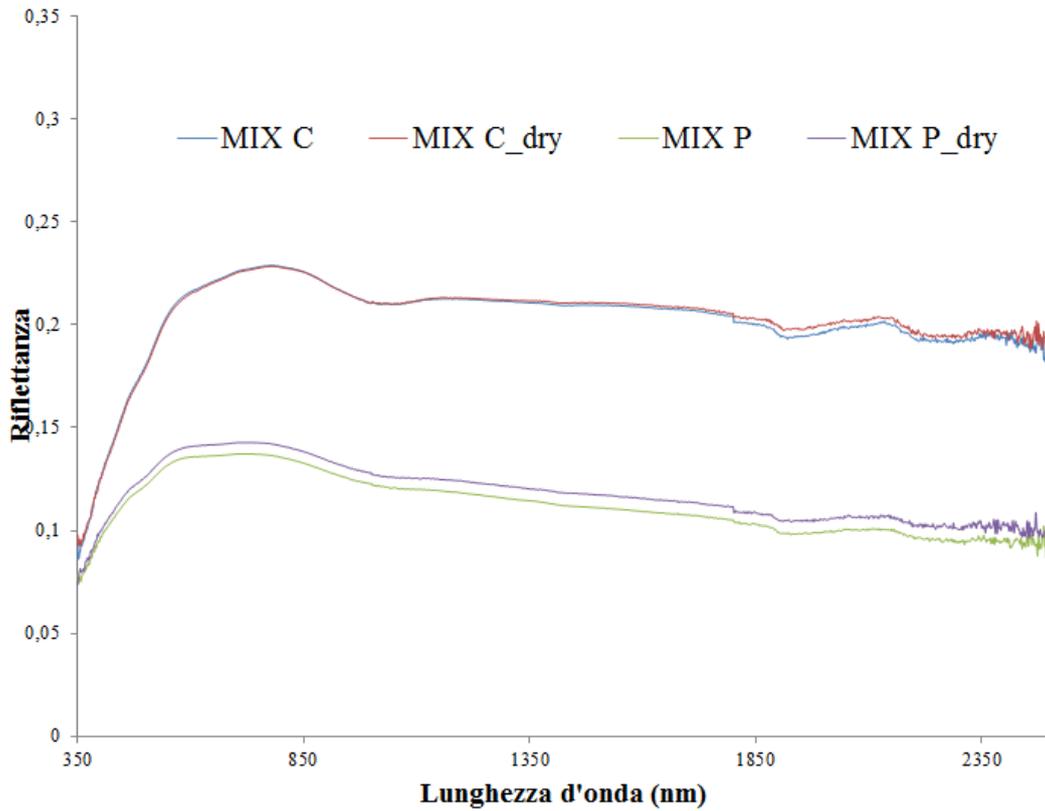


figura 4.1-11: Miscele prima e dopo l'essiccamento

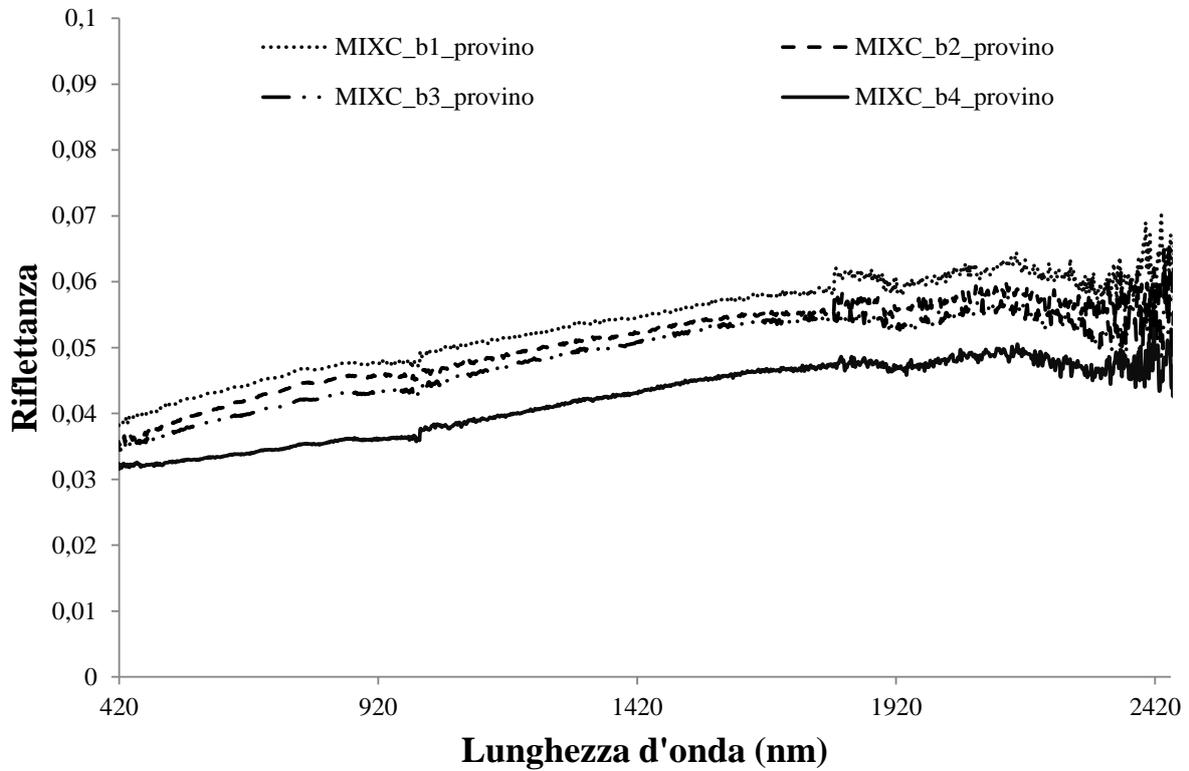


Figura 4.1-12 – Firme spettrali dei conglomerati bituminosi in provini (miscela compatta – MIX C)

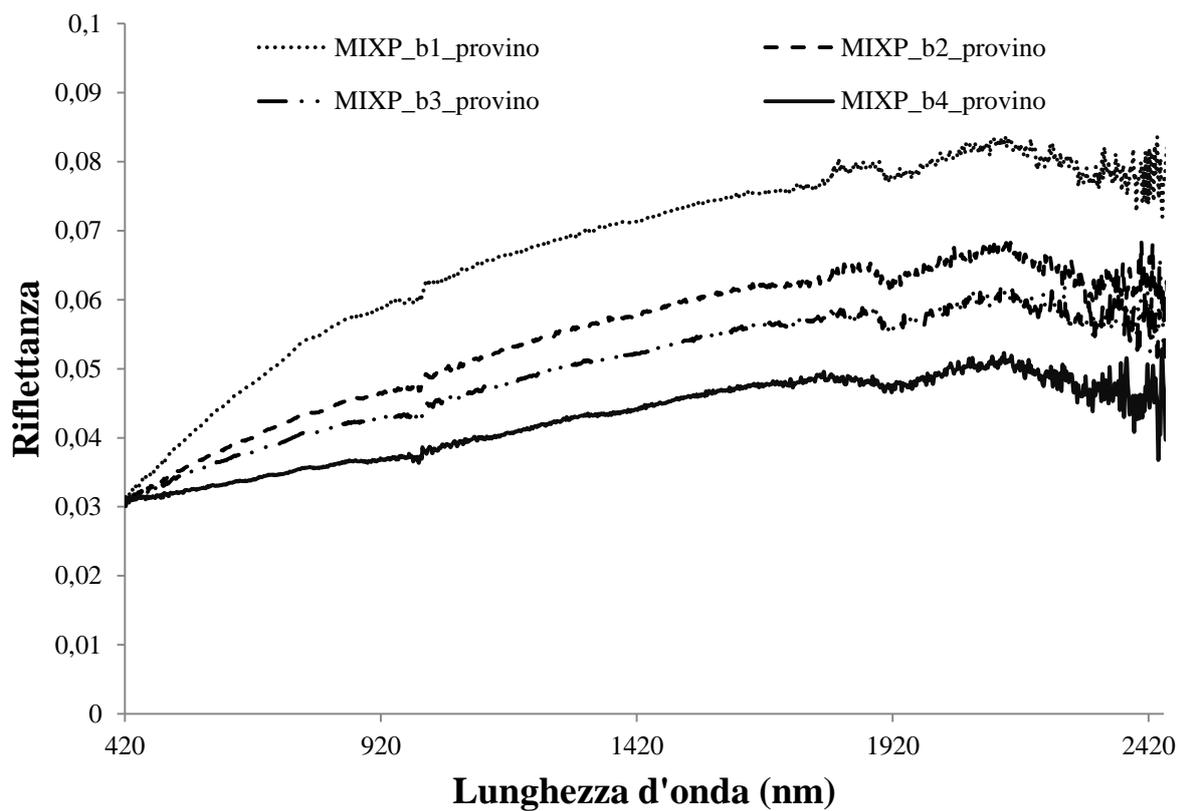


Figura 4.1-13 – Firme spettrali dei conglomerati bituminosi in provini (miscela porosa – MIX P)

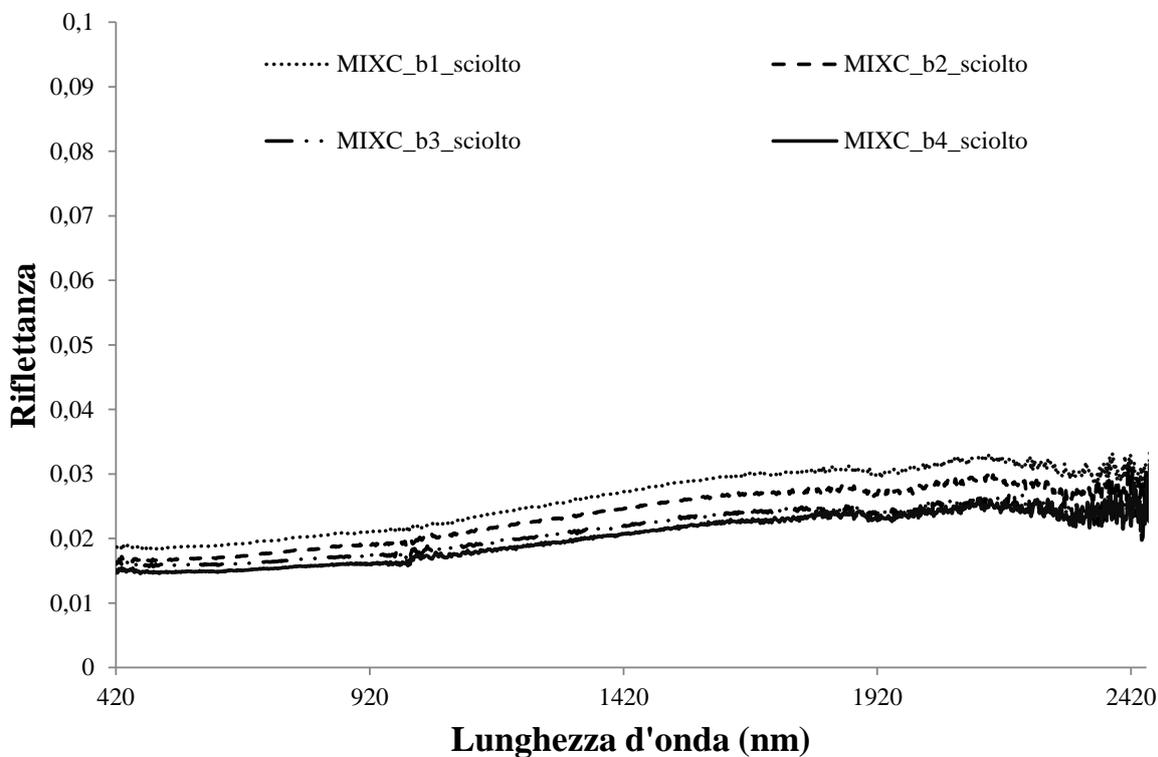


Figura 4.1-14 – Firme spettrali dei conglomerati bituminosi in forma sciolta su piatti (miscela compatta – MIX C)

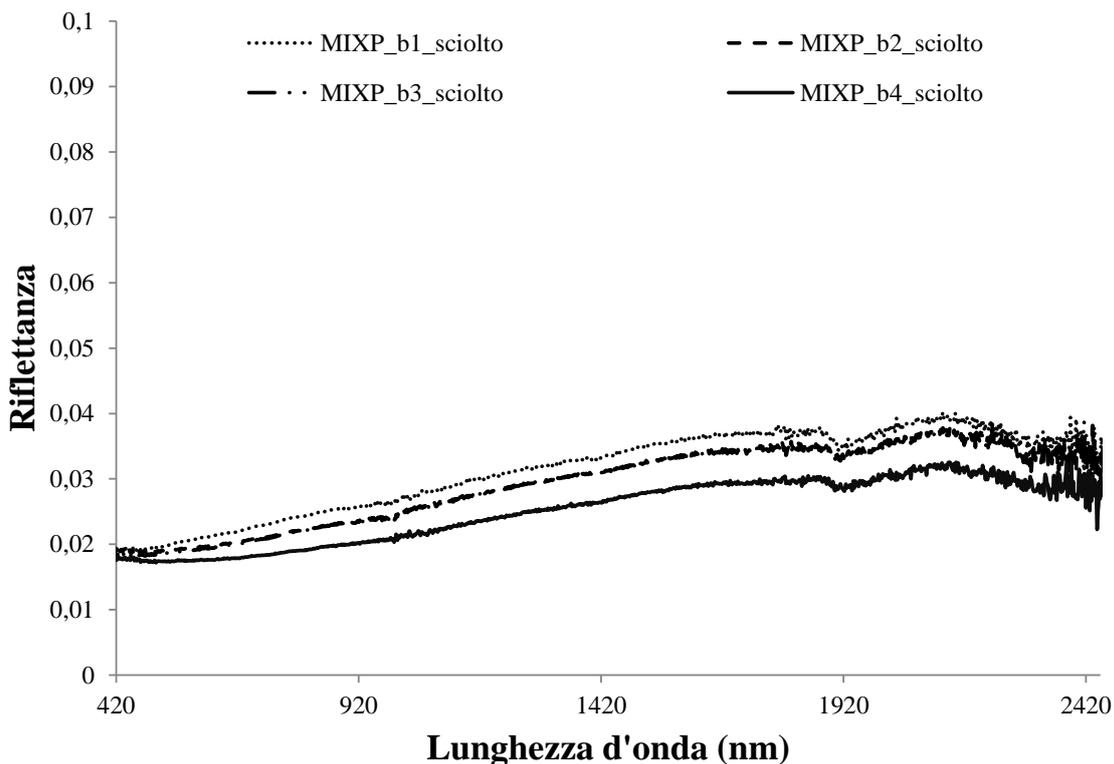


Figura 4.1-15: Firme spettrali dei conglomerati bituminosi in forma sciolta su piatti (miscela compatta – MIX P)

L'analisi delle misure effettuate evidenzia bassi valori della deviazione standard. Nel dettaglio per i provini Marshall del MIXC la deviazione standard media calcolata su tutto lo spettro e sulle 4 percentuali di bitume è di 0.0031 e 0.0030 per il MIXP mentre per i provini non costipati si hanno valori leggermente inferiori pari a 0.0012 per il MIXC e 0.0011 per il MIXP.

I risultati ottenuti sia sui provini costipati che sul materiale sciolto rivelano una diminuzione della riflettività all'aumentare del bitume. Le firme ottenute dal materiale sciolto tendono a sovrapporsi le une sulle altre (vedi figure 4.1-14 e 4.1-15) mentre quelle ottenute dai provini risultano essere maggiormente separate (vedi figure 4.1-12 e 4.1-13). Le firme relative ai provini delle miscele con aggregati porosi risultano essere quelle che si differenziano in maniera più netta. Tale evidenza è avvalorata dalla analisi dei delta tra le percentuali di bitume contenute nei diversi campioni. Tali valori vengono riportati nella tabella 4.1-5: si può infatti notare come i delta-concentrazione di bitume in peso di aggregato- siano tendenzialmente maggiori negli aggregati porosi rispetto a quelli compatti.

Tabella 4.1-5: Differenze tra contenuti in bitume tra le diverse miscele (delta espresso in % di peso in aggregati)

	$\Delta b_{12}$	$\Delta b_{23}$	$\Delta b_{34}$	$\Delta b_{14}$
<b>Mix-C</b>	0.29	0.65	0.44	1.38
<b>Mix-P</b>	0.62	0.87	0.45	1.94

Per stimare le variazioni di percentuale di bitume sono state analizzate le aree sottese tra le firme medie e le rispettive deviazioni standard, rispettivamente aggiunte e sottratte. Si è notato come tali aree tendano a sovrapporsi per variazioni modeste del contenuto di bitume mentre risultano ben distinte se si confrontano le miscele con il massimo e minimo contenuto di bitume. Tale parziale sovrapposizione è visibile nella figura 4.1-16 per quanto riguarda le firme corrispondenti alle miscele porose intermedie. Si può osservare infatti come le curve relative al MIXP\_b3 vadano a ricoprire un'area maggiore nel grafico rispetto alle altre e in particolare di come la curva MIXP\_b3+devst. coincida con la MIXP\_b2-devst. Per quanto riguarda i termini intermedi della miscela compatta questi non vengono riportati in figura in quanto la sovrapposizione tra le

differenti curve e rispettive deviazioni standard è di molto maggiore e avrebbe reso il grafico illeggibile; rimangono evidenti e ben separati gli estremi (figura 4.1-17). Appare quindi evidente di come sia possibile discriminare i due termini estremi di entrambe le miscele su tutto lo spettro elettromagnetico considerato.

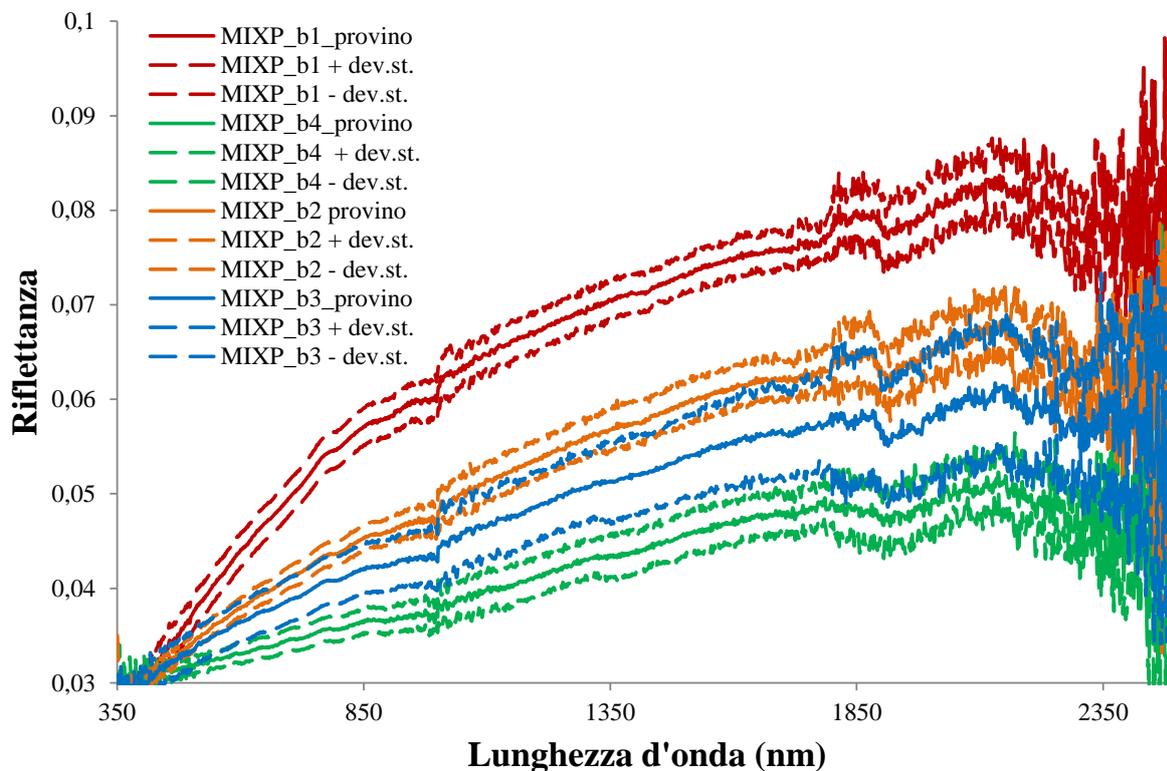


Figura 4.1-16 - Variazione della firma spettrale media dei provini per tutti e quattro i contenuti in bitume considerando le oscillazioni dovute alle deviazioni standard calcolate tra 350 e 2500nm.

Da un esame dell'andamento di tutte le firme spettrali nel visibile e vicino infrarosso è possibile osservare una variazione della pendenza al variare della percentuale del bitume utilizzato per la realizzazione dei provini. All'aumentare della percentuale di bitume si nota una diminuzione della pendenza; questo trend è osservabile nelle figure 4.1-12 e 4.1-13. In figura 4.1-18 viene focalizzato tale aspetto per la miscela porosa nel quale è più evidente, restringendo la scala di analisi al visibile e infrarosso vicino. In particolare le firme relative al materiale sciolto presentano, oltre a quanto esposto per i provini Marshall, anche una lieve variazione nella forma della firma spettrale che da concava passa convessa al diminuire della percentuale di bitume utilizzata (fig.4.1-14 e 4.1-15). Tale variazione di forma è in analogia a quanto messo in evidenza in precedenti studi e correlata con i primi stadi di alterazione (Noronha et al. 2002; Salvatori et al. 2009).

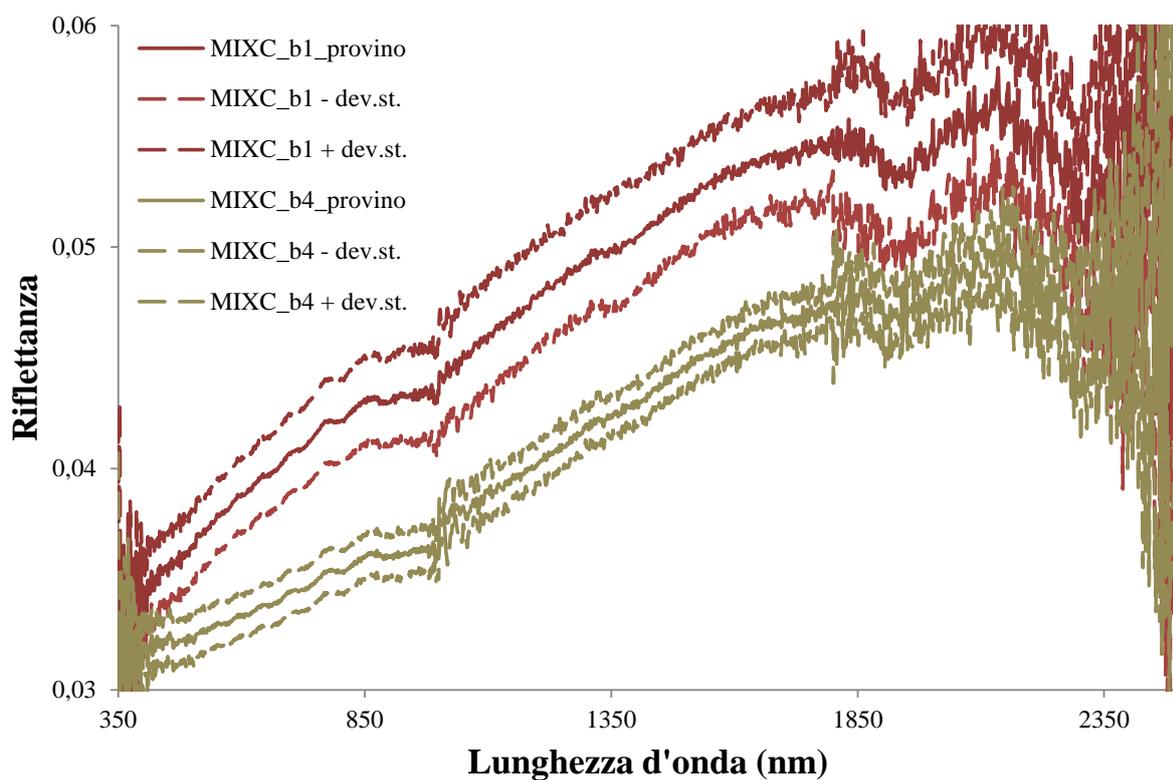


Figura 4.1-17 – Variazione della firma spettrale media dei provini con il minore e maggiore contenuto in bitume considerando le oscillazioni dovute alle deviazioni standard calcolate tra 350 e 2500nm.

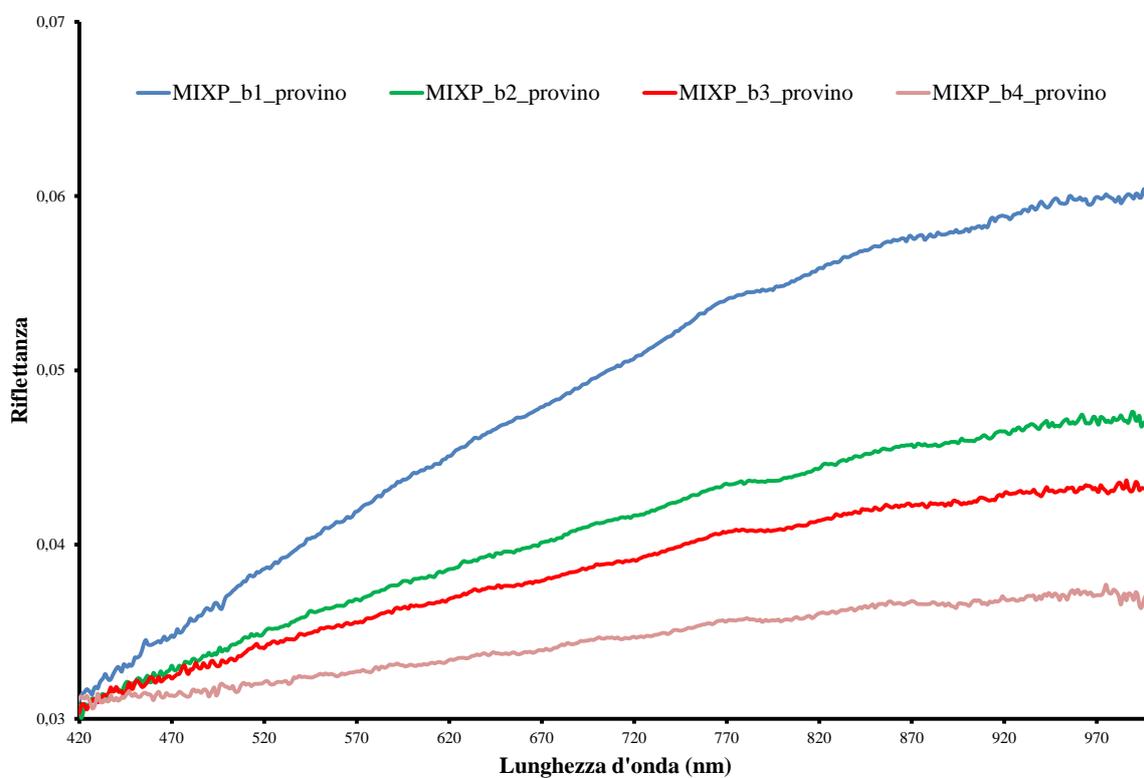


Figura 4.18 – Variazione di pendenza nei provini del MIX-P

Per descrivere la relazione tra la variazione di pendenza esistente con alcuni parametri, quali la percentuale di bitume, sono state considerate le bande 460nm e 740nm corrispondenti alla porzione di firma spettrale a

pendenza costante. Tale scelta viene inoltre supportata dal fatto che bande simili o prossime a quelle utilizzate, sono già state utilizzate in letteratura da (Herold et al. 2005) 490nm - 830 nm per valutare lo stato del manto stradale partendo da dati di *remote sensing*. Inoltre il rumore del segnale all'interno di questo intervallo risulta essere molto basso e non inficia il calcolo della pendenza.

Utilizzando i dati ottenuti e rappresentando graficamente i valori di riflettanza dei conglomerati bituminosi, sia compattati in provini che sciolti, ottenuti per 460nm e 740nm, è stato possibile verificare la relazione lineare già riscontrata in Mei et al. 2010. L'evidente clusterizzazione di tali oggetti (figura 4.1-19) ottenuta tramite regressione lineare indica valori di correlazione superiori al 93%.

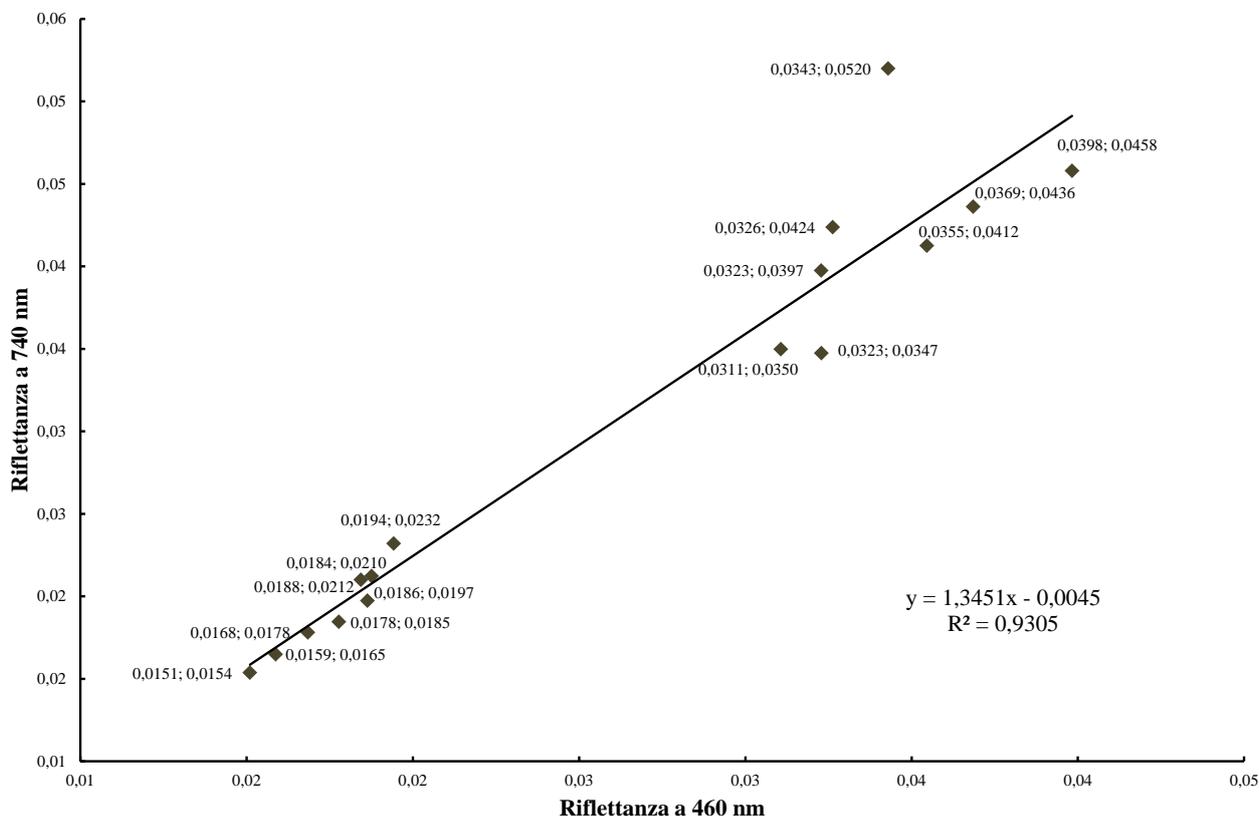


Figura 4.1-18 – Cluster relativo ai conglomerati bituminosi studiati utilizzando le lunghezze d’onda a 460nm e 740nm.

Al fine di poter stimare la percentuale di bitume utilizzata nelle singole miscele è stato definito un indice spettrale che tenesse conto della relazione tra le due lunghezze d’onda individuate. E’ stato quindi calcolato, sia per i provini (fig. 4.1-19) che per lo sciolto (fig. 4.1-20), un indice spettrale denominato  $VIS_{index}$ :

$$VIS_{index} = \frac{Rifl_{460nm}}{Rifl_{740nm}}$$

Dove, il termine al nominatore è il valore di riflettanza alla lunghezza d’onda di 460nm mentre quello al denominatore si riferisce al valore di riflettanza alla lunghezza d’onda di 740nm. La relazione tra questo indice e la percentuale di bitume fornisce dei valori di correlazione elevati. Valori di  $R^2$  superiori a 0.90 si riscontrano nelle miscele porose costipate nonché in entrambe le miscele sciolte. Sebbene la miscela compatta non costipata presenti valori di accuratezza inferiore, questo non è comunque inferiore all’80%, testimoniando comunque la sua attendibilità analitica.

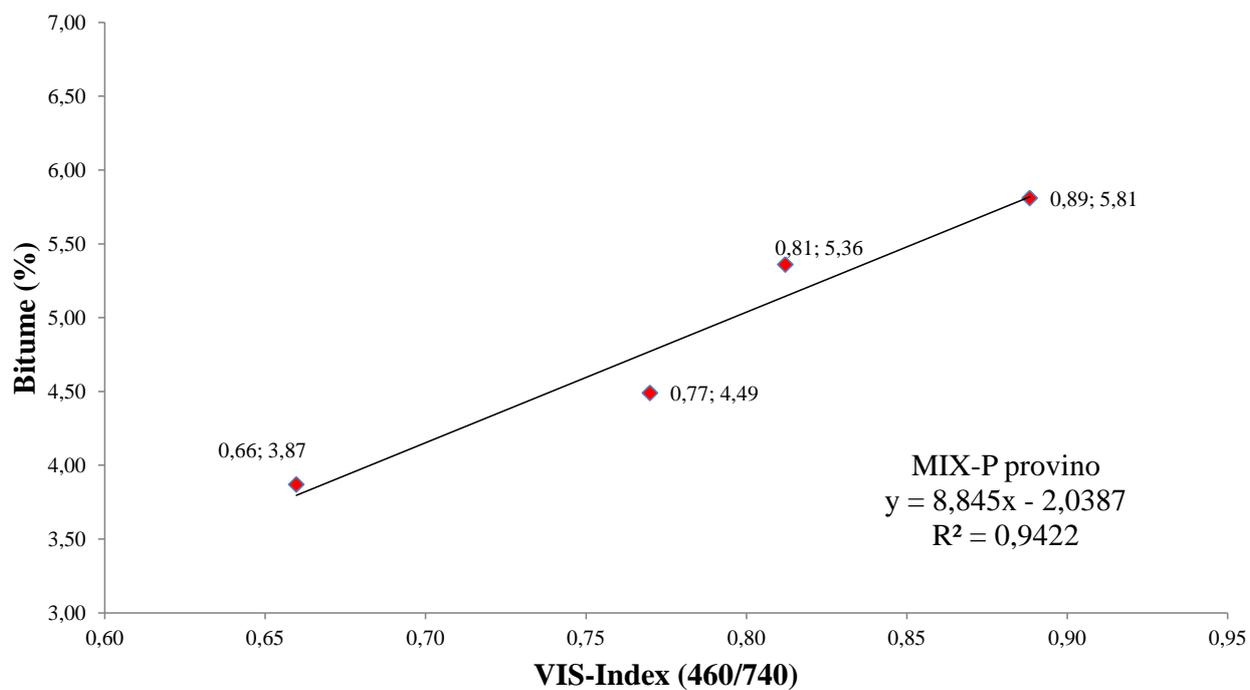
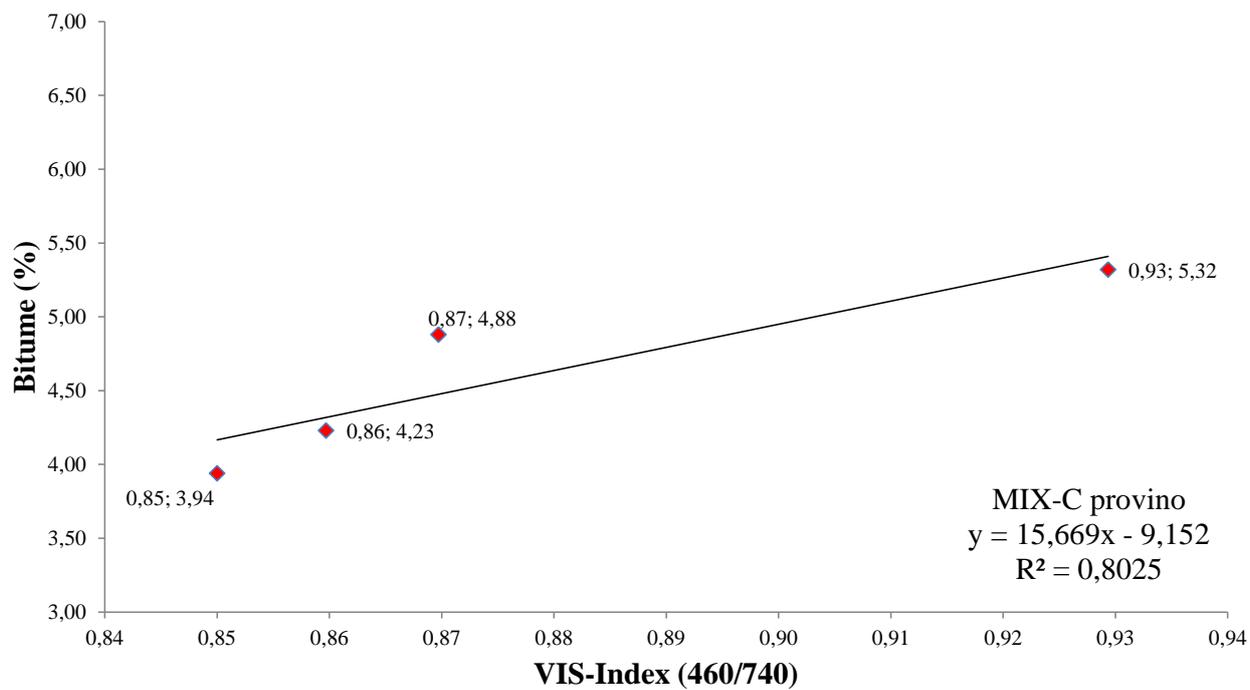


Figura 4.1-19 – Regressioni lineari nei provini per la stima della percentuale di bitume tramite indice spettrale

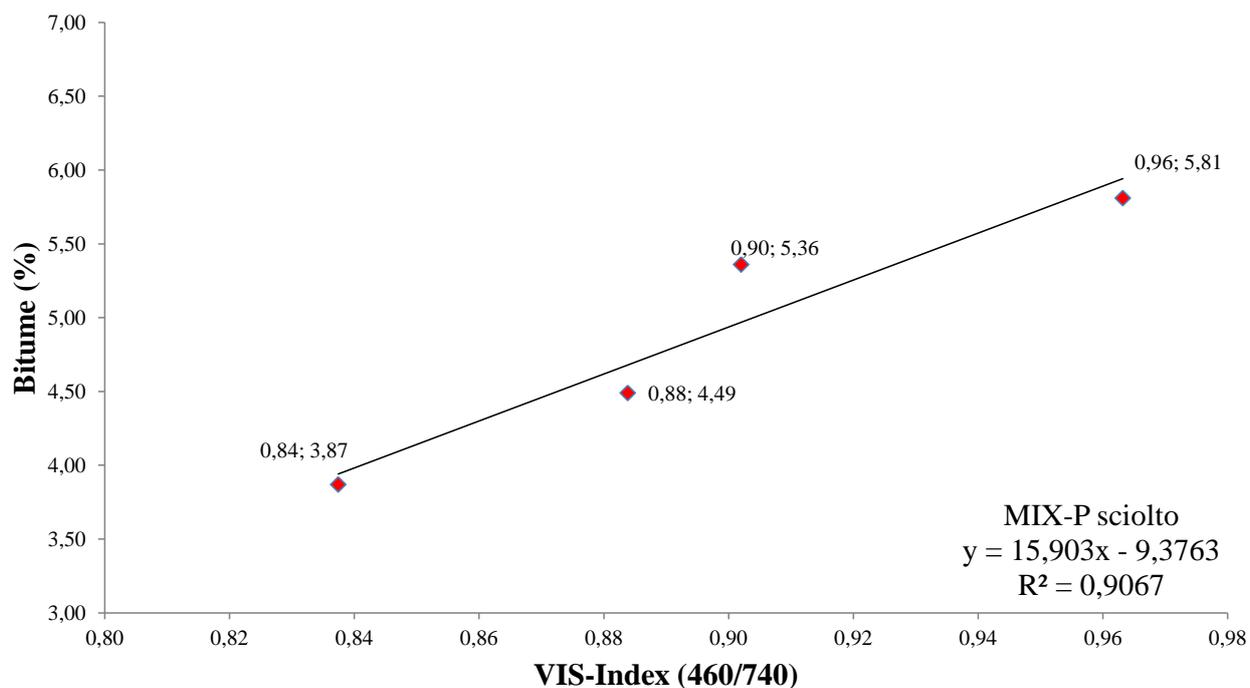
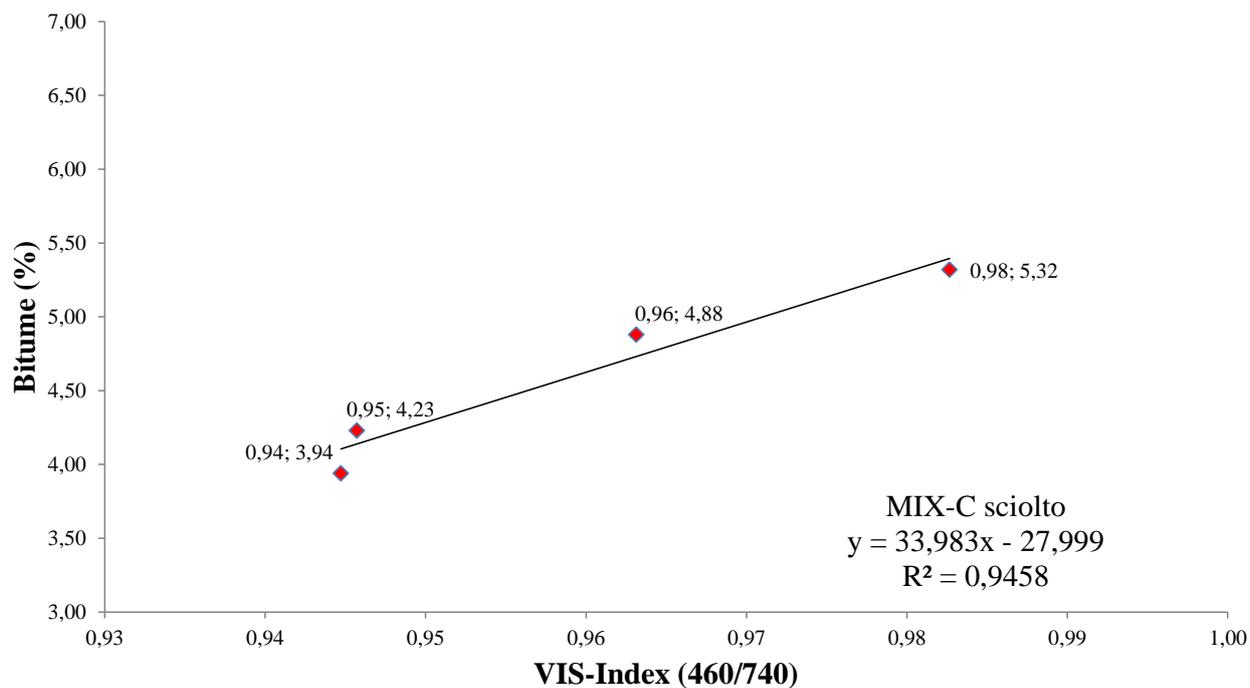


Figura 4.1-20 – Regressioni lineari nei piatti per la stima della percentuale di bitume tramite indice spettrale

Le modeste variazioni di riflettanza al variare del contenuto di bitume non consentono di determinare l'esatta percentuale di bitume, tuttavia permettono di apprezzare in termini spettrali variazioni del contenuto di bitume dell'ordine dell'1% in massa degli aggregati. Utilizzando indici spettrali è quindi possibile identificare, per singola miscela, un modello di regressione lineare in grado di stimare la percentuale di bitume presente in un provino di conglomerato bituminoso.

#### 4.1.3.2 Risultati sperimentazione su Dataset 2

Sono stati acquisiti quattro set di dati, composti da 20 firme spettrali, ciascuno riguardanti un aggregato di natura basaltica di tipo leggero di diametro compreso tra i 32 e i 150 mm ed uno di tipo *ballast* di diametro compreso tra i 31,5 e i 50 mm (figura 4.1-6). I valori radiometrici sono espressi in valori di riflettanza mediante acquisizione spettrometrica ed elaborazione preliminare tramite software ViewSpecPro della A.S.D come per il precedente data set.

Come per il dataset 1, le acquisizioni sono state effettuate utilizzando un bianco in *Spectralon* di riferimento. La firma media del binder rispetto a quella dell'usura risulta avere dei valori di riflettanza maggiori su tutto lo spettro elettromagnetico analizzato evidenziando un lieve picco di assorbimento all'introno dei 2340nm ( $R^2=0.78$ ) (figura 4.1-21). Considerati i bassissimi valori di riflettanza ottenuti, si è deciso di integrare tale analisi utilizzando un grigio di riferimento costituito da una pastiglia di carbone. Quest'ultima è stata realizzata attraverso il procedimento per la realizzazione di pastiglia pressata per analisi in Fluorescenza a raggi X a dispersione di energia (ED-XRF). Tale procedimento prevede l'omogeneizzazione di un campione di carbone solido, finemente macinato, e la sua miscelazione con un cera microcristallina in proporzione di 4.0 grammi di campione su 0.9 grammi di cera. Questa miscela viene sottoposta, mediante pressa idraulica manuale, ad un carico medio di 4-5 quintali al fine di ottenere una pastiglia.

Le due curve spettrali ottenute con questo riferimento (figura 4.1-21) risultano maggiormente distinguibili. In particolar modo il picco di assorbimento a 2340nm rilevato con il bianco di riferimento è molto più evidente. Si rilevano inoltre altri due picchi di assorbimento molto ben definiti a 1725 nm e a 1920 nm nonché due accennati a 2150nm e a 1360nm circa.

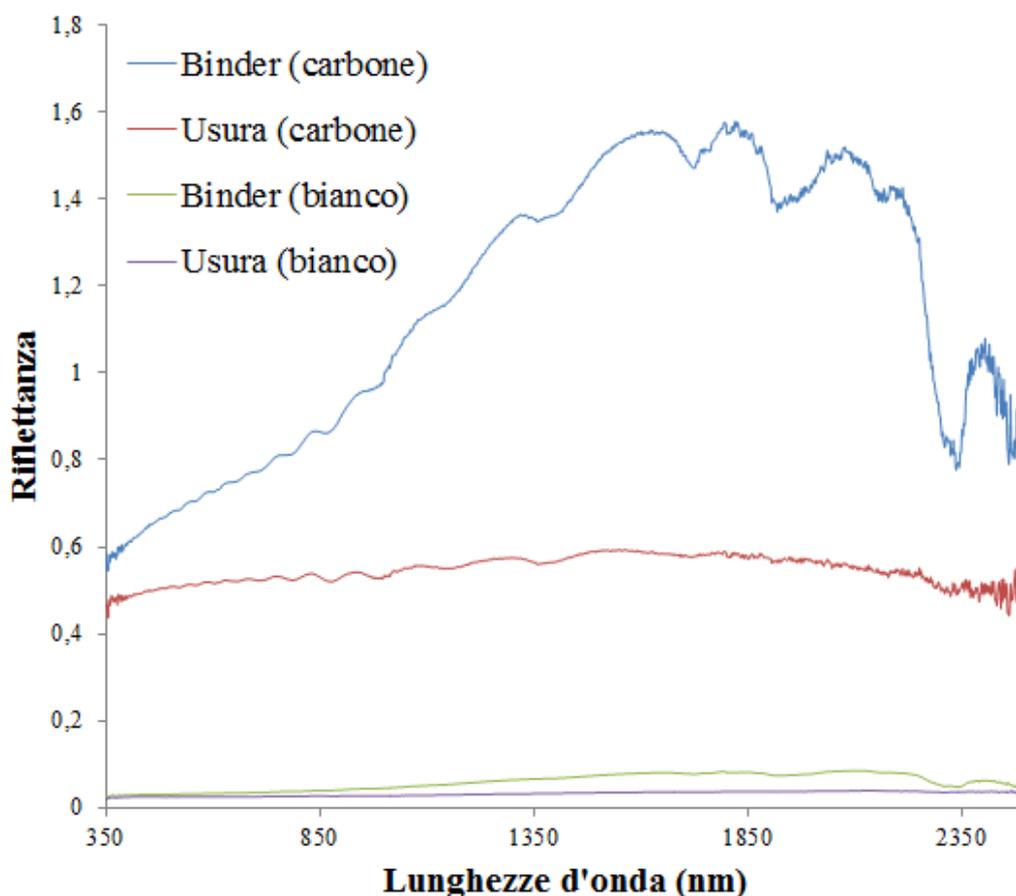


Figura 4.1-21: Analisi campioni di strati di usura e binder mediante l'utilizzo di riferimenti in *Spectralon* e pastiglia di carbone.

Dai risultati ottenuti si evince la possibilità di differenziare mediante tecniche spettrometriche queste due tipologie di stratificazioni comunemente adoperate nella realizzazione della parte superficiale di una strada.

#### 4.1.3.3 Risultati sperimentazione su Dataset 3

L'ampliamento del dataset ha prodotto la realizzazione di una libreria spettrale costituita da 58 spettri riguardanti conglomerati bituminosi di tipi diversi. Proprio per la loro diversità non è possibile modellare una equazione in grado di definirne il contenuto in bitume bensì è possibile verificare la correlazione esistente già identificata con il solo dataset 1, utilizzando le lunghezze d'onda a 460nm e 740nm.

Il dataset utilizzato ha migliorato la rappresentatività statistica del risultato della clusterizzazione riportando una accuratezza superiore di quella ottenuta mediante l'utilizzo del solo dataset 1. Tale evidenza di correlazione tra bande nell'ambito dei conglomerati bituminosi è stata oggetto di verifica nel proseguo della tesi, sia con dati di campo che satellitari.

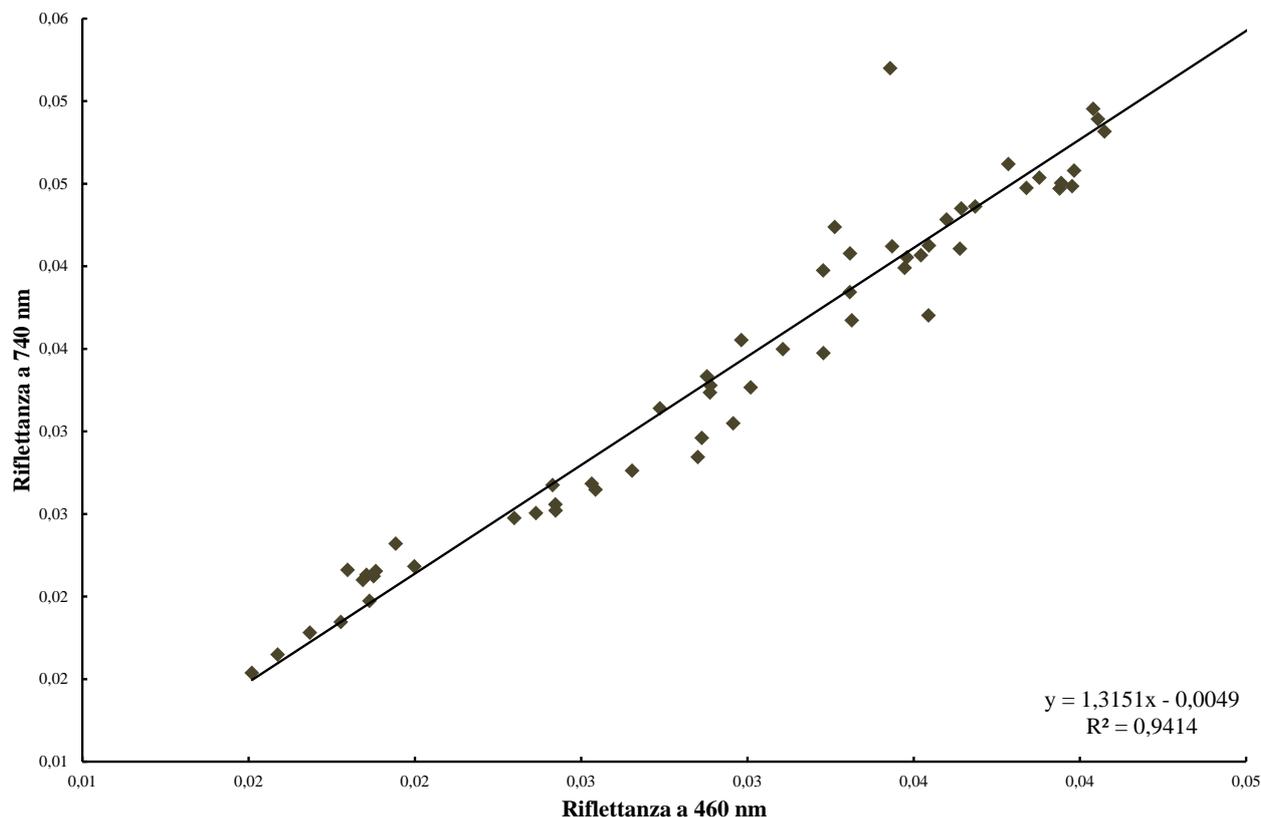


Figura 4.1-22: Scatter plot tra le lunghezze d'onda a 740nm e 460nm.

L'analisi delle firme spettrali ottenute a partire dai tre dataset analizzati in laboratorio, pone lo spettrometro come metodo analitico innovativo e non distruttivo nell'ambito di indagini in ingegneria stradale di laboratorio.

Questo studio mostra come sia possibile applicare il rilievo radiometrico allo studio degli aggregati per valutare caratteristiche di litologia, porosità e condizioni di contenuto d'acqua degli inerti. Infine, mediante l'utilizzo del rapporto dei valori di riflettanza relativi alle lunghezze d'onda a 460nm e 740nm, è possibile stimare la percentuale di bitume impiegata per variazioni superiori all'1%.

## 4.2 PROVE DI ADESIONE

I sistemi di telerilevamento ottico hanno la capacità di restituire informazioni quantitative e qualitative degli oggetti indagati che variano a seconda della struttura fisico-chimica degli stessi. Tra gli aspetti di maggiore rilevanza nel campo dell'ingegneria e sicurezza stradale vi è la capacità di poter quantificare la presenza di bitume che ricopre gli inerti. Se da una parte questa è direttamente proporzionale alla affinità del bitume a legarsi agli inerti (influenzando in maniera importante sulle caratteristiche tecniche di un conglomerato bituminoso), dall'altra parte la presenza o meno del bitume sugli inerti superficiali fa sì che questi ultimi siano posti a diretto contatto con le gomme degli autoveicoli aumentandone l'attrito e quindi la sicurezza. Quest'ultimo aspetto è particolarmente rilevante subito dopo l'apertura al traffico in un tratto di strada con asfalto nuovo.

L'obiettivo di questa seconda fase di laboratorio è quello di individuare delle relazioni in grado di collegare le analisi radiometriche all'affinità dello stesso a legarsi con gli inerti considerati in modo tale da poter proporre una metodologia alternativa alla valutazione soggettiva che viene comunemente effettuata da parte di operatori. Per fare ciò si è fatto riferimento alla prova relativa alla Norma UNI EN 12697-11 "Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo – Parte 11 - Determinazione dell'affinità tra aggregato e bitume".

Per analizzare i campioni costituiti da materiale basaltico e calcareo relativi ai diversi step temporali previsti dalla prova, è stata realizzata una piattaforma multisensore ad immagini e puntuale di tipo ottico. È stato quindi definito l'Indice dei Clasti Esposti (ICE) in grado di determinare i clasti esposti presenti in ogni immagine acquisita al fine di ottenere una quantificazione oggettiva del bitume rimosso attraverso la prova di adesione. L'ICE, calcolato attraverso due tipologie di classificazioni (supervisionata e non supervisionata) permette di quantificare la perdita del bitume superficiale causato dalle differenti tempistiche della prova. I risultati sono stati infine confrontati con le valutazioni effettuate, come da norma, dalla interpretazione di diversi operatori. L'adozione di tali tecniche di elaborazione dati ha permesso di quantificare in maniera estremamente precisa un dato altresì dipendente dalla soggettività degli operatori coinvolti.

### 4.2.1 Metodologia e dati

#### 4.2.1.1 Prove di adesione

Il grado di adesione del bitume all'aggregato influenza moltissimo le prestazioni meccaniche di un conglomerato bituminoso e la vita utile di una pavimentazione. La norma UNI EN 12697-11 specifica le procedure per la determinazione dell'affinità tra aggregato e bitume secondo tre differenti metodi: metodo della bottiglia rotante, metodo statico e metodo di strappaggio con acqua bollente. Tra questi tre il primo metodo è stato scelto per lo svolgimento della ricerca. La determinazione dell'affinità tra bitume e aggregato viene espressa in termini di valutazione visiva del grado di copertura del bitume sulle particelle non compattate di aggregato dopo l'agitazione meccanica in acqua. L'apparecchiatura prevede un girabottiglie a velocità regolabile in grado di far ruotare 3 bottiglie di prova in Pyrex (diametro: 86mm, altezza: 176mm) ad una velocità compresa tra  $40 \text{ min}^{-1}$  e  $60 \text{ min}^{-1}$ .



Figura 4.2-1: Prova norma UNI EN 12697-11

La norma prevede 3 diverse fasi preparatorie attraverso le quali vengono preparati gli aggregati, il bitume ed i parametri di condizionamento. Per quanto riguarda la fase preparatoria degli aggregati questa prevede l'analisi granulometrica al fine di separare almeno 600g di aggregato passante al setaccio da 11.2mm e di

trattenuto al setaccio da 8mm in modo tale da formare una frazione di aggregato da testare compreso tra 8 e 11mm in conformità alla Norma EN 12697-2. Gli aggregati così ottenuti vengono risciacquati e poi posti in forno a 110°C fino all'ottenimento di un valore di massa stabile. In un miscelatore viene introdotto una quantità di 510g di aggregati che viene miscelato, dopo opportuna preparazione, con 16g di bitume fino al raggiungimento di un ricoprimento totale degli aggregati da parte del bitume. La fase di condizionamento prevede inizialmente un periodo di riposo compreso tra le 12h e le 64h. Dopo tale periodo il materiale viene frazionato in tre parti da 150g e inserito nelle 3 bottiglie in Pyrex e infine riempito con circa il 50% del volume con acqua distillata a temperatura di circa 5°C. Il tutto viene miscelato al fine di ridurre le aderenze tra gli aggregati ed infine portare a livello. Tale procedura viene realizzata nel minor tempo possibile.

Per quanto riguarda l'esecuzione della prova in sé, questa viene effettuata tramite rotazione delle bottiglie a velocità controllata di 40 min<sup>-1</sup>. I tempi di rotazione, e quindi le letture sono cadenzati a 6h, 24h, 48h e 72h. Per la lettura, la procedura prevede prima il risciacquo delle miscele, dopodiché si procede con la stima visiva che viene effettuata da almeno due diversi osservatori secondo uno schema di riferimento per la stima del grado di ricoprimento del bitume. Sebbene la Norma preveda una procedura molto dettagliata di tutte le diverse fasi, si possono riscontrare alcuni elementi di incertezza che possono inficiare la riproducibilità delle letture e la ripetibilità delle analisi. Tali gap sono riassunti nei seguenti punti:

1. La norma prevede l'utilizzo di uno schema per la stima del grado di ricoprimento del bitume che presenta però solo gli intervalli di misura maggiori (100-95-90-80-60-40-20%) tralasciando la possibilità di risalire alla lettura di percentuali intermedie.
2. Difficoltà nel risalire alla percentuale di bitume che ricopre i clasti a seconda del tipo di aggregato considerato a causa dell'influenza dovuta dal loro colore e dalla loro luminosità; tale difficoltà è accentuata su aggregati scuri dove la differenza tra aggregato e bitume è meno evidente da rilevare.
3. Mancanza di una procedura ufficiale per il calcolo dell'accuratezza delle letture effettuate.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 tali aspetti vengono esplicitamente riportati all'interno della Norma stessa.

Considerando che la capacità di adesione del bitume agli aggregati influisce sull'insorgere di fenomeni di ammaloramento come sgranamenti o fessurazioni, è pertanto di fondamentale importanza definire nuove metodiche analitiche in grado di ovviare a tali problematiche.

#### **4.2.1.2 La piattaforma multisensore**

La piattaforma multisensore è composta da 3 unità in grado di acquisire dati in diversi modi e in diversi intervalli spettrali che vanno dal visibile all'infrarosso medio. La piattaforma è composta da uno spettrometro puntuale Fieldspec 4 della A.S.D. con intervallo spettrale che va da 350nm a 2500nm, un sottosistema VIS-NIR di imaging iperspettrale *Specim Inspector spectrometer*, con intervallo da 400nm a 1700nm ed una camera fotografica digitale reflex Nikon d7000 ad alta risoluzione che acquisisce unicamente nel visibile. I campioni analizzati vengono posti su un campionatore montato su nastro trasportatore il quale spostandosi colloca il campione sotto i diversi sensori che effettuano le acquisizioni. Il campionatore è costituito da una tavoletta dotata di riferimenti metrici bianchi e neri, utili alla rettifica geometrica dei dati a immagine mentre il sistema di illuminazione è stato ottimizzato affinché vi sia la giusta quantità di luce per ogni strumento. In figura 4.2-2 viene riportata la piattaforma con struttura in alluminio mentre nei paragrafi successivi vengono riportate le specifiche tecniche e di misura di ogni singolo sottosistema.



*Figura 4.2-2: La piattaforma multisensore realizzata presso il laboratorio di Idraulica del DICEA-La Sapienza*

#### ***Analisi spettroradiometriche***

Durante le misure di laboratorio sono stati acquisiti dati di riflettanza nell'intervallo 350 - 2500 nm mediante uno spettroradiometro Fieldspec 4 della Analytical Spectral Devices (Inc. Boulder, CO, USA). I valori di riflettanza, acquisiti nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350 e 2500nm, sono dati dal rapporto tra la radiazione incidente (sorgente luminosa artificiale ProLamp-ASD) riflessa dal target e la radiazione incidente riflessa da un pannello di riferimento di *Spectralon* (superficie lambertiana). Le caratteristiche di questo strumento si possono considerare uguali a quelle adoperate nella fase di laboratorio 4.1. al quale si rimanda.

Anche in questo caso si è scelto di operare con un campo di vista dello strumento di 25°, fibra ottica posta a 8cm dal supporto, garantendo così una misura centrata sul campione. In condizioni di laboratorio, la risposta spettrale del pannello di riferimento su tutto l'intervallo di lunghezze d'onda indagato è pari ad 1 come valore di riflettanza. Questo permette di normalizzare la misura radiometrica rispetto alla quantità massima di radiazione incidente nelle condizioni sperimentali adottate. Come per la prima parte dei test di laboratorio, i problemi legati alle eterogeneità granulometriche del campione sono state ovviate mediando gli spettri misurati in diverse posizioni ed orientazioni del campione stesso. Inoltre, al fine di garantire una

buona qualità del dato analitico, il pannello di riferimento è stato misurato all'inizio ed alla fine di ogni sessione di misura.

### ***Digital RGB image processing***

Le tecniche di analisi di immagini sono impiegate in diversi ambiti a partire da quello ambientale dove, elaborazioni statistiche di foto digitali (ripresi con fotocamere reflex "commerciali") vengono effettuate al fine di quantificare alcune grandezze altrimenti difficilmente parametrizzabili. In ambito ingegneristico questo tipo di analisi ha mostrato negli ultimi anni ottimi risultati nell'analisi delle caratteristiche morfometriche degli aggregati sia in forma sciolta che in provini (Bessa et al. 2012) e nella ricostruzione di curve granulometriche a partire da fotografie di sezioni di provini (Bruno et al. 2012) o di sezioni sottili (Marinoni et al. 2005). Inoltre, l'applicazione di sistemi alternativi a prove di tipo classico ingegneristico, come quella relativa all'adesione del bitume, è stata affrontata mediante l'adozione di metodiche semi-automatiche non distruttive in occasione dell'*8th International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)* (Lamperti et al. 2016).

Questa parte del lavoro è stata sviluppata per cercare di mettere a punto una metodologia di analisi, tramite elaborazioni di foto RGB, per la determinazione del livello di esposizione degli inerti all'atmosfera, in modo tale da poter supportare studi legati all'affinità del bitume agli aggregati e più in generale al deterioramento superficiale del manto stradale.

Per l'acquisizione è stata utilizzata una fotocamera digitale reflex NIKON modello D7000 avente le seguenti caratteristiche: Sensore CMOS da  $23,6 \times 15,6$  mm; pixel totali: 16,9 milioni, Dimensione dell'immagine (pixel)  $4.928 \times 3.264$ , formato di acquisizione NEF (RAW) a 12bit, obiettivo 18/50mm. La camera è stata posta ad una altezza fissa di circa 50 cm in modo tale da centrare il provino e ottenere la massima risoluzione. Per quanto riguarda l'elaborazione delle foto digitali, queste hanno subito una fase iniziale di *pre-processing* attraverso la quale è stato possibile normalizzare e co-registrare l'intero dataset.

### ***Hyperspectral Imaging***

I Sistemi Iperspettrali ad immagini rappresentano un'interessante alternativa alle tecnologie classiche. Infatti, combinando misure di riflettanza spettrale e metodologie di elaborazione delle immagini, tali sistemi possono rendere possibile la stima della percentuale di bitume rimosso a seguito di fenomeni di usura superficiale. Inoltre tali sistemi presentano vantaggi come l'alta risoluzione spettrale, spaziale e temporale nonché una notevole rapidità esecutiva e un basso costo rispetto ad altri sistemi presenti sul mercato.

La piattaforma in questione è composta da due spettrometri ad immagine (Specim Inspector spectrometer) in grado di acquisire nell'intervallo di lunghezze d'onda del VIS (400-1000 nm) e NIR (900-1700 nm) e di ricostruire un'immagine iperspettrale (cubo iperspettrale). Tale apparecchiatura è stata già testata in diversi contesti come quello del *waste management* (Moroni et al. 2015) e del monitoraggio della vegetazione (Moroni et al. 2013).

In particolare tale piattaforma è composta da:

- VIS Specim Inspector spectrometer (S1) montato di fronte ad una camera Dalsa Falcon 1.4M100 CMOS (1400× 1024 pixels @ 25 fps, risoluzione spettrale maggiore di 3 nm);
- NIR Specim Inspector spectrometer (S2) montato di fronte ad una camera InGaAs Sensor Unlimited (320× 256 pixels @ 50 fps, risoluzione spettrale maggiore di 3 nm);
- High-speed DVR CORE con due input per il Camera Link utilizzato per acquisire e elaborare i dati;
- Power supply per tutti gli strumenti utilizzati;
- PC per il processamento dei dati e il controllo dell'acquisizione delle immagini.;
- nastro trasportatore per i materiali.

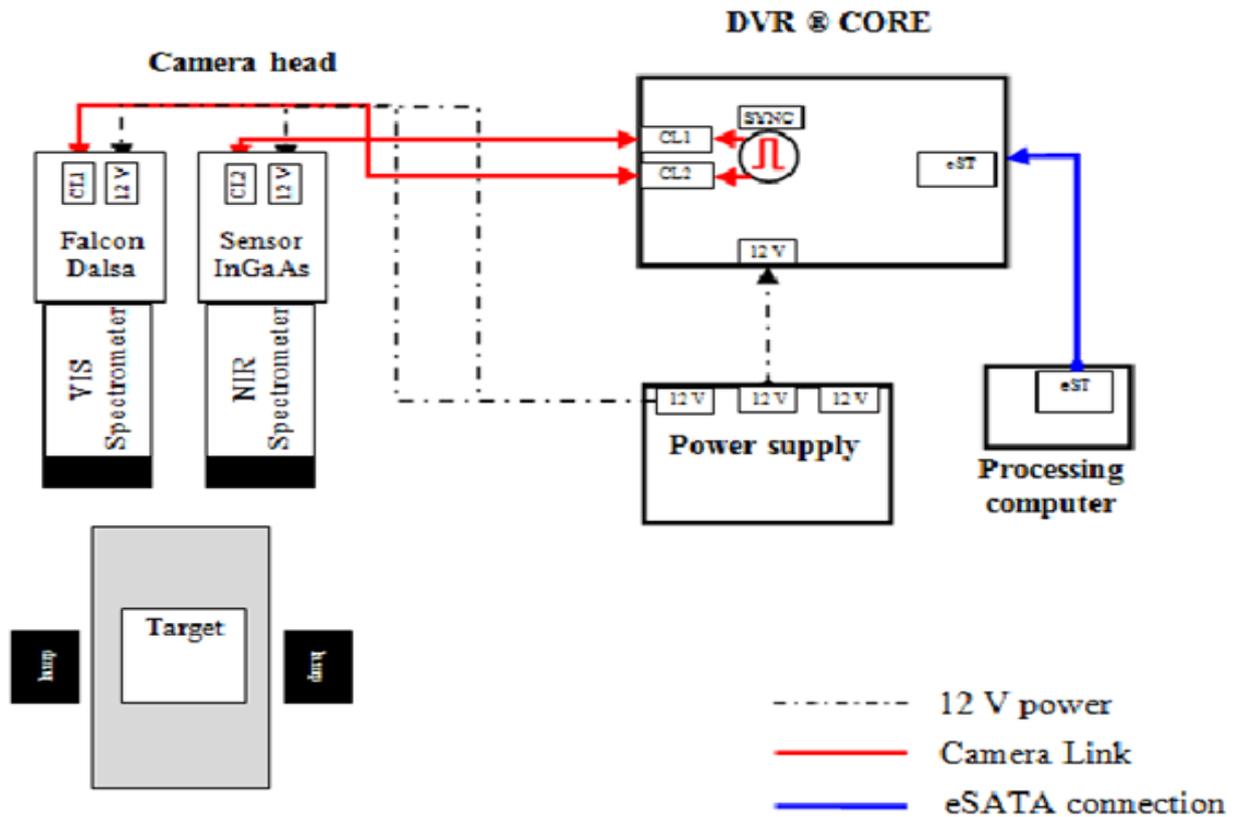


Figura 4.2-3: schema dei collegamenti del dispositivo iperspettrale con spettrometri lineari

Lo spettrometro ad immagine *Specim* scansiona il campione da analizzare attraverso una fenditura (*slit*) e restituisce l'informazione spettrale proveniente dai punti allineati lungo il segmento visto dalla fenditura. Per ottenere le informazioni estese all'intero oggetto bisognerà scansionarlo interamente riga per riga o colonna per colonna, a seconda dell'orientazione della fessura rispetto al sensore utilizzato.

Il funzionamento di uno spettrometro è basato sulla decomposizione della luce attraverso un elemento dispersivo, che può essere un prisma o un reticolo diffrattivo a volume (*grating*). Le onde elettromagnetiche, infatti, nel passaggio da un mezzo all'altro (aria-vetro ottico), vengono disperse con un angolo che dipende dall'indice di rifrazione del mezzo (il vetro ottico).

La maggioranza degli spettrometri sfrutta il principio dell'interferenza per decomporre la radiazione luminosa nelle sue lunghezze d'onda. L'intensità della radiazione così decomposta viene misurata con un fotodiode, un particolare tipo di diodo fotorilevatore che funziona come sensore ottico sfruttando l'effetto fotoelettrico, in grado cioè di riconoscere una determinata lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica incidente (assorbimento del fotone) e di trasformare l'energia trasportata dall'onda in un segnale elettrico di corrente applicando ai suoi estremi un opportuno potenziale elettrico. Esso è pertanto un trasduttore da un segnale ottico ad un segnale elettrico. Il materiale con cui è prodotto è di importanza cruciale per il suo funzionamento, poiché da esso dipende l'energia minima che il fotone dovrà possedere per poter generare la foto corrente.

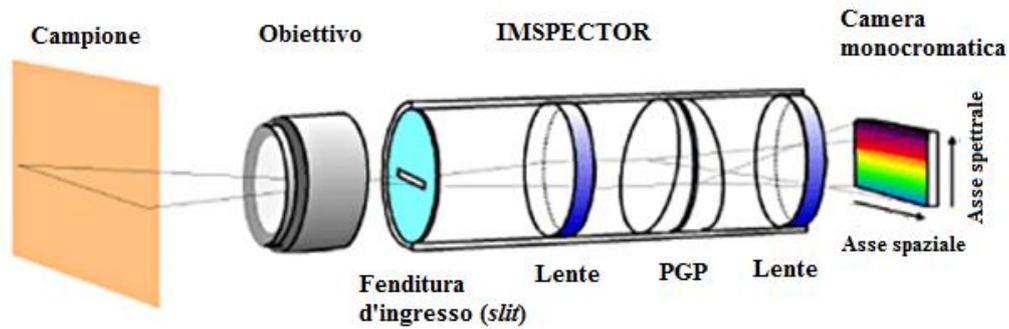


Figura 4.2-4 Schema funzionale dello spettrometro Specim Inspector con i principali elementi che lo compongono.

La telecamera Dalsa Falcon 1.4M100 è stata accoppiata a dispositivi spettrali che acquisiscono informazioni per le lunghezze d'onda che possono essere rilevate dalla telecamera stessa, ovvero nel campo del VIS-NIR (400-1000 nm). Per acquisire nel campo del NIR è stata utilizzata una telecamera Sensor Unlimited SU320M-1.7RT con tecnologia InGaAs. Il sensore di questa telecamera è costituito da una matrice bidimensionale (320×256 pixels quadrati di dimensioni pari a 25×25 μm) all'arseniuro di indio e gallio, in grado di acquisire fino a 50 immagini al secondo. L'arseniuro di indio e gallio è stato scelto perché sensibile alle radiazioni comprese nell'intervallo di lunghezze d'onda 900-1700 nm e quindi in grado di produrre effetto fotoelettrico a tali lunghezze d'onda.

La dinamica di questa telecamera è di 12 bit con possibilità di acquisire anche 8 bit. Il principio di funzionamento della telecamera Sensor Unlimited è identico a quello di una normale telecamera, la sua particolarità risiede nella sensibilità del sensore. Il sensore InGaAs è infatti formato da uno strato di silicio sul quale è alloggiato un dielettrico, l'arseniuro di indio e gallio (InGaAs). Tale materiale ha proprietà fotoelettriche migliori del silicio, ma presenta l'inconveniente di drogare il silicio stesso durante la fase di drogaggio del sensore, operazione necessaria per creare le connessioni elettriche. La fabbricazione di questi sensori è quindi estremamente complicata e lunga; questo spiega il motivo per cui il costo di un sensore di questo tipo è di gran lunga superiore a quello di un normale sensore al silicio, senza considerare che la risoluzione è circa quattro volte inferiore.



Figura 4.2-5 Telecamera Dalsa Falcon 1.4M100 e Sensor Unlimited SU320M-1.7RT con tecnologia InGaAs presenti nella piattaforma iperspettrale

Il tutto è montato su una struttura di supporto in alluminio appositamente realizzata per le prove in laboratorio, che oltre alla funzione di supporto per gli spettrometri ospita anche gli alloggiamenti per le lampade e il movimentatore. Poiché il movimentatore procede a velocità costante in una direzione nota, la ricostruzione della scena alle diverse lunghezze d'onda è stata effettuata affiancando determinate righe (o colonne) della sequenza di immagini acquisite. Ciò è stato reso possibile da un'accurata calibrazione del sistema spettrometro-telecamera che risulta dal posizionamento della fessura dello spettrometro perpendicolarmente alla direzione di spostamento dell'oggetto da analizzare sul nastro trasportatore e dell'asse di collimazione dello spettrometro normale al piano del movimentatore.

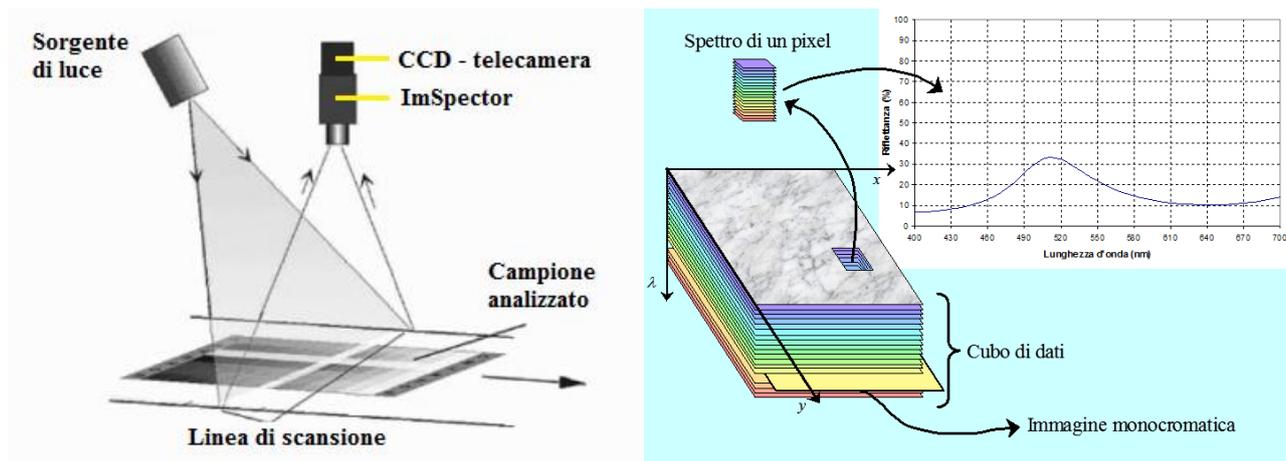


Figura 4.2-6 Schema di una piattaforma iperspettrale con le sue componenti principali e il cubo iperspettrale da essa generato.

Poiché lo spettrometro acquisisce informazioni dal campione lungo una linea di scansione, le immagini acquisite dovranno essere opportunamente elaborate per poter ricostruire l'intera scena scansionata. Si ottengono così  $n$  immagini iperspettrali, ciascuna delle quali rappresenta l'immagine monocromatica, alla lunghezza d'onda  $\lambda_i$  ( $i=1, \dots, n$ ), dell'oggetto ripreso. Le  $n$  immagini iperspettrali possono essere organizzate in una struttura di dati tridimensionale  $(x, y, z)$ , definita cubo iperspettrale (figura 4.2-6). Lungo gli assi  $x$  e  $y$  del cubo iperspettrale sono riportate le informazioni spaziali dell'immagine (coordinate dei singoli pixel), mentre lungo l'asse  $z$  sono riportate le informazioni spettrali ( $i$ -esima lunghezza d'onda rilevata). Considerando un singolo pixel del cubo si può estrarre l'andamento della riflettanza in funzione della lunghezza d'onda, ottenendo la firma spettrale associata al pixel considerato.

Generalmente, per ottenere informazioni sulla tipologia di materiale analizzato, si definisce sull'immagine una Regione di Interesse (ROI), che rappresenta un'area più o meno grande all'interno della quale si estraggono un certo numero di pixel da utilizzare per la caratterizzazione del campione. Si procede poi alla classificazione dell'intera immagine. Al fine di elaborare i dati acquisiti è stato necessario passare per le seguenti fasi:

- **Calibrazione geometrica:** è una procedura che mira alla corretta interpretazione delle informazioni acquisite attraverso le immagini. Ciascuna camera utilizzata ha un'area disponibile per l'acquisizione delle informazioni differente dall'altra. Nel caso della telecamera Dalsa Falcon il numero di pixel è pari a  $1400 \times 1024$ , mentre per la telecamera Sensor Unlimited sarà di  $320 \times 256$  pixel. Dell'area disponibile del sensore solo una parte sarà quella realmente utile all'acquisizione in un determinato intervallo di lunghezze d'onda, che sarà quello del visibile (VIS) per la camera Dalsa Falcon e il vicino infrarosso (NIR) per la camera Sensor Unlimited. La procedura di calibrazione consente alla fine di determinare gli indici di riga e di colonna, a seconda che la fessura dello spettrometro sia rispettivamente allineata con le righe o le colonne della fotocamera, associati a ciascuna lunghezza d'onda. Tale procedura è stata eseguita utilizzando dei filtri tunabili a cristalli liquidi. Tali filtri sono stati interposti fra l'oggetto da analizzare e l'obiettivo accoppiato allo spettrometro. Alla base del funzionamento dei filtri c'è il passaggio selettivo di determinate lunghezze d'onda imposte dall'operatore e quindi l'analisi del segnale acquisito e memorizzato dal sensore per quella lunghezza d'onda. La calibrazione geometrica dei sensori è stata effettuata per entrambi gli spettrometri secondo le indicazioni riportate in Moroni et al. 2013.
- **Creazione del cubo iperspettrale:** è una matrice tridimensionale che contiene le informazioni spaziali lungo l'asse  $x$  e  $y$  e le informazioni spettrali lungo l'asse  $z$ ;
- **Calibrazione radiometrica:** questa fase è necessaria in quanto lo strumento non misura la riflettanza assoluta ma il valore della radianza, cioè solo quella parte della radiazione riflessa dal materiale che possiede sufficiente energia per essere percepita dal sensore; poiché non è possibile conoscere la radiazione incidente, la riflettanza viene quindi calcolata come rapporto fra la radianza fornita dallo strumento e uno spettro di riferimento scelto appositamente. Tale fase è stata necessaria per eliminare la dipendenza delle immagini acquisite dalla strumentazione utilizzata.

- **Raggruppamento ed estrazione delle firme spettrali:** da ciascun pixel del cubo iperspettrale è possibile estrarre una firma spettrale che rappresenta l'andamento della riflettanza in funzione della lunghezza d'onda;
- **Classificazione:** a causa dell'elevata risoluzione spettrale del dispositivo e quindi dell'elevato contenuto di informazioni disponibili, i cubi sono stati trattati in maniera differente sia con classificatori di tipo *supervised* che *unsupervised*.

#### 4.2.1.3 Analisi delle immagini iperspettrali

Per l'analisi delle immagini derivanti sia da acquisizione fotografica che dal sistema iperspettrale da banco, sono stati applicati due sistemi di classificazione distinti sia di tipo non supervisionato che supervisionato. In particolare si è scelto di operare con l'ISODATA e il metodo del parallelepipedo.

L'algoritmo ISODATA assegna ogni pixel al cluster con centro più vicino e ricalcola le posizioni dei centri dopo l'assegnazione. Il numero di cluster non è fissato in alcun modo durante le iterazioni, ma è lasciato libero di variare.

I cluster con un numero piccolo di pixel vengono eliminati, i cluster reciprocamente molto vicini vengono uniti mentre i pixel molto dispersi vengono suddivisi in due. Il numero di cluster può quindi decrescere (per eliminazione o unione) o aumentare (per divisione) durante l'applicazione dell'algoritmo. Rispetto all'algoritmo di base esistono numerose varianti che sono comunque accomunate dalle medesime caratteristiche fondamentali.

I parametri essenziali per l'elaborazione che devono essere forniti dall'utente sono il numero iniziale di cluster ( $K_0$ ), il numero massimo ammesso di cluster ( $K_{max}$ ), il numero minimo ammesso di pixel in un cluster ( $n_{min}$ ), il numero massimo di iterazioni ( $i_{max}$ ), la distanza minima tra i centri di due cluster ( $d_{min}$ ), il numero massimo di cluster che possono essere unificati ad ogni iterazione ( $L_{max}$ ) e il valore massimo di deviazione standard in un cluster ( $\sigma_{max}$ ).

Da un punto di vista matematico un cluster  $\omega_i$  viene eliminato quando il numero di pixel contenuti è inferiore al valore  $n_{min}$  impostato dall'utente; ogni pixel  $x$  del cluster eliminato viene assegnato al cluster  $\omega_k$  con centro  $m_k$  più vicino ad  $x$  fra tutti i cluster non eliminati in modo tale che sia minima la distanza:

$$\rho(m_k, x) = \|x - m_k\| = \sqrt{(x - m_k)^T (x - m_k)}$$

Per tutte le coppie di cluster  $(\omega_i, \omega_j)$  vengono calcolate ad ogni passo le distanze:

$$\rho(m_i, m_j) = \|m_i - m_j\| = \sqrt{(m_i - m_j)^T (m_i - m_j)}$$

Si identificano tutte le coppie per cui tale valore di distanza sia inferiore alla distanza minima  $d_{min}$  imposta dall'utente ed, indicando con  $L_p$  il numero di coppie candidate per l'unione, il numero di coppie da unire realmente  $L$  è individuato mediante il soddisfacimento della seguente condizione:

$$L = \min(L_p, L_{max})$$

Come già visto nella parte introduttiva, le metodologie di classificazione supervisionata possono essere suddivise in parametriche o non parametriche. Nel nostro caso applicativo si è scelto di adoperare un algoritmo non parametrico, dove la categorizzazione dei dati avviene su semplice base geometrica, senza fondamenti statistici. Ogni pixel è attribuito ad una determinata classe se cade all'interno del relativo *feature space*. L'algoritmo di classificazione adoperato in questo studio è quello del parallelepipedo.

La classificazione mediante parallelepipedi tiene conto della dispersione dei pixel di classe nota per ogni classe. Con il metodo del parallelepipedo, nello spazio ad  $n$  dimensioni (dove  $n$  equivale al numero delle bande) per ogni classe, vengono definiti degli spazi (parallelepipedi nello spazio tridimensionale) intorno al valore di DN medio dell'area campione; tutti i pixel il cui valore ricade nello spazio così definito vengono poi attribuiti a quella specifica classe.

In tale metodo per ogni classe vengono considerati unicamente gli elementi diagonali della matrice di covarianza, ovvero le varianze, mentre vengono ignorati gli elementi fuori diagonale, ovvero le correlazioni.

La regola di decisione è che un pixel viene assegnato a una classe se il suo valore è compreso nei limiti corrispondenti ai valori più alti (massimo) e più bassi (minimo) definiti sui training pixel per ogni classe.

$$\text{Un pixel } \kappa \in \omega_i \text{ se } \text{Inf}_i \leq \kappa \leq \text{Sup}_i \text{ per } i=1, \dots, K$$

Mentre se un pixel non soddisfa tale condizione viene assegnato alla classe non classificato. Infine può accadere che le classi presentino gradi diversi di correlazione e valori alti di covarianza fra le classi vengono mal descritti da regioni di decisione di tipo rettangolare. Tale inconveniente può essere superato se oltre ai parametri di media e varianza si tiene conto della covarianza, cioè del fatto che i dati si distribuiscano nello spazio multispettrale formando delle nuvole di punti. Si tratta di un classificatore con elevata efficienza computazionale dove la sensibilità della classificazione risiede nel fatto che maggiore è la variabilità di una classe e maggiore sarà l'area definita dal parallelepipedo e quindi maggiore sarà la probabilità di appartenenza di un pixel in quella classe. Tuttavia, nel caso in cui più parallelepipedi si sovrappongano, i pixel possono essere non classificati o essere classificati secondo regole parametriche.

## 4.2.2 Risultati e correlazioni

### 4.2.2.1 Prove di adesione

Le prove di adesione sono state condotte in 4 step temporali diversi: 6, 24, 48 e 72 ore. Per ogni step sono state effettuate 3 repliche di modo da avere 12 campioni totali più un campione privo di bitume ed un totalmente ricoperto prima dell'avvio della prova. Tale combinazione è stata ripetuta sia per gli aggregati carbonatici che quelli basaltici per un totale di 28 campioni. In figura 4.2-7 vengono riportate le fotografie del dataset dei materiali ottenuti dopo le prove di adesione .



Figura 4.2-7: Dataset dei materiali derivanti dalle prove di adesione effettuate su calcare (sopra) e basalto (sotto)

Alla fine di ogni prova di adesione i provini ottenuti sono stati sottoposti ad analisi visiva da parte di 16 operatori (molti di più rispetto ai 2 richiesti da norma) per la stima della percentuale di ricoprimento del bitume. I risultati di tale valutazione, effettuata come previsto dalla norma, sono riportati nel figura 4.2-8a. Il grafico mostra come le valutazioni presentino dei valori anche molto distanti tra loro a seconda sia dell'operatore che ha effettuato la lettura che si tratti di campioni di trachite o calcare.

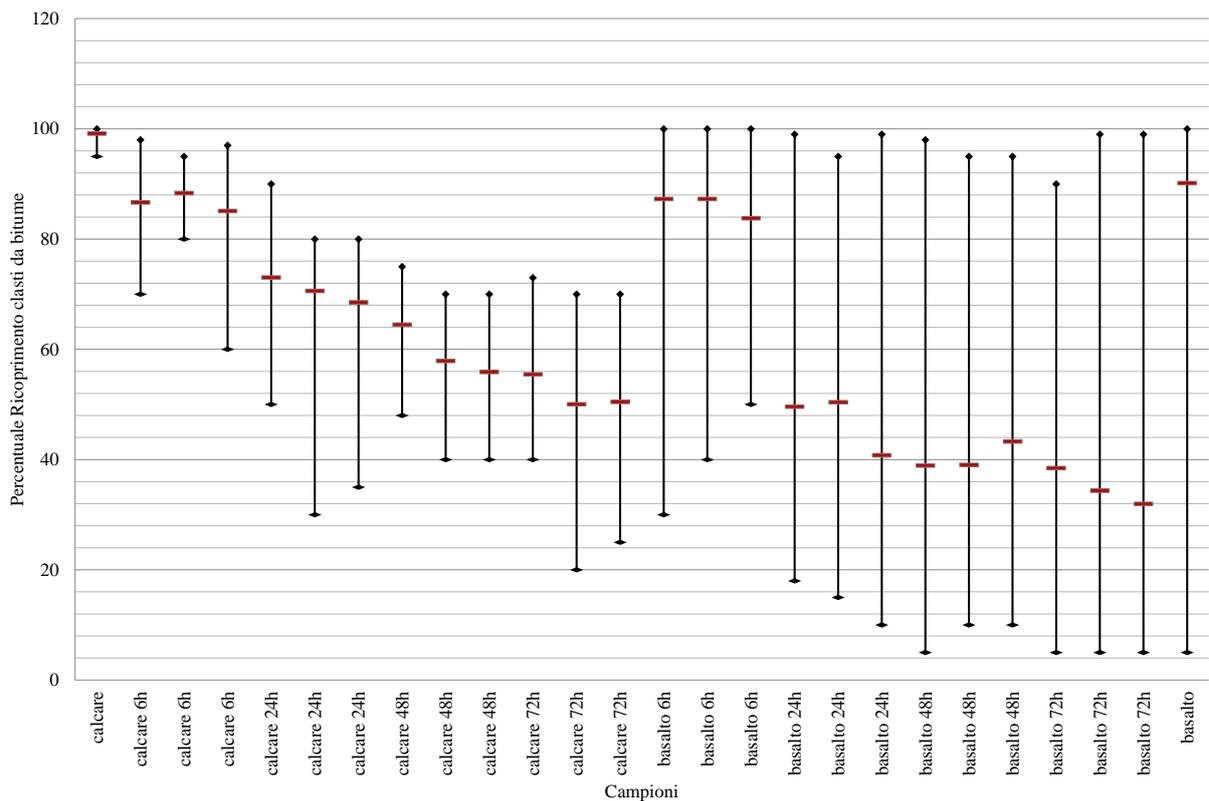
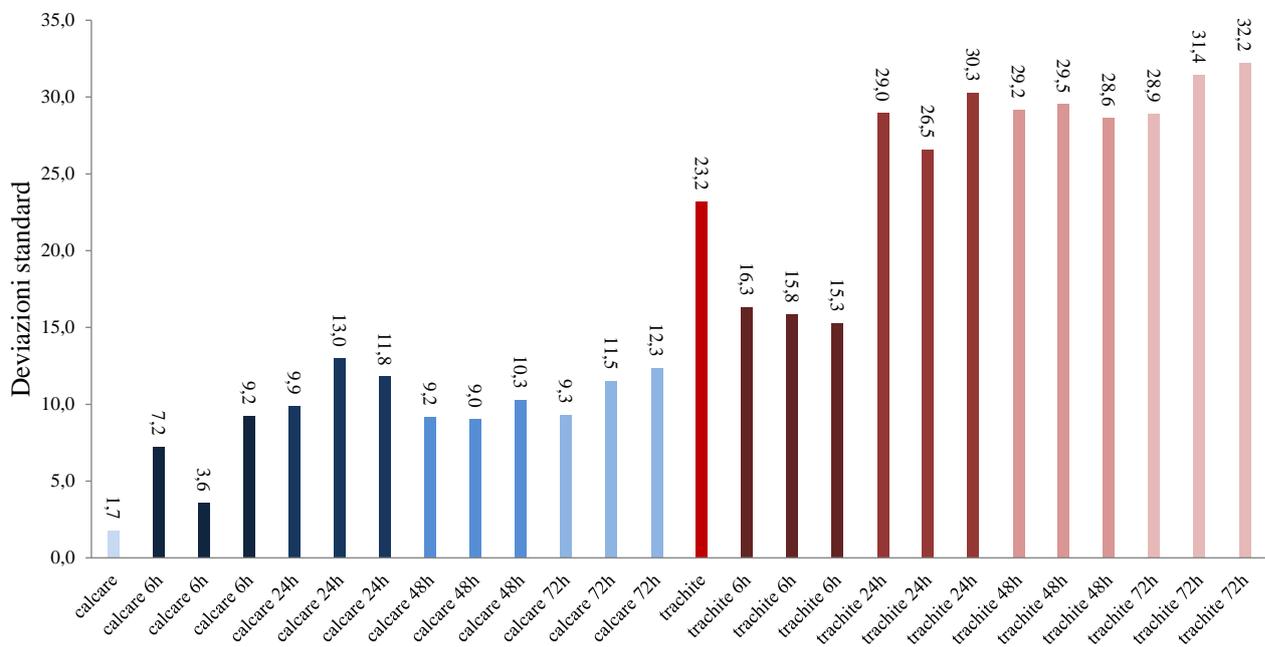


Figura 4.2-8a Valori medi espressi dai valutatori con minimi e massimi



Step temporali suddivisi per tipologia di aggregati

Figura 4.2-8b: trend della variazione di accuratezza delle letture da parte degli operatori in termini di deviazioni standard espressa per ogni campione.

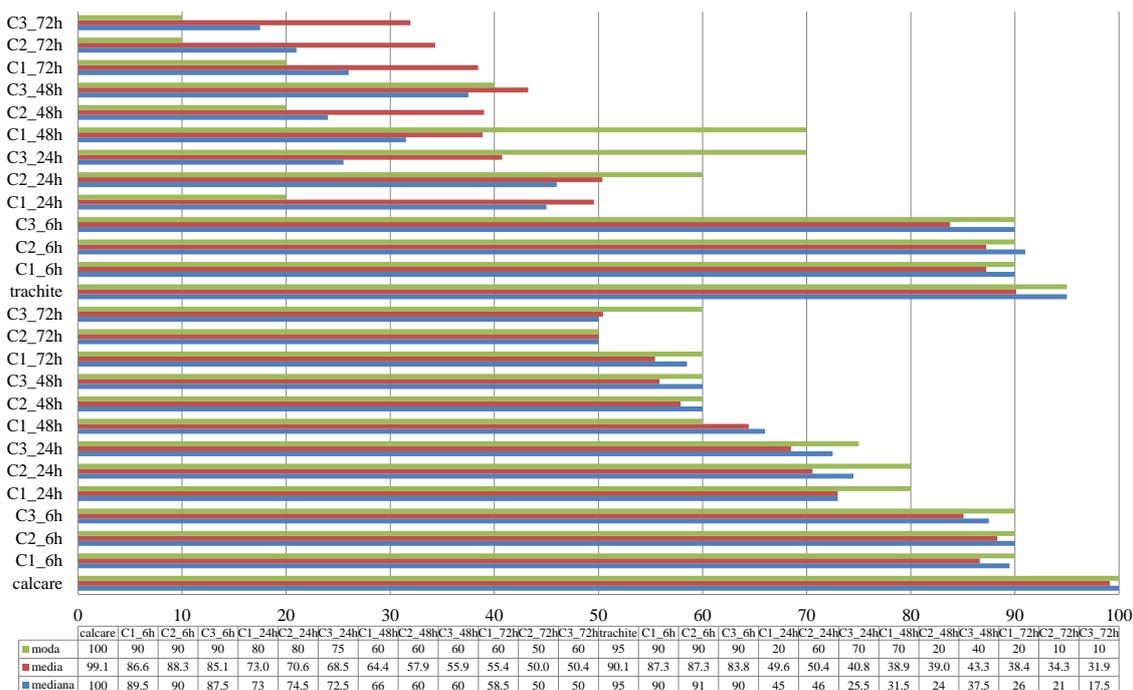


Figura 4.2-8c: variazione tra dati media, mediana e moda

I valori massimi e minimi riscontrati all'interno delle schede di valutazione, e riportate nella figura 4.2-8a mostrano una elevata eterogeneità delle valutazioni. Tale aspetto viene accentuato se si considerano le deviazioni standard calcolate per ogni campione e *step* temporale. La figura 4.2-8b mostra un aumento di tali valori se si passa dalle valutazioni effettuate per la trachite (9.70) al (calcare (26.10). Mediamente, il valore di deviazione standard calcolato su entrambi gli inerti si attesta a 17.90. Il valore più basso è relativo al campione di calcare non bitumato mentre quello più alto è relativo alla trachite a 72h. Risulta pertanto evidente, a causa del minor contrasto di luminosità tra bitume ed inerte, la maggiore difficoltà da parte degli operatori nell'effettuare il rilievo su inerti scuri rispetto a quelli chiari.

Al fine di evidenziare ulteriormente l'elevata variabilità delle valutazioni è stato riportato in figura 4.2-8c il confronto tra media, mediana e moda calcolato per ogni campione. E' possibile notare come tali valori tendano a coincidere per le valutazioni effettuate per i campioni di calcare mentre tendano a discostarsi per quelle effettuate nei campioni di trachite.

#### 4.2.2.2 Analisi spettroradiometriche

Di seguito vengono riportate le firme spettrali acquisite con lo spettroradiometro sui campioni derivati dalle prove di adesione e le tabelle di confronto con indicate le lunghezze d'onda nelle quali è possibile notare dei picchi di assorbimento e riflessione della radiazione elettromagnetica. Per i campioni di calcare sono stati individuati 5 picchi di assorbimento caratteristici posti a diverse lunghezze d'onda nell'intervallo compreso tra 1350 e 2350nm. Nello specifico sono stati considerati i picchi a 1450nm, 1780nm, 1950nm e il doppietto di assorbimento a 2310nm e 2350nm. Inoltre sono state considerate le lunghezze d'onda 460nm e 740nm.

Ciò che si nota a livello di andamento spettrale è l'aumentare del picco di assorbimento a 1450nm e a 1950nm al decrescere del bitume presente sugli aggregati. Si nota inoltre la progressiva scomparsa del doppietto di assorbimento man mano che la prova viene prolungata. Infine è evidente il netto cambio di forma della firma spettrale nell'intervallo 460-740nm che da concava diventa convessa con un progressivo aumento della pendenza.

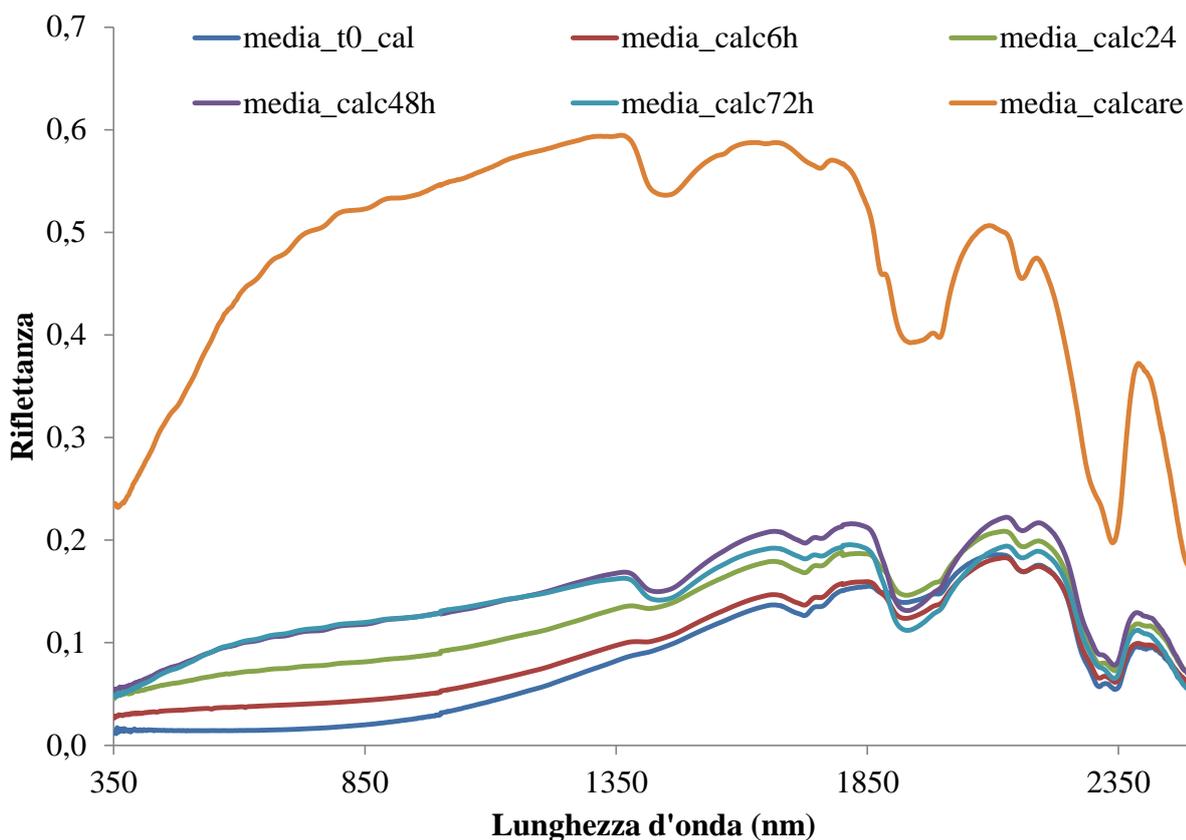


Figura 4.2-9: Firme spettrali con inerti calcarei

Tabella 4.2-1: Valori delle lunghezze d'onda utilizzate per il computo di indici spettrali.

Lunghezze d'onda (nm)	Step temporali calcare						
	0h	6h	24h	48h	72h	no bitume	
1360	0,084	0,099	0,134	0,169	0,163	0,595	
1450	0,097	0,105	0,137	0,151	0,142	0,536	
1780	0,145	0,152	0,183	0,209	0,190	0,570	
1950	0,142	0,127	0,149	0,135	0,116	0,393	
460	0,014	0,034	0,060	0,075	0,073	0,321	
740	0,016	0,040	0,077	0,111	0,113	0,501	
Indici derivati		Valori derivanti dagli indici					
A)	Indice 1 ( $\lambda 1360 - \lambda 1450$ )	-0,013	-0,007	-0,002	0,018	0,020	0,058
B)	Indice 2 ( $\lambda 1780 - \lambda 1950$ )	0,003	0,026	0,034	0,074	0,074	0,177
C)	Indice1/Indice2	-4,220	-0,262	-0,070	0,238	0,275	0,330
D)	Indice 2 <sup>2</sup> (Indice 1+Indice2)	1,057	0,933	0,899	0,788	0,782	0,665
E)	$\lambda 460 / \lambda 740$	0,875	0,835	0,772	0,676	0,641	0,641
F)	(Indice 1/Indice 2)*radq( $\lambda 740 - \lambda 460$ )	-0,190	-0,021	-0,009	0,045	0,055	0,140

A partire dai valori di riflettanza estratti dalle firme spettrali mediate sui campioni afferenti ai diversi step temporali, sono stati individuati e confrontati 6 indici spettrali.

Gli indici A, B e F presentano un trend crescente con l'aumentare del tempo di prova, ossia al ridursi della quantità di bitume adeso agli inerti. Viceversa per gli altri 3 indici. In particolare l'indice F sembra essere quello di essere in grado di meglio separare, e quindi distinguere, i diversi step di prova. I grafici riportati in figura 4.2-10 mostrano l'andamento dell'evoluzione della perdita di bitume a seguito della prova di adesione in termini di indici spettrale.

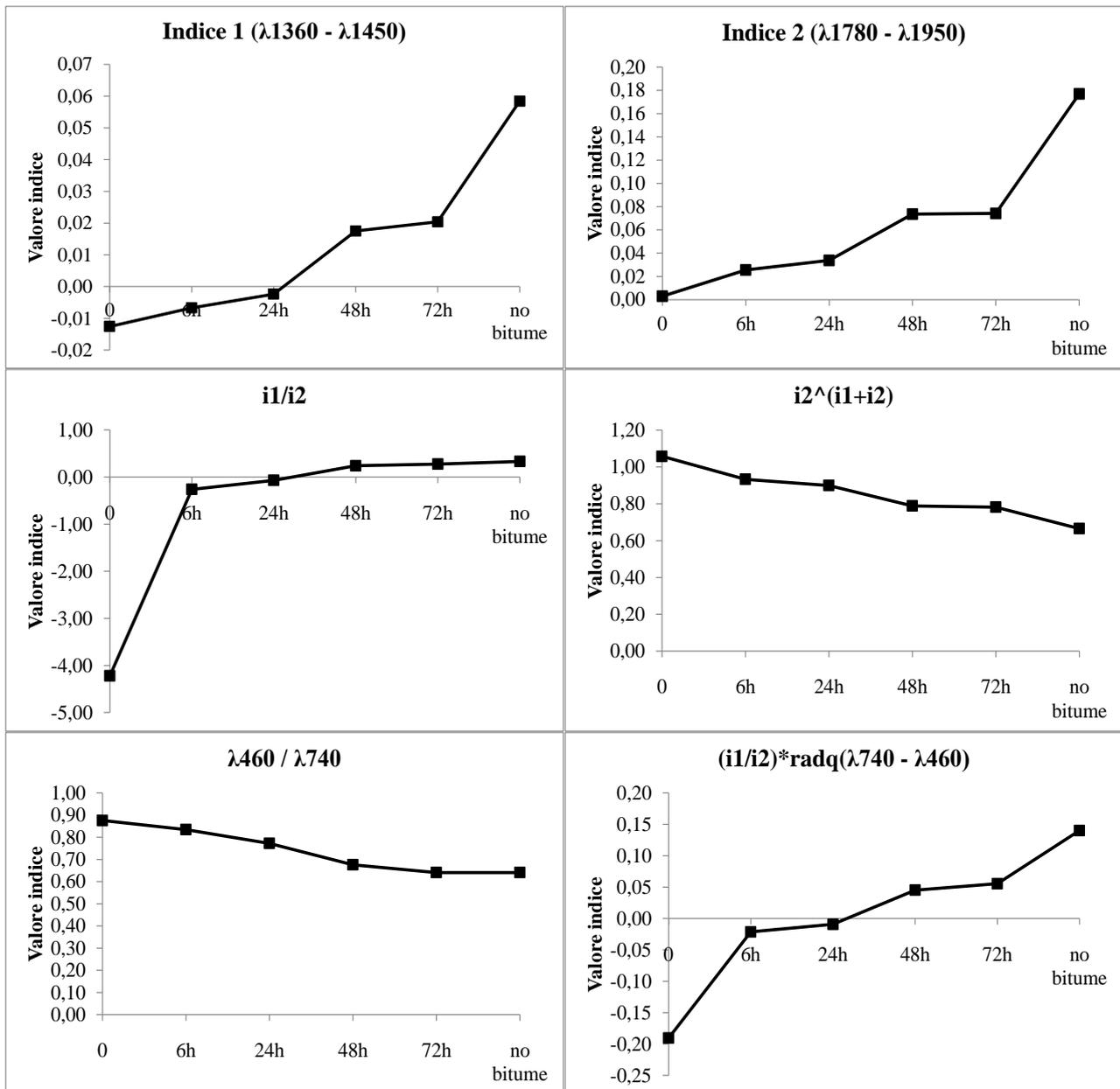


Figura 4.2-10: Curve rappresentative con inerti calcarei dell'avanzamento temporale della prova di adesione e relativo risultato classificativo

Analogamente a quanto fatto per i campioni di calcare, è stata eseguita l'analisi delle firme relative al basalto (figure 4.2-11 e 4.2-12). A prima analisi si riscontra un numero inferiore di picchi di assorbimento rispetto al calcare. Interessanti sono il picco di assorbimento a 1925nm e il doppietto a 2310-2350nm analogo a quello rilevato nelle firme del calcare). Generalmente si nota che, all'aumentare dei tempi di prova vi è un approfondimento del picco a 1925nm e la scomparsa del doppietto sopra indicato. Anche qui sono stati individuati degli indici spettrali i quali vengono riportati in tabella 4.2-2. Tra i 4 indici spettrali individuati l'indice E sembra essere quello che maggiormente sia in grado di distinguere in maniera non ambigua i diversi step, ad eccezione del punto "no bitume" che è al di fuori dal trend di crescita dei valori di indici all'aumentare dei tempi di prova.

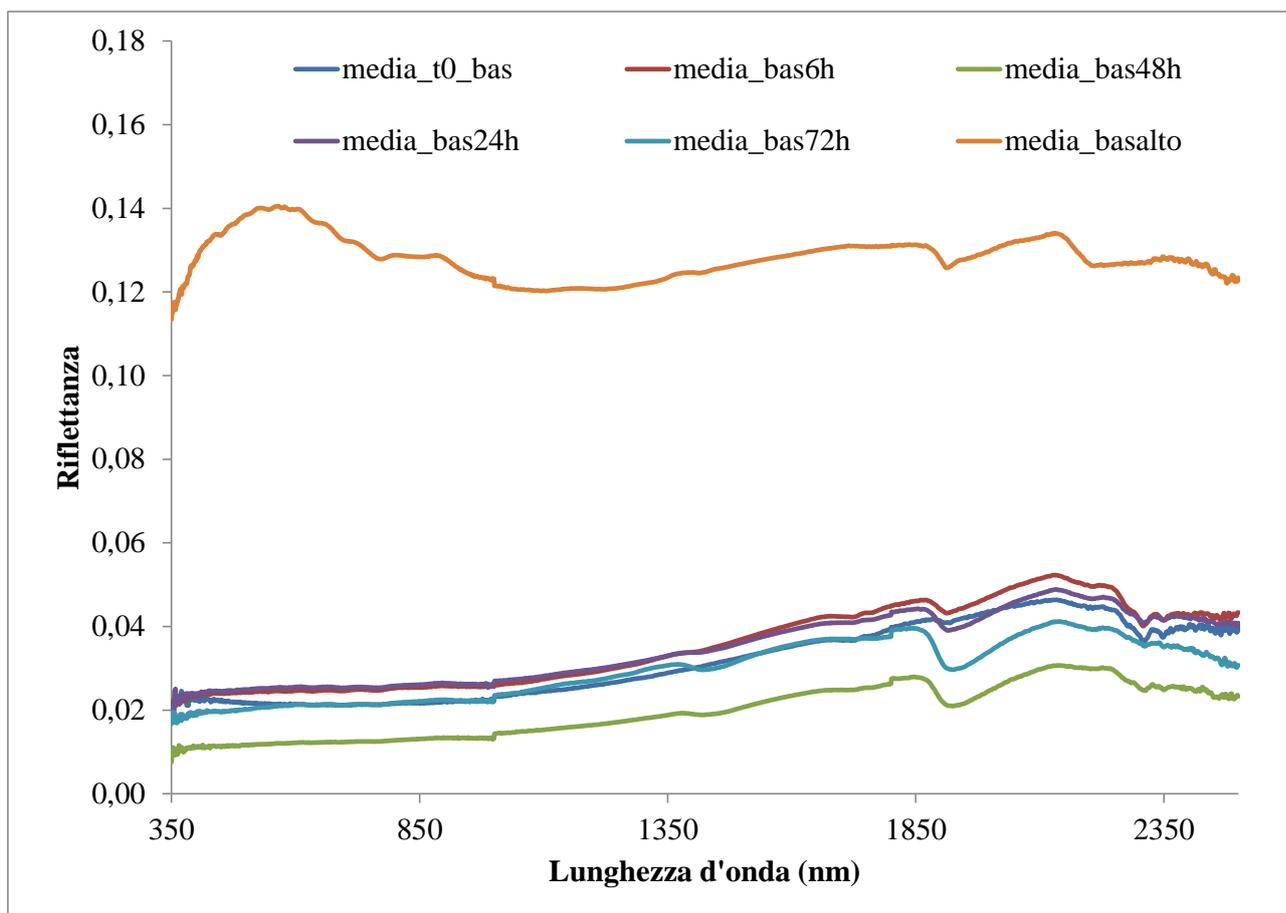


Figura 4.2-11: Firme spettrali con inerti basaltici

Tabella 4.2-2: Valori delle lunghezze d'onda utilizzate per il computo di indici spettrali.

Lunghezze d'onda (nm)		Step temporali basalto					no bitume
		0h	6h	24h	48h	72h	
	1845	0,041	0,046	0,044	0,028	0,039	0,131
	1925	0,041	0,044	0,039	0,021	0,029	0,127
	2310	0,036	0,040	0,025	0,041	0,035	0,127
	2325	0,039	0,042	0,026	0,042	0,036	0,127
Indici derivati		Valori derivanti dagli indici					
E)	Indice 1 ( $\lambda$ 1845- $\lambda$ 1925)	0,000	0,002	0,005	0,007	0,010	0,005
G)	Indice 2 ( $\lambda$ 2325- $\lambda$ 2310)	1,078	1,053	1,053	1,030	1,021	1,004
H)	Indice 2*radq ( $\lambda$ 2325- $\lambda$ 2310)	0,057	0,049	0,038	0,036	0,028	0,022
I)	Indice 1 - Indice 2	-1,078	-1,050	-1,048	-1,023	-1,011	-0,999

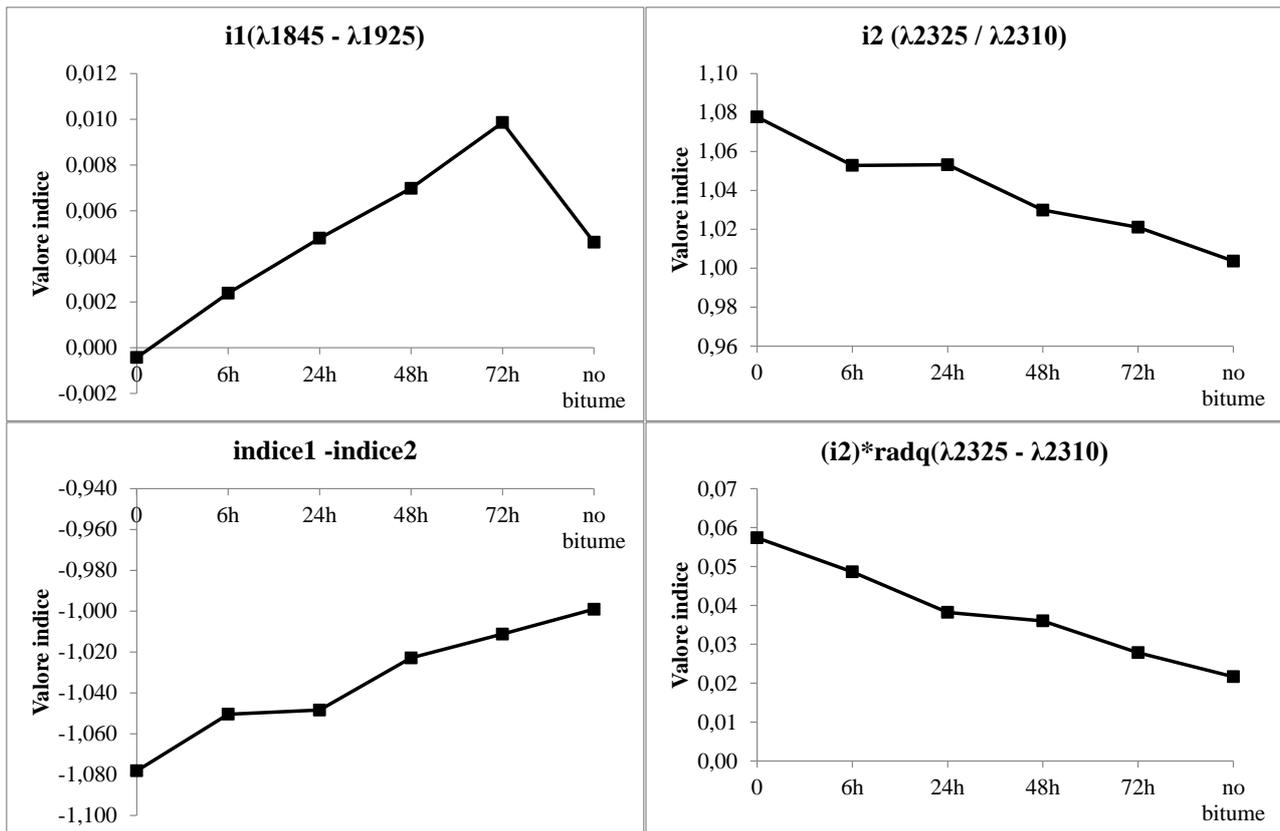


Figura 4.2-12: Curve rappresentative con inerti basaltici dell'avanzamento temporale della prova di adesione e relativo risultato classificativo

#### 4.2.2.3 Definizione dell'Indice dei clasti Esposti (ICE)

Al fine di poter quantificare in maniera oggettiva la percentuale di bitume rimossa durante le prove di adesione è stato necessario parametrizzare il ricoprimento del bitume sui singoli clasti. A tale proposito si sono analizzati i dati complessivi della piattaforma multisensore cercando di trovare un indice che fosse in grado di estrarre dei parametri quantitativi. Invertendo la problematica, e quindi definendo quanti clasti siano privi di bitume e quindi esposti, è possibile risalire al valore di bitume rimosso e quindi all'usura. Per calcolare tale indice le fotografie si sono dimostrate una buona base di partenza.

E' stato perciò definito un indice, l'Indice dei Clasti Esposti (ICE), come il rapporto tra il numero di pixel corrispondenti agli aggregati esposti e il numero totale di clasti presenti all'interno di un'area di interesse (Area Of Interest - AOI). L'ICE, espresso in valori percentuale in relazione ad un'area costante nota può essere così espresso.

$$ICE = \frac{n_{pe}}{n_{pt}} \times 100$$

Dove  $n_{pe}$  è il numero di pixel corrispondenti agli inerti esposti in superficie che causa l'apparizione di determinate caratteristiche spettrali degli inerti;  $n_{pt}$  rappresenta il numero totale di pixel nell'AOI.

Da questa si può quindi risalire alla percentuale di bitume che ricopre gli aggregati espressa con la relazione:

$$BIT = 100 - ICE$$

Dove BIT è la percentuale di bitume che ricopre i clasti.

#### 4.2.2.4 *Analisi statistica delle foto digitali*

Le foto digitali, acquisite su ognuno dei materiali derivanti dalle prove di adesione e riportati in figura 4.2.7 sono state classificate per valutare la quantità di bitume presente sui clasti dove i diversi step di prova. Al fine di classificare il centro dell'area corrispondente con il centro di presa di ogni foto (dimensioni 4928 x 3264 pixel), è stata fissata un'area di interesse (AOI) con dimensioni note di 743 righe e 761 colonne per un totale di 565423 pixel assicurando così che il GIFOV dello spettroradiometro fosse all'interno dell'area. In figura 4.2-13 viene riportato un esempio delle immagini classificate.

Tutte le immagini acquisite sono state classificate applicando due metodologie: il metodo supervisionato del parallelepipedo e il metodo non supervisionato ISODATA. Entrambi i metodi sono stati descritti nel paragrafo 4.2.1.3. La classificazione di tali immagini ha portato a quantificare il ricoprimento degli aggregati da parte del bitume. Tale quantificazione è espressa in termini di percentuale di pixel attribuiti alla classe bitume in riferimento ad una area nota fissa di 565423 pixel. I due grafici seguenti (figure 4.2-14 e 4.2-15) mostrano i valori ottenuti da queste classificazioni in termini di Indice dei Clasti Esposti (ICE). Per il parallelepipedo si nota come, se per i primi tempi di prova i valori ottenuti da classificazione siano molto simili, per tempi di prova maggiori i valori di ICE tendono a discostarsi maggiormente.

Per quanto riguarda i dati legati all' ISODATA questi non si discostano tra loro rendendo il tipo di analisi più affidabile e precisa per tutti gli step di prova. Le classificazioni effettuate tramite parallelepipedo mostrano i valori di deviazione standard nettamente maggiori (4.72 per il basalto e 3.98 per il calcare) a quelle ottenute tramite ISODATA (1.87 per il basalto e 0.60 per il calcare).

La figura 4.2-14 mette a confronto i valori di ICE ottenuti attraverso le due metodologie classificative. Il trend che si osserva è l'aumento dell'incertezza all'aumentare della prova: i valori mediati tra i due metodi tendono infatti a rimanere abbastanza simili, praticamente identici nel caso del calcare, e a discostarsi di più superate le 48h di prova. Questo fatto è comprensibile ed è dettato dal fatto che aumenti sempre più l'eterogeneità del campione e quindi si vadano ad aggiungere altre variabili come aggregati sporcati parzialmente dal bitume ormai rimosso e da contrasti di luminosità variabile a seconda che si tratti di calcare o basalto. Proprio il minor contrasto tra basalto e bitume contribuisce a rendere maggiormente difficoltoso ed impreciso la classificazione rispetto a quella del calcare.

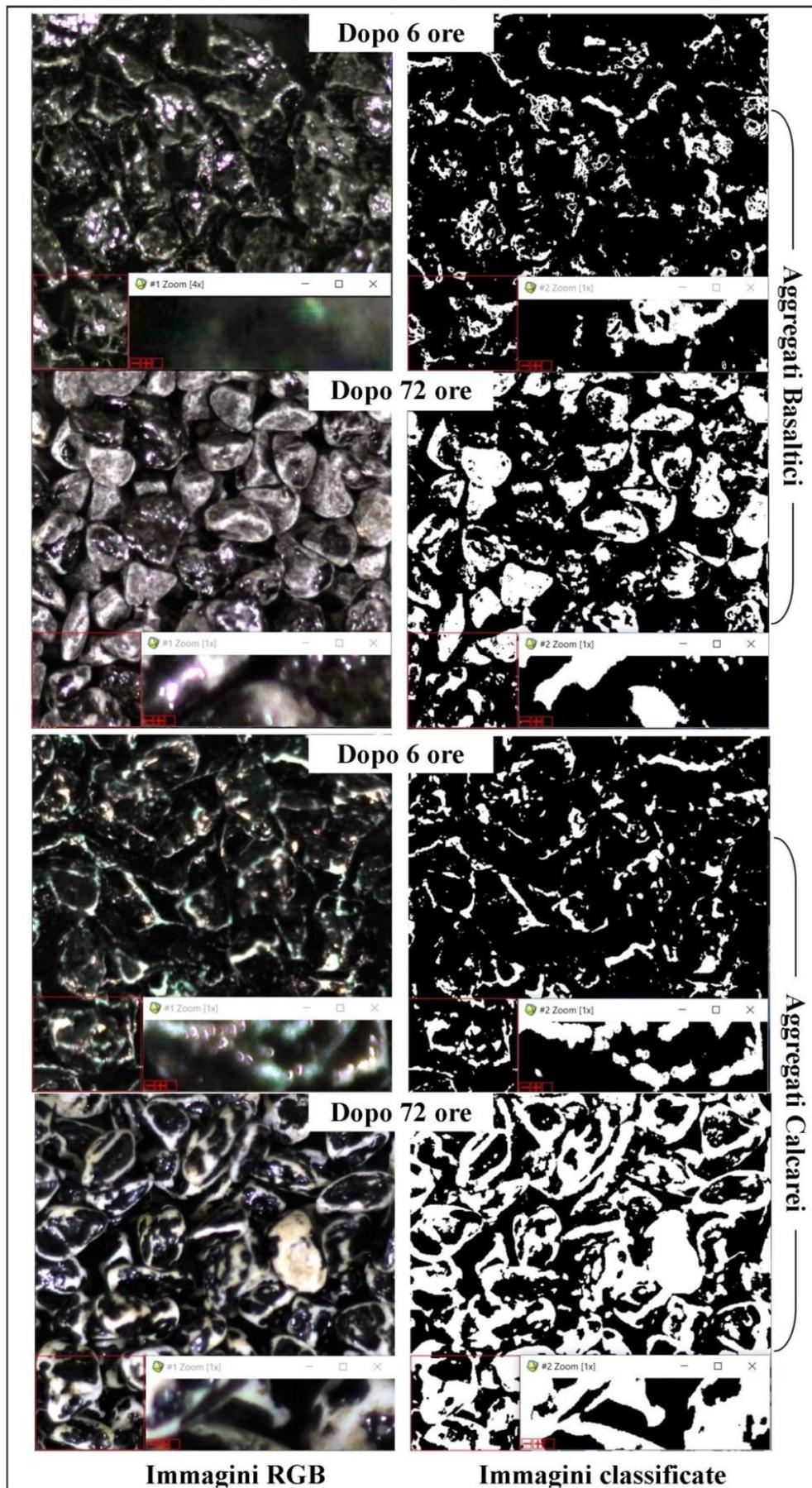


Figura 4.2-13: Esempio di classificazione tramite ISODATA dei campioni calcarei e basaltici a 6 ore e a 72 ore.

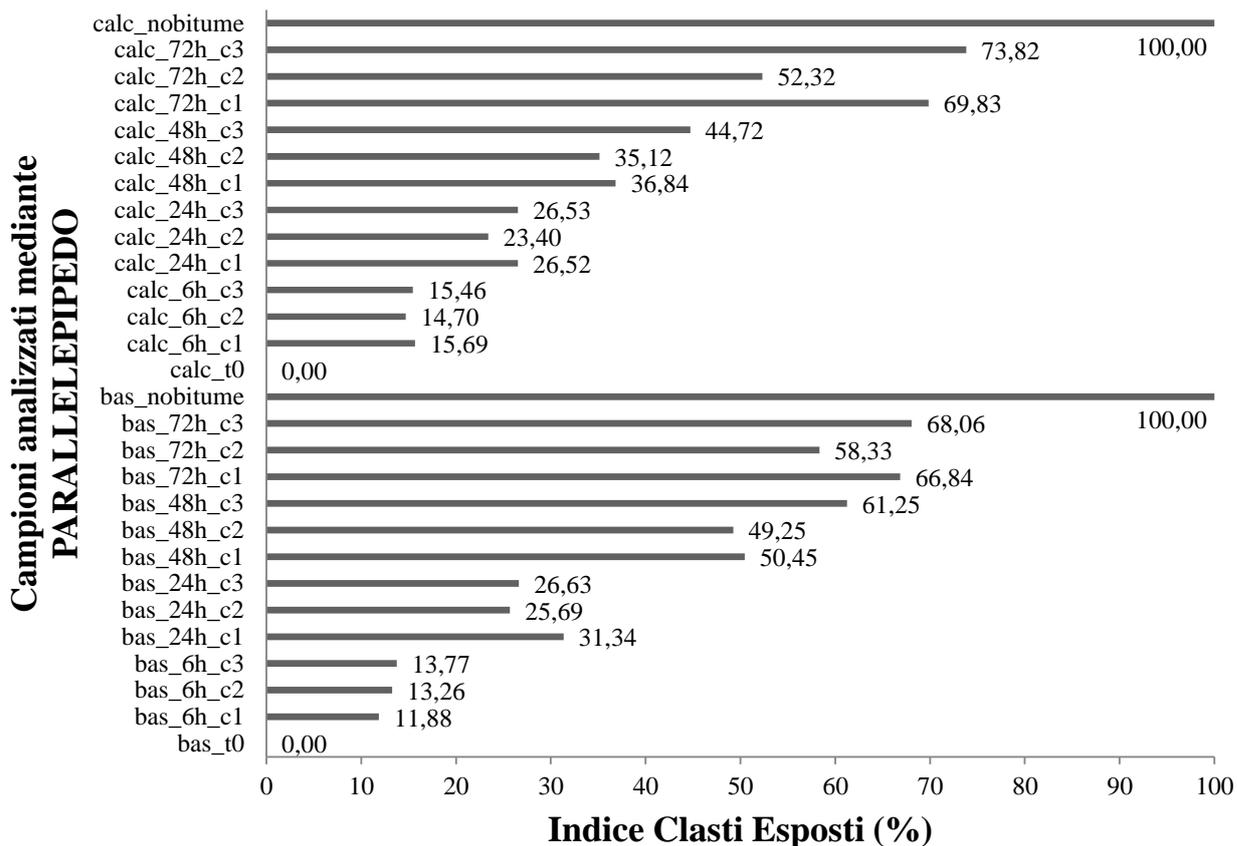


Figura 4.2-14: Istogramma dei risultati ottenuti mediante applicazione del classificatore parallelepipedo

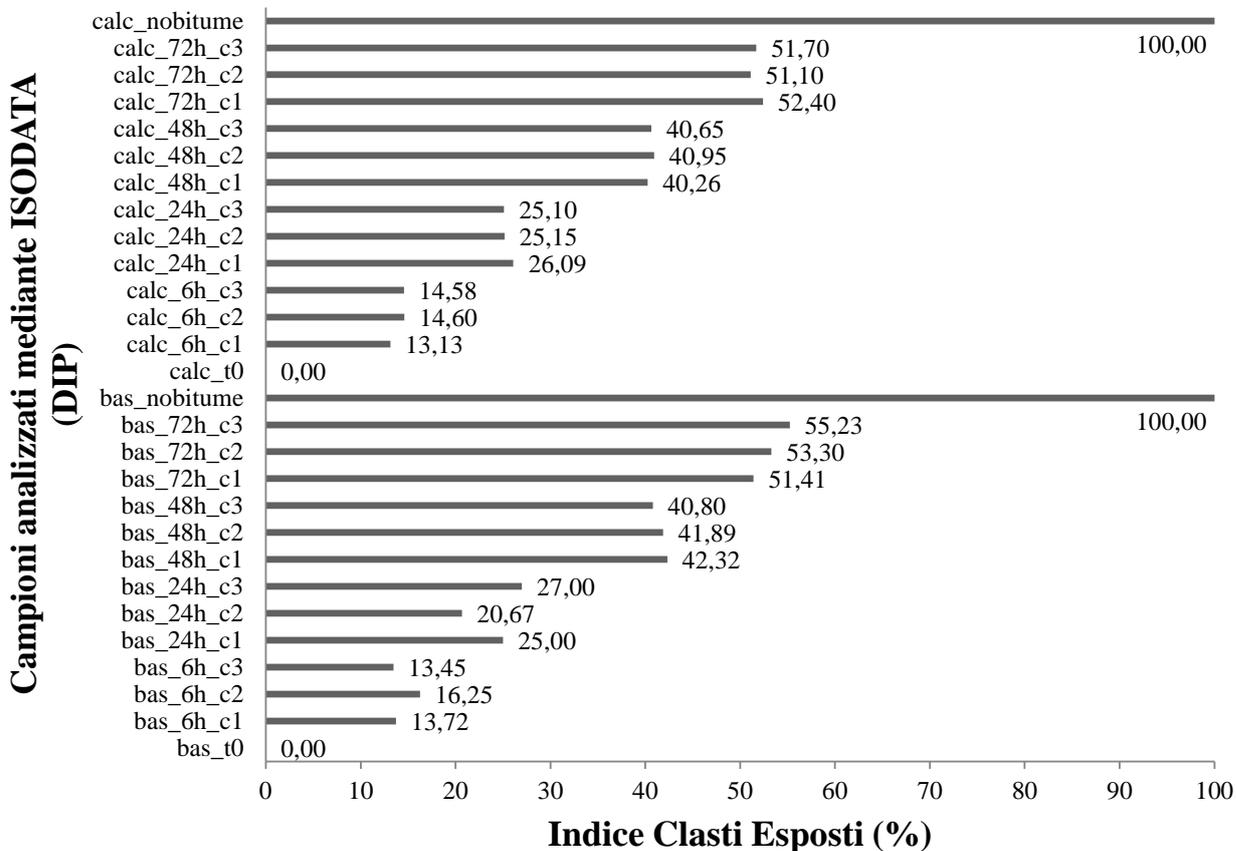


Figura 4.2-15: Istogramma dei risultati ottenuti mediante applicazione del classificatore ISODATA

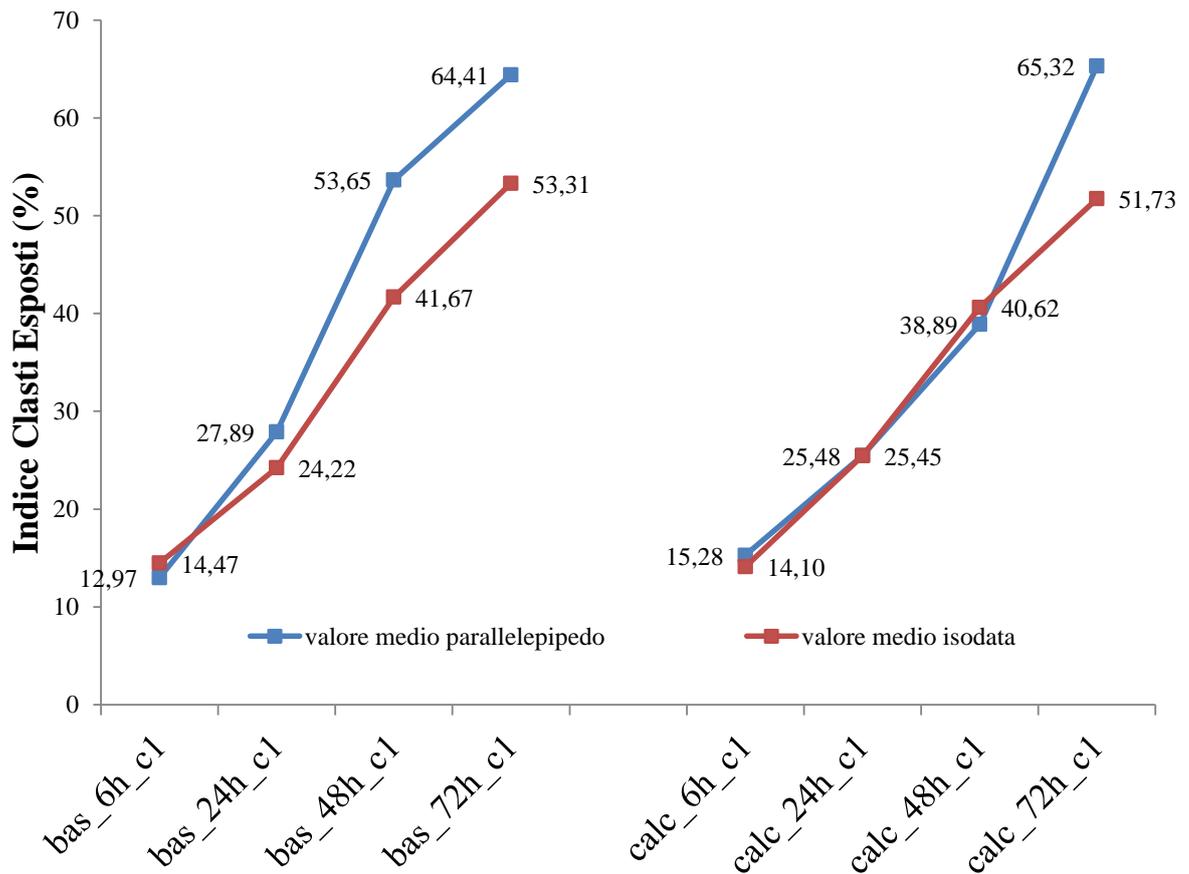


Figura 4.2-16: Trend e confronto dei risultati ottenuti mediante applicazione dei classificatori parallelepipedo ed ISODATA

#### 4.2.2.5 Analisi statistica delle immagini iperspettrale

In seguito all'acquisizione delle immagini dalla piattaforma iperspettrale, queste sono state elaborate al fine di ricostruire il cubo iperspettrale. Il numero di immagini acquisite da ciascuna telecamera è diverso poiché il *frame rate* delle due telecamere è stato impostato su due valori differenti, quindi le immagini acquisite dalla telecamera Sensor (*frame rate* pari a 50 fps) saranno maggiori rispetto a quelle acquisite dalla telecamera Falcon (*frame rate* pari a 25 fps). Ponendo la linea di scansione dello spettrometro VIS perpendicolare alla direzione di avanzamento del campione, si ottiene un'immagine in cui ogni riga (o colonna nel caso del NIR) rappresenta la porzione di superficie scansionata ad una data lunghezza d'onda. Attraverso la fase iniziale di calibrazione geometrica (si veda il paragrafo 4.2.1), si può associare ad ogni colonna dell'immagine una lunghezza d'onda. In questo modo per ricostruire la scena indagata a una generica lunghezza d'onda  $\lambda$ , sarà necessario affiancare la  $j$ -esima colonna (corrispondente a  $\lambda$ ) di ogni immagine acquisita, ottenendo l'immagine completa alla lunghezza d'onda  $\lambda$  della scena indagata. Nella figura 4.2-17 si può osservare l'immagine ricostruita alla lunghezza d'onda di 1340nm, e alla lunghezza d'onda di 640nm ottenute tramite gli spettrometri VIS e NIR sia per il campione di basalto che calcareo dopo 48 ore di prova di adesione.

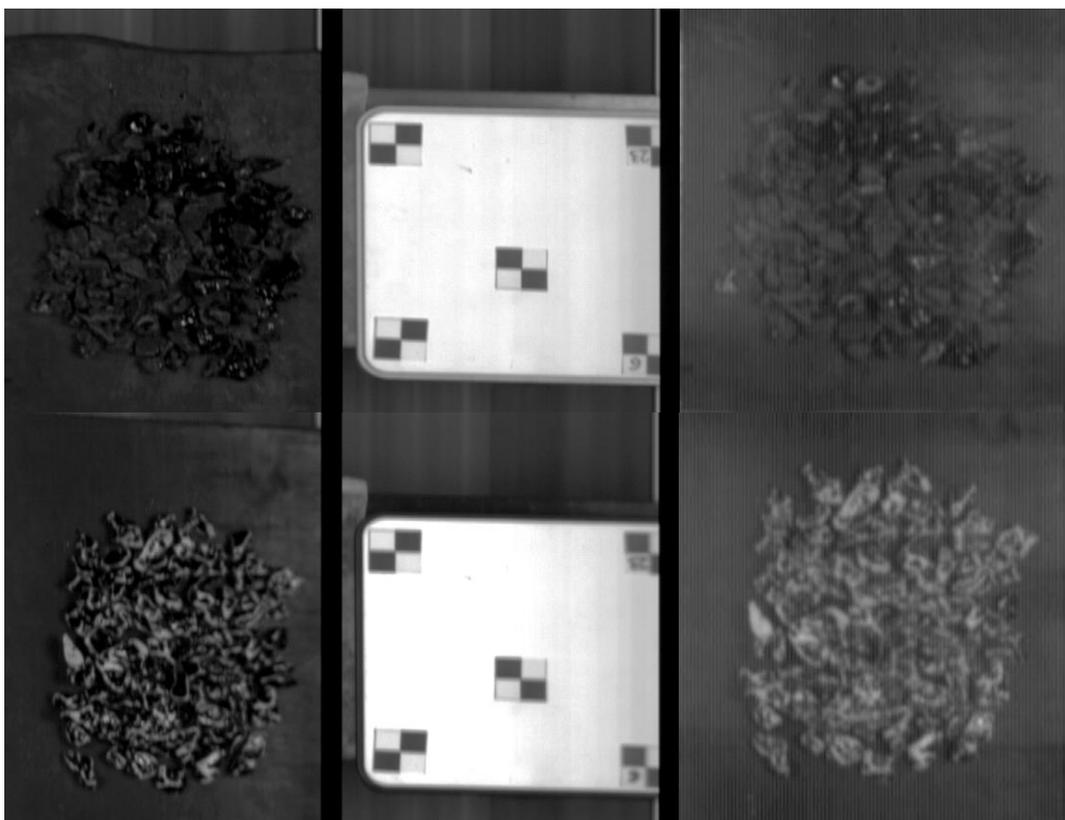


Figura 4.2-17: Campioni acquisiti con la piattaforma iperspettrale su basalto (in alto) e su calcare dopo 48 ore di prova nell'ambito del VIS (sinistra) e NIR (destra).

Il cubo si compone di tutte le immagini e presenta lungo gli assi  $x$  e  $y$  le informazioni spaziali, che consentono l'individuazione di ogni singolo pixel dell'immagine, mentre lungo l'asse  $z$  le informazioni spettrali (figura 4.2-18:). La curva spettrale che si ottiene consente di caratterizzare e riconoscere i diversi materiali analizzati, e per questo è definita anche firma spettrale del materiale analizzato. La creazione del cubo iperspettrale è stata effettuata mediante l'utilizzo del software ENVI (*Environment for Visualizing Images*), programma sviluppato dalla ITT *Visual Information Solutions* per la visualizzazione, analisi e classificazione delle immagini digitali.

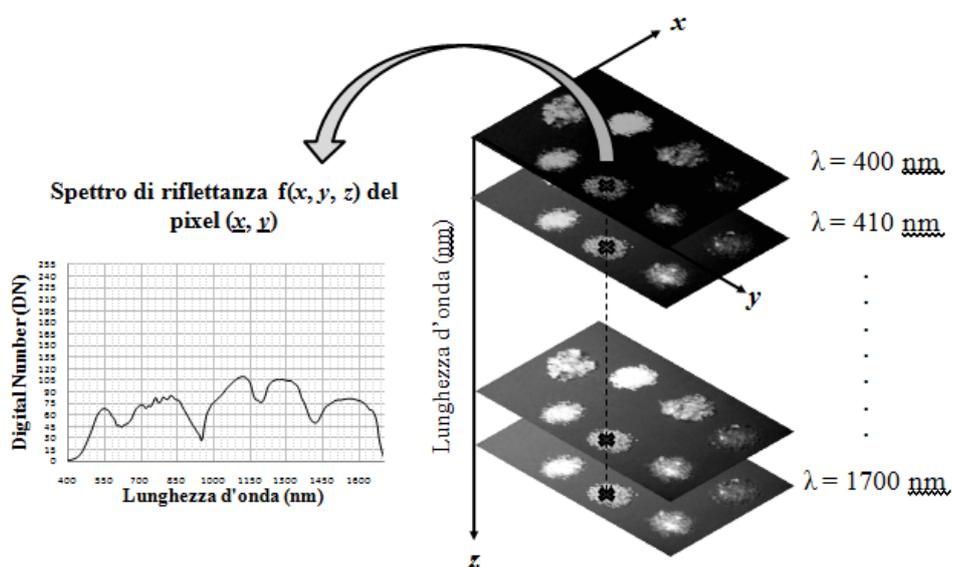


Figura 4.2-18: Cubo iperspettrale di dati ed estrazione della firma spettrale.

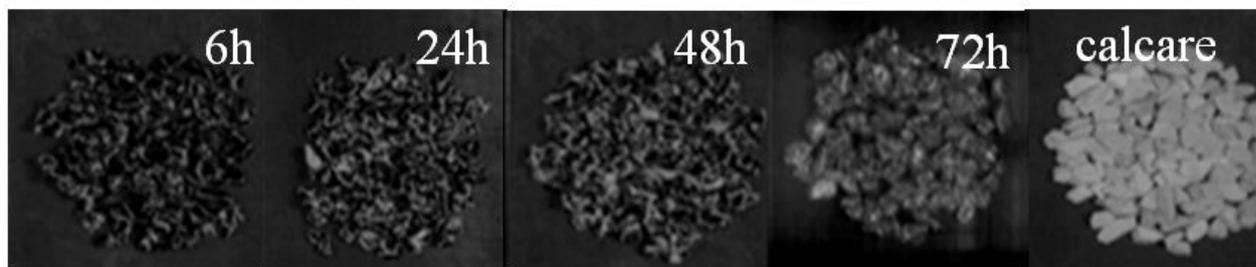
La calibrazione radiometrica è una fase necessaria per la costruzione di una libreria spettrale che rappresenti al meglio le caratteristiche dei materiali. Questa fase prevede l'eliminazione della dipendenza degli spettri dagli strumenti di misura. Infatti, il sistema di acquisizione non registra la riflettanza del materiale ma il valore di radianza, ovvero quella parte della radiazione riflessa dal materiale che raggiunge il sensore e possiede energia sufficiente per essere registrata. La riflettanza assoluta può essere calcolata solo se si conosce la radiazione incidente sul materiale. Poiché sono state utilizzate, come sorgente di luce, delle lampade alogene, non è stato possibile calcolare la radiazione incidente in ogni punto della scena. Quindi è stata calcolata la riflettanza relativa, ottenuta confrontando la radianza dei materiali con lo spettro di riferimento di un materiale scelto opportunamente. Come oggetto di riferimento è stata utilizzata una mattonella quadrata di materiale Halon, con dimensione del lato pari a 10 cm e ripresa nelle stesse condizioni di illuminazione e con lo stesso apparato sperimentale. Il metodo seguito per la calibrazione radiometrica prende il nome di *Flat Field* (FF). Questo metodo considera, oltre al materiale di riferimento, il rumore di fondo associato alle misurazioni del sensore, e ne tiene conto introducendo la *Dark Current*, ovvero la radianza registrata attraverso delle misure a obiettivo chiuso. La relazione per il calcolo della riflettanza  $\rho$  è:

$$\rho_{\lambda} = \frac{R_{\lambda} - D_{\lambda}}{W_{\lambda} - D_{\lambda}}$$

dove  $R_{\lambda}$  è la radianza del materiale alla lunghezza d'onda  $\lambda$ ,  $D_{\lambda}$  il valore della *dark current* e  $W_{\lambda}$  la radianza del bianco di riferimento (mattonella Halon). Poiché la radianza fornita dallo strumento risulta già depurata del termine relativo alla *dark current*, la relazione si semplifica nel rapporto fra la radianza del materiale e quella di riferimento del bianco.

Dalle immagini sono state estratte delle firme spettrali dei diversi materiali attraverso la definizione di Regioni di Interesse (*Region of Interest*, ROI) predefinite di dimensioni note fissate a 180 x 200 pixel (36.000 pixel totali) nel NIR e 300 x 200 (60.000 pixel totali) nel VIS. La firma spettrale media di un campione si ottiene quindi mediando le curve di tutti i pixel compresi all'interno dell'area campione.

### Aggregato calcareo



### Aggregato trachitico

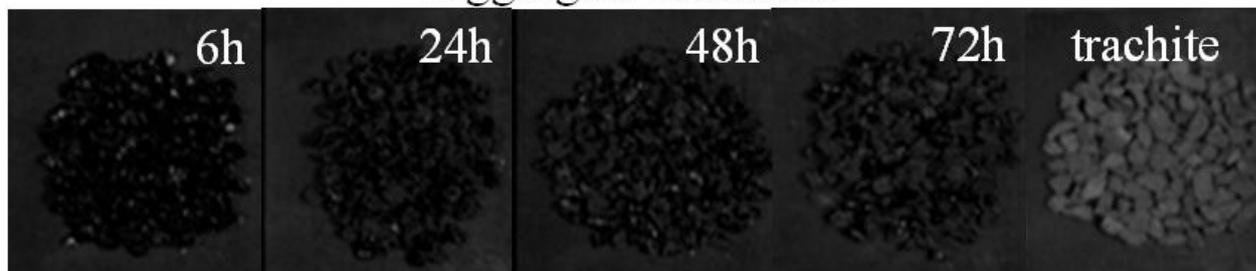


Figura 4.2-19: Acquisizione con spettrometro lineare nel VIS (650nm) per il calcare e per il basalto.

Le immagini acquisite tramite spettrometro VIS e NIR sono state classificate, come le analisi effettuate mediante *digital imaging processing*, tramite ISODATA e parallelepipedo.

I valori ottenuti di EAI ai diversi tempi di prova sono rappresentati nelle figure 4.2-20 e 4.2-21. Generalmente si osserva una buona ripetibilità delle classificazioni effettuate sia nel VIS che nel NIR tra le 3 repliche di ogni step temporale.

**Campioni analizzati mediante ISODATA**

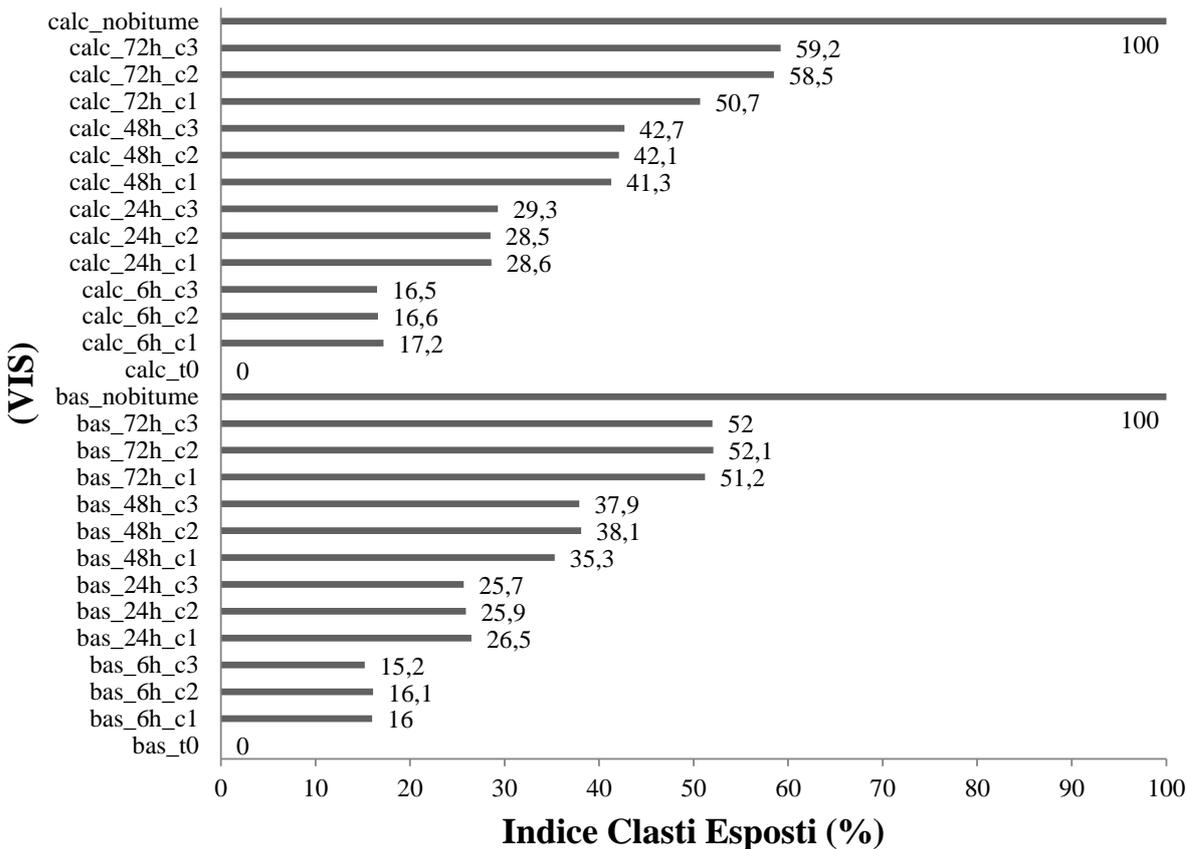


Figura 4.2-20: Risultati analisi dei dati VIS mediante ISODATA

**Campioni analizzati mediante ISODATA**

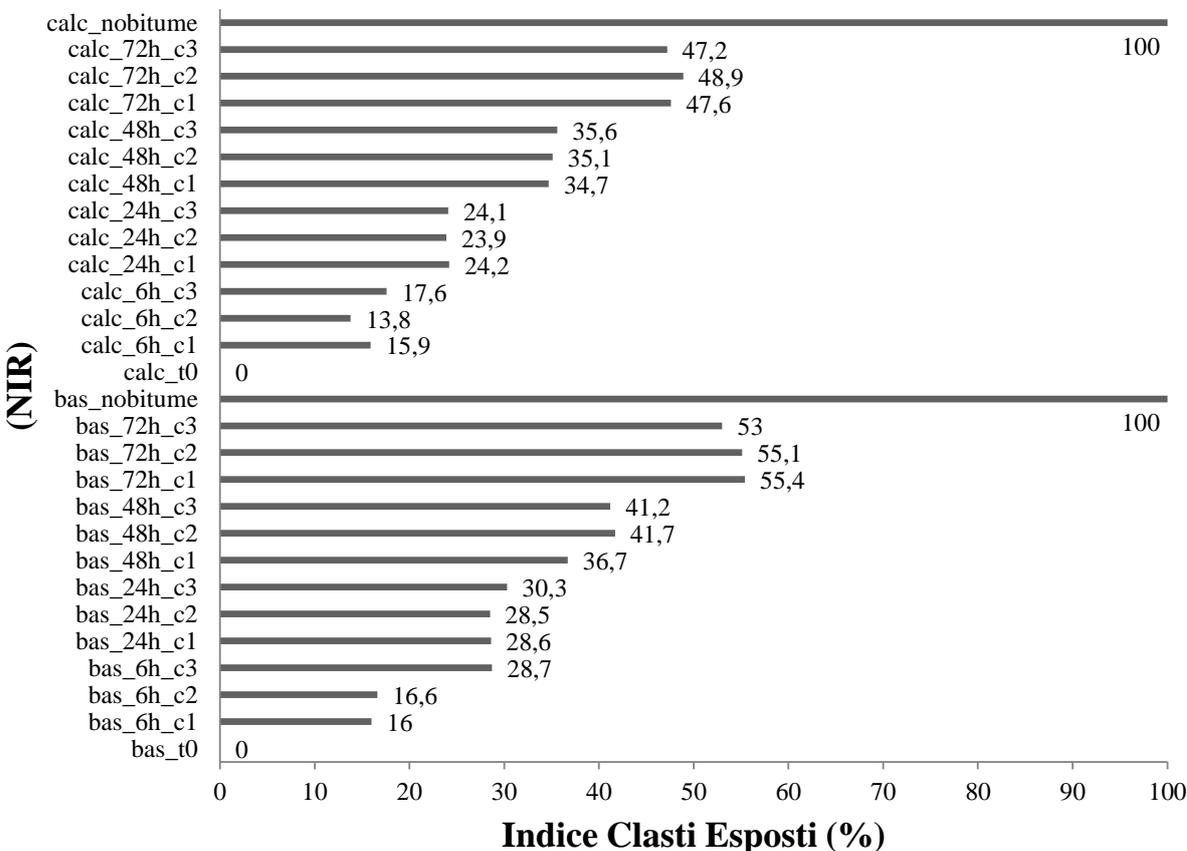


Figura 4.2-21: Risultati analisi dei dati NIR mediante ISODATA

I valori di accuratezza sono stati calcolati attraverso l'applicazione della matrice di confusione che ha permesso, utilizzando delle ROI di riferimento di validazione, di ottenere i valori di *overall accuracy* e di coefficiente Kappa. Per i dati relativi al VIS, la classificazione tramite ISODATA ha fornito dei valori di accuratezza pari al 96.43% ed un valore di kappa di 0.91, mentre nel NIR l'accuratezza è pari al 87.42% ed il kappa è di 0.71. L'accuratezza tende quindi a diminuire passando dai dati analizzati dal sensore VIS a quello NIR. Inoltre, i valori di deviazione standard mostrano dei trend particolari: per la trachite nel VIS questo è pari a 0.74 mentre per il calcare è di 1.56. Nel NIR i valori di deviazione standard mediati relativi alla trachite sono pari a 3.06 mentre per il calcare sono pari a 0.85. Generalmente quindi i dati classificati NIR sembrano essere meno attendibili di quelli ottenuti tramite classificazione nel VIS.

La figura 4.2-22 illustra i trend di classificazione ISODATA per inerti calcarei e trachitici a confronto sia nel range del VIS che del NIR.

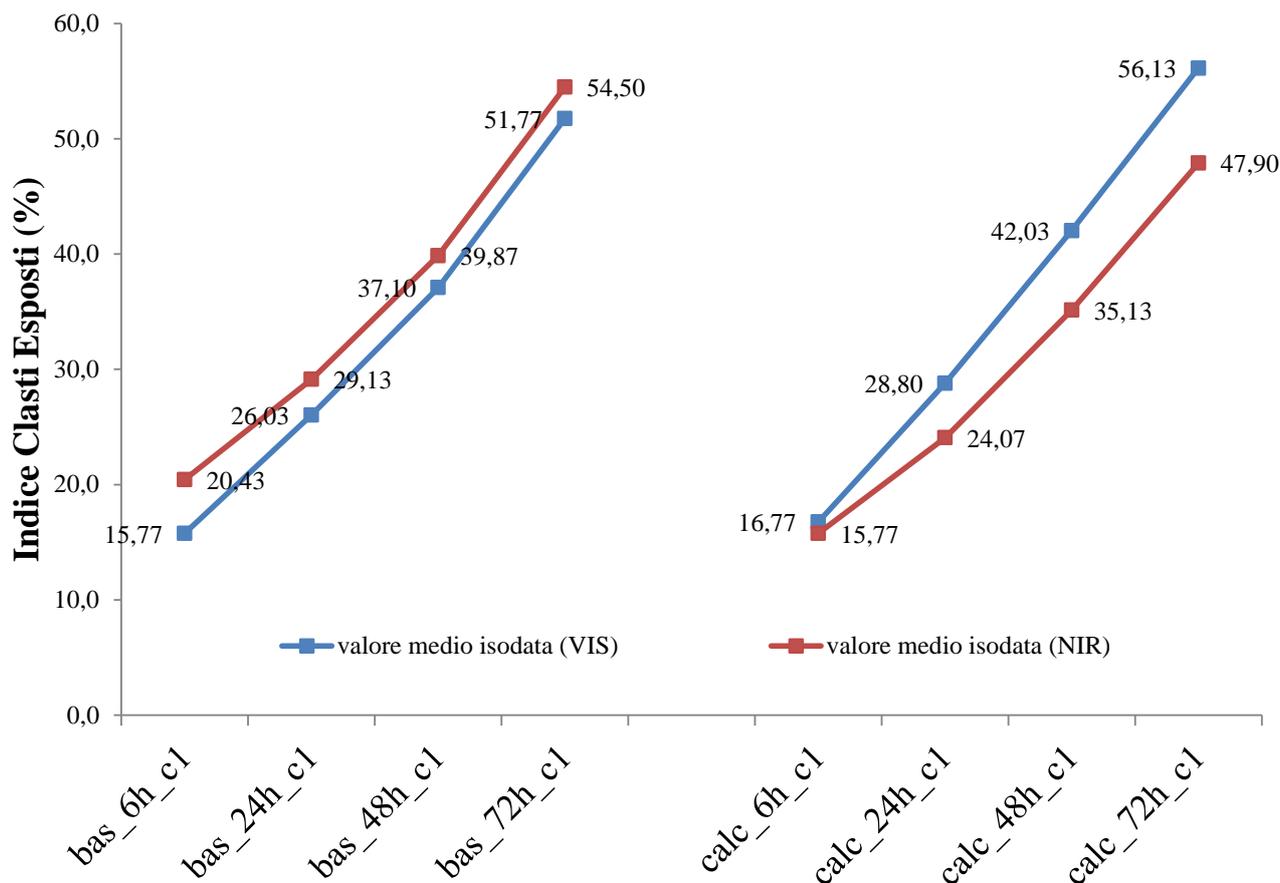


Figura 4.2-22: Trend di classificazione ISODATA

L'applicazione del metodo del parallelepipedo ai dati iperspettrali VIS-NIR ha permesso di ottenere dei valori di accuratezza di 81.12% e di kappa pari a 0.67 nel VIS, e di 75.09% e di kappa di 0.47 nel NIR.

Da una prima analisi visiva dei risultati riportati nelle figure 4.2-23 e 4.2-24, i dati ottenuti sembrano essere meno replicabili. Il valore mediato di deviazione standard nel VIS per la trachite e il calcare sono rispettivamente pari a 2.02 e 2.04, mentre nel NIR tali valori si attestano a 3.95 per la trachite e 3.18 per il calcare. In entrambi i casi tali deviazioni standard sono di fatto superiori a quelli ottenuti tramite l'applicazione del metodo ISODATA.

La figura 4.2-25 illustra i trend di classificazione per il parallelepipedo per inerti calcarei e trachitici a confronto nel range del VIS e del NIR.

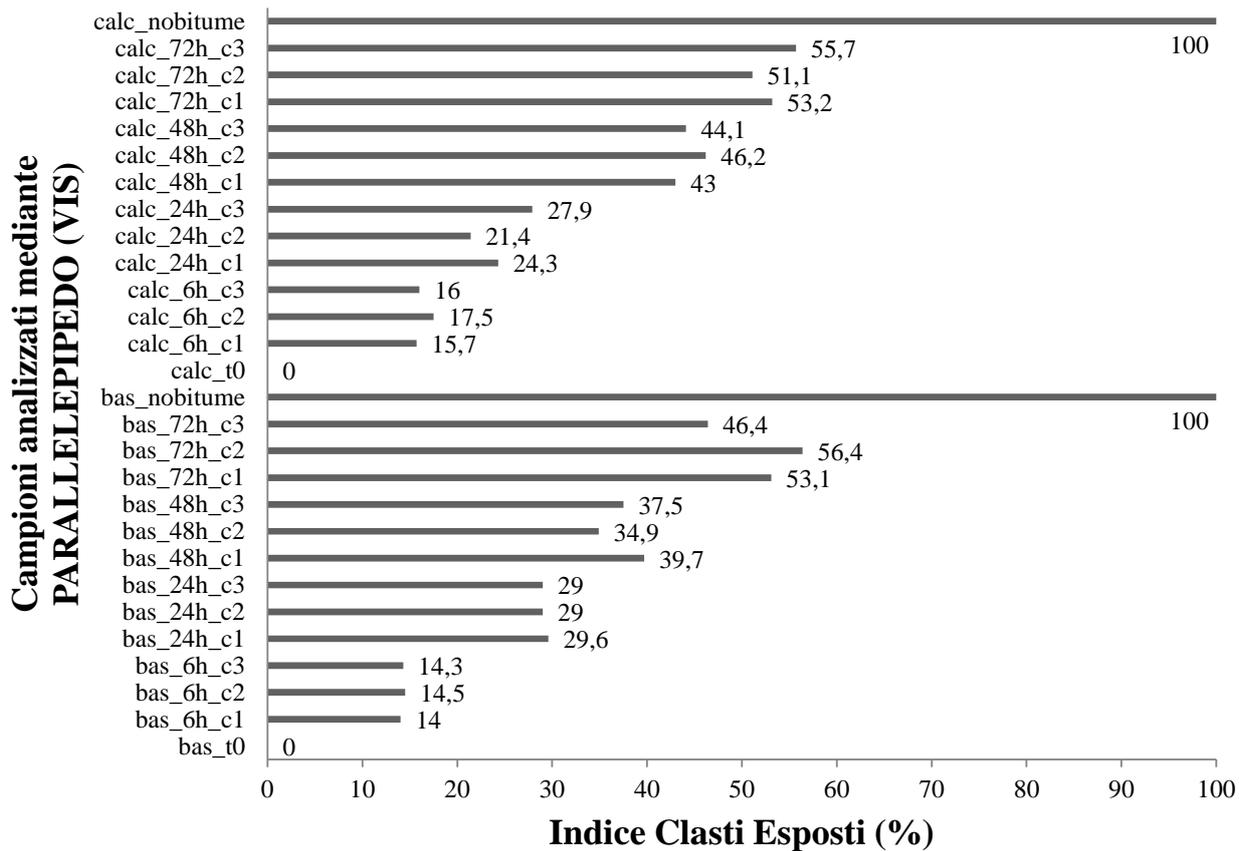


Figura 4.2-23: Risultati analisi dei dati VIS mediante parallelepipedo

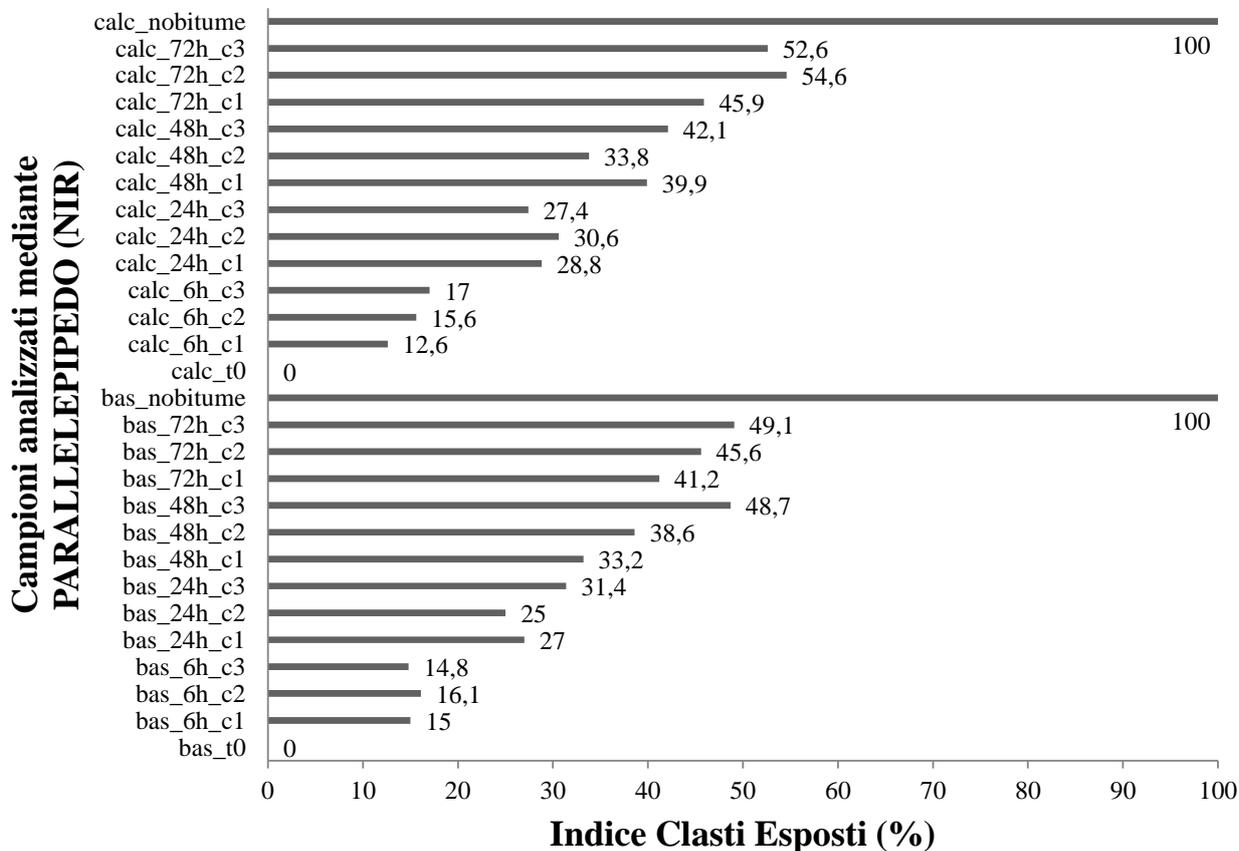


Figura 4.2-24: Risultati analisi dei dati NIR mediante parallelepipedo

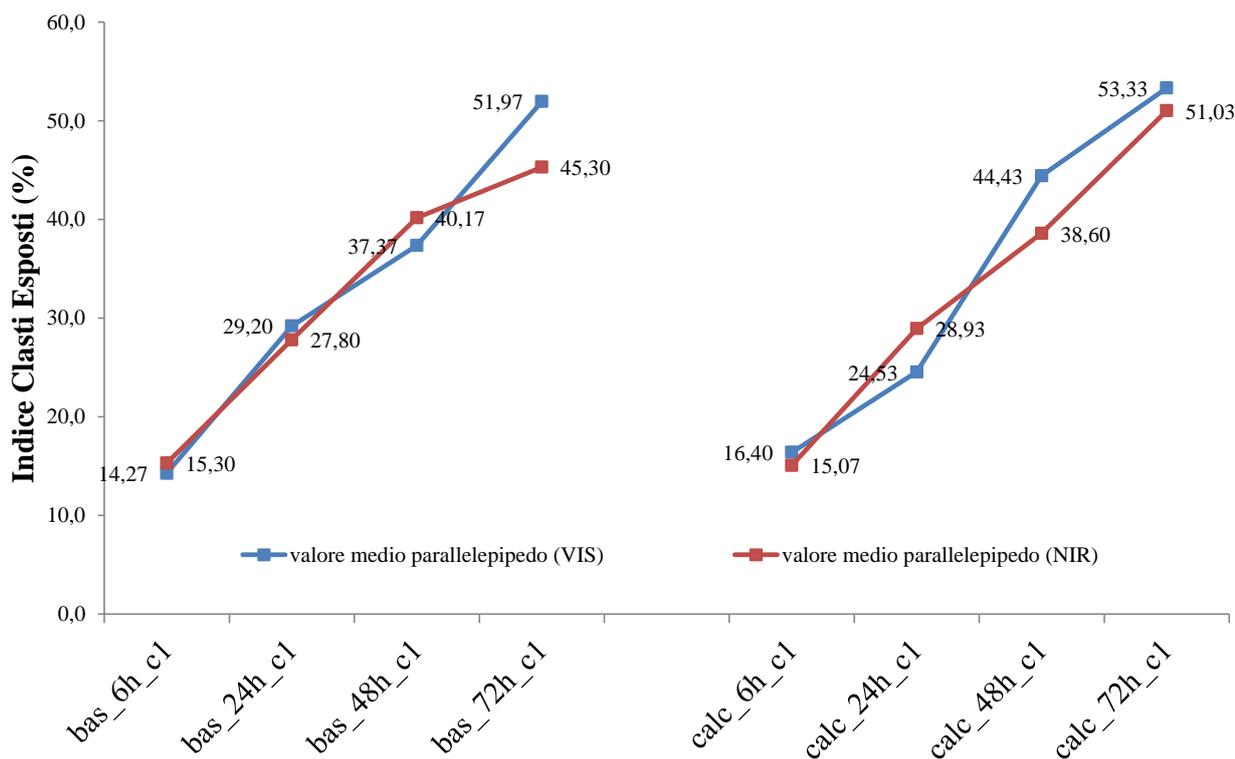


Figura 4.2-25: Trend di classificazione parallelepipedo

### 4.2.3 Correlazioni tra sistemi

I valori di ICE calcolati su base fotografica ed immagini iperspettrali, sono stati confrontati tra loro in base alla durata delle prove e al tipo di classificazione (figura 4.2-26). In figura 4.2-27 è invece riportato l'andamento dell'indice BIT.

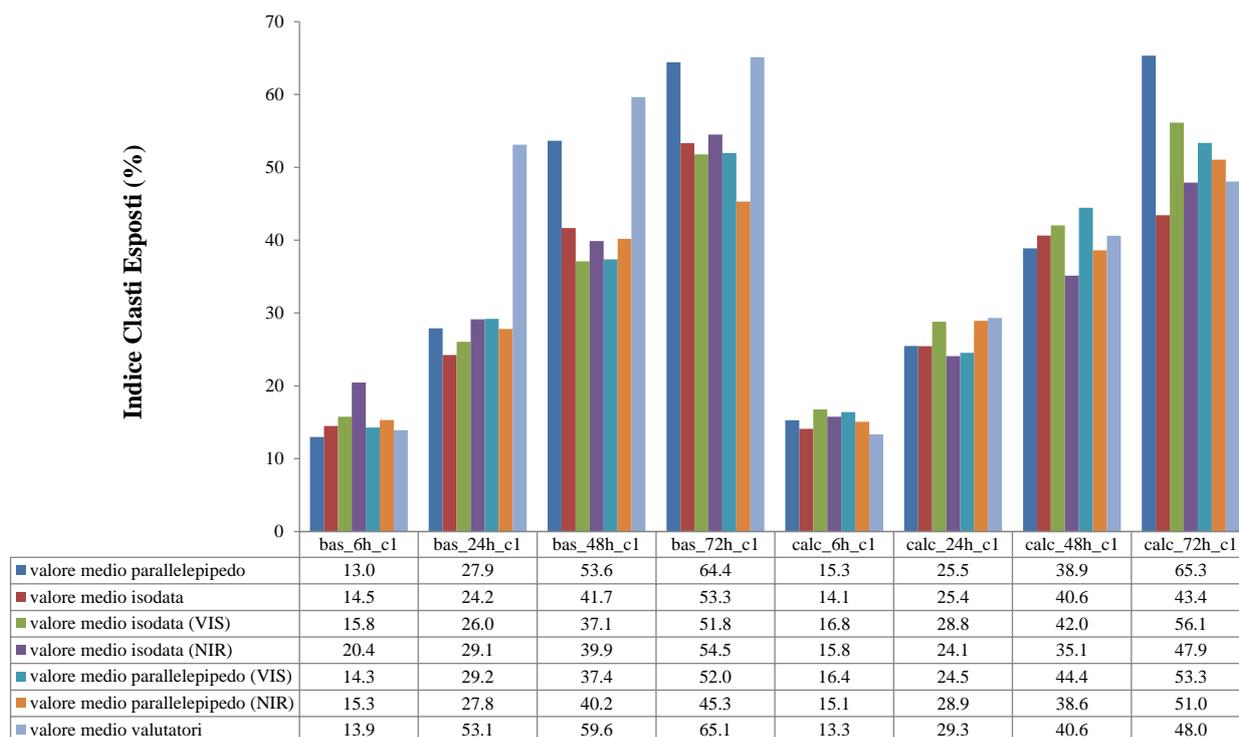


Figura 4.2-26: andamento indice ICE secondo i l'applicazione dei diversi sistemi e metodi di classificazione

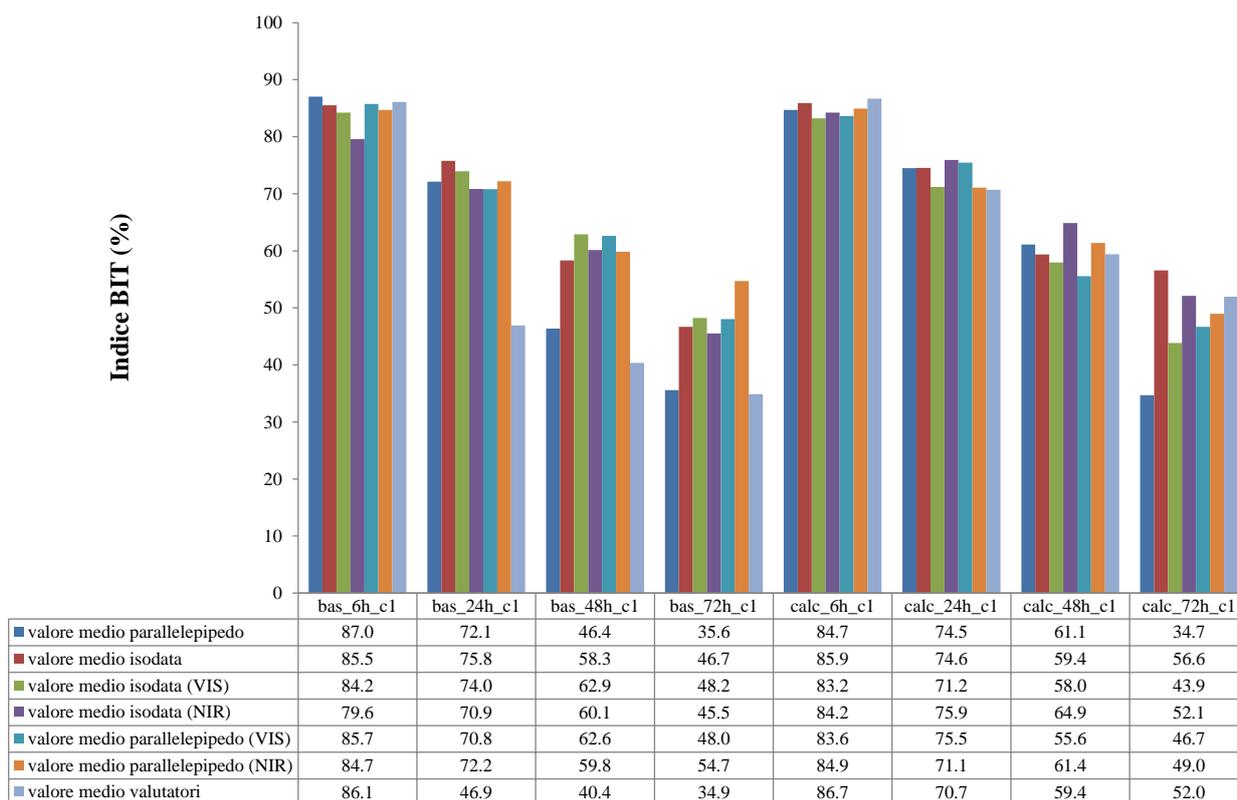


Figura 4.2-27: andamento indice BIT secondo l'applicazione dei diversi sistemi e metodi di classificazione

Dai dati emersi si può osservare che generalmente i 6 metodi classificativi ottengono dei risultati pressoché simili per le immagini derivanti dalle prove di durata 6 e 24 ore (deviazione standard tra i risultati delle classificazioni compresa tra 1 e 2.6) mentre tendono a variare di più in quelle di 48 e 72 ore (deviazione standard tra i risultati delle classificazioni compresa tra 3.2 e 7.5) (figura 4.2-28).

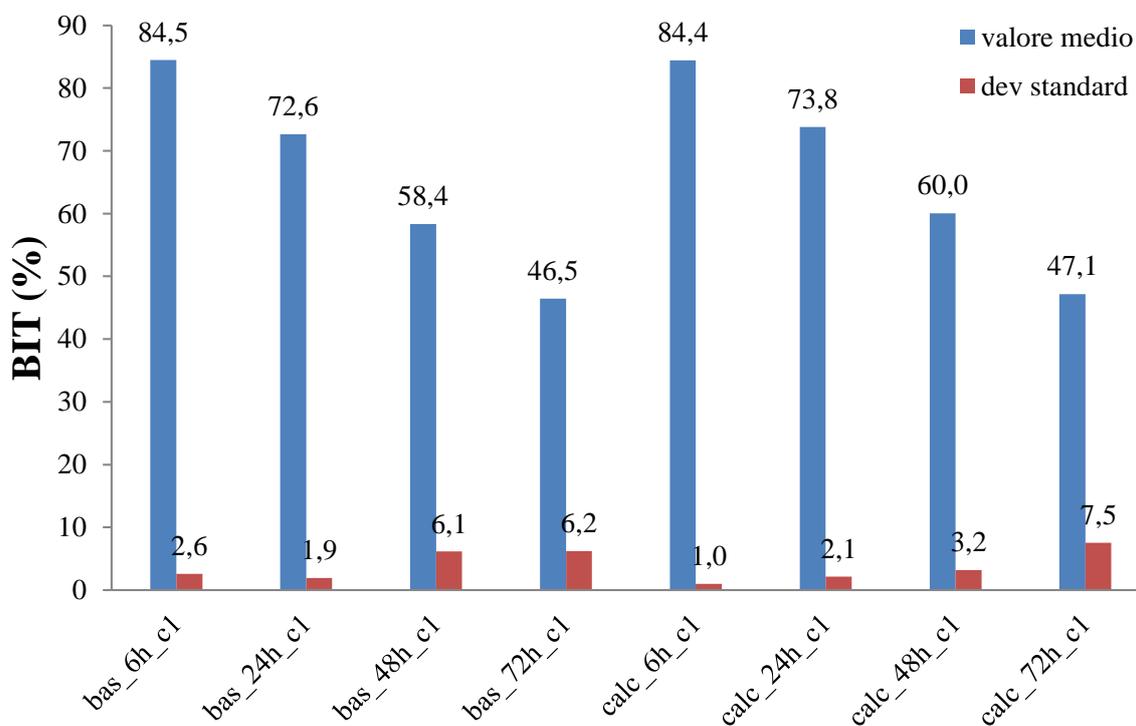


Figura 4.2-28: Andamento indice BIT e delle deviazioni standard mediati

Il trend di crescita dei valori di ICE con l'allungarsi dei tempi di prova è comunque sempre evidente per tutti e 6 le tipologie di analisi. Il metodo che più si discosta in maniera netta per i valori ottenuti è il metodo del parallelepipedo nel trattamento secondo l'analisi digitale delle fotografie.

Effettuando il calcolo del valore medio e della deviazione standard di tutti i valori ottenuti con le diverse metodologie (tranne che per le osservazioni da parte degli operatori), è possibile ottenere un valore medio rappresentativo dei diversi valori di ricoprimento dei clasti da parte del bitume espresso in percentuale. La variazione delle deviazioni standard mediata, a prescindere dal tipo di classificatore utilizzato, indica un evidente aumento da valori prossimi a 1 per le prove di corta durata (6 e 24 ore) rispetto ai circa 6-7 per quelle a lunga durata (48 e 72 ore).

Più nello specifico, l'analisi del trend di variazione delle deviazioni standard suddiviso sia per tipologia di aggregato, per tempo di prova ma anche per tipologia di elaborazione, indica una notevole eterogeneità di tali valori (figura 4.2-29).

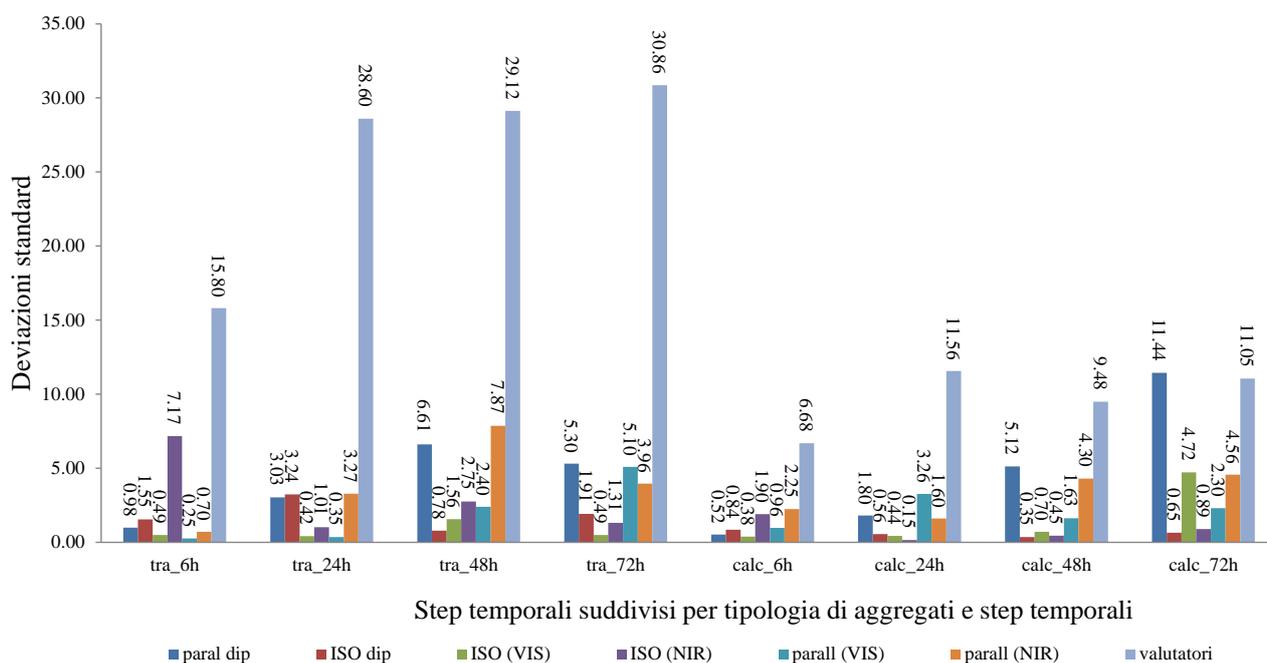


Figura 4.2-29: Trend di variazione delle deviazioni standard per tipologia di aggregato e di elaborazione

I valori delle deviazioni standard mediati per tipologia di elaborazione e tipologia di aggregato mostrano (figura 4.2-30) che i valori di ricoprimento dei clasti da parte del bitume ottenuti mediante ISODATA hanno una minore variabilità rispetto a quelli ottenuti mediante il parallelepipedo. In effetti, le deviazioni standard calcolate a partire dai valori di BIT ottenuti tramite ISODATA di immagini fotografiche (1.23) ed iperspettrali nel VIS (1.15) presentano i valori più bassi rispetto ai valori ottenuti tramite parallelepipedo di immagini fotografiche (4.35) ed iperspettrali nel NIR (3.56). In figura 4.2-31 viene riportato un grafico a torta che rappresenta in maniera schematica la variabilità computazionale dell'indice BIT attraverso l'ISODATA e parallelepipedo di immagini digitali ed iperspettrali.

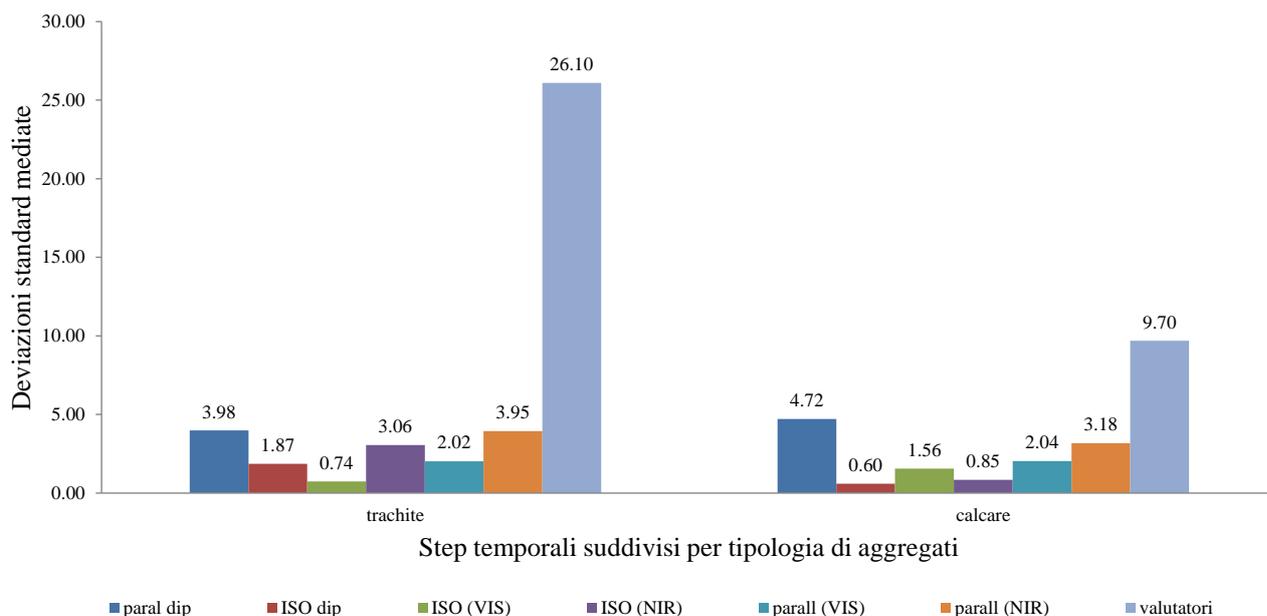


Figura 4.2-30: Deviazioni standard mediate per tipologia di elaborazione e di aggregato

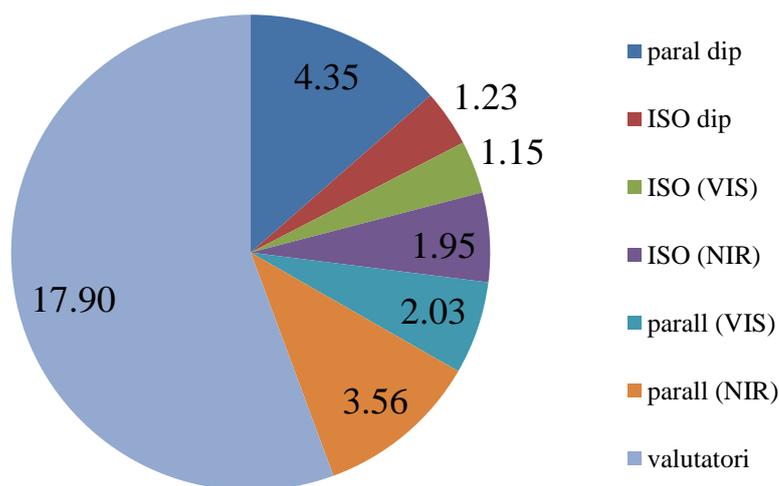


Figura 4.2-31: Schematizzazione della variabilità computazionale della percentuale di ricoprimento del bitume mediante il calcolo delle deviazioni standard.

In considerazione dell'elevata tolleranza nella valutazione visiva riportata all'interno di percentuale della norma UNI EN 12697-11, l'applicazione dei metodi alternativi sembra essere nettamente migliorativa a tale scopo, anche in relazione al confronto effettuato con i risultati emersi dalla valutazione visiva. In particolare le schede di riferimento fanno riferimento ad un dettaglio dell'ordine del 5% tra le classi di valutazione per campioni molto ricoperti, e dell'ordine del 10-20% per quelli poco ricoperti.

In definitiva l'adozione del metodo ISODATA applicato all'analisi di immagini digitali o della piattaforma iperspettrale tra 400 e 1000nm fornirebbe i risultati migliori. Data l'evidente economicità del sistema fotografico rispetto a quello iperspettrale, il primo potrebbe essere inserito come metodologia normata al fine di standardizzare il tipo di output che non sarebbe più soggetto a errori grossolani da parte dei valutatori ma sarebbe bensì oggetto di rigore matematico. L'elaborazione di tecniche di classificazione di fotografie in RGB possono quindi rappresentare un effettivo valore aggiunto a tali studi consentendo di standardizzare le operazioni di elaborazione del dato di laboratorio e riducendo gli errori soggettivi operatore-dipendente.

## 5. Step 2 - SPERIMENTAZIONE DI CAMPO

### 5.1 MODELLAZIONE INDICI SPETTRALI

Come già visto in precedenza, la composizione di un conglomerato bituminoso è costituita per la maggior parte dalla frazione litica alla quale va aggiunta una percentuale di bitume che generalmente è dell'ordine del 5%. L'usura del manto stradale influisce sul grado di sicurezza di un determinato tratto stradale operando sia sulla rugosità primaria che su quella secondaria. Ciò che innesca modifiche ad una pavimentazione a livello strutturale, è la rimozione della componente bituminosa sugli aggregati che può essere dettata sia di una scarsa quantità di bitume nella miscela iniziale sia dalla scarsa adesione da parte di un bitume su un determinato tipo di aggregato. Basandoci sull'esperienze maturate e sui risultati ottenuti nella prima fase di laboratorio, sono state effettuate una serie di sperimentazioni di campo in grado di verificare alcune correlazioni tra risposta radiometrica e tipologia di pavimentazione anche in funzione della loro usura.

Questa parte della tesi ha previsto la raccolta e l'analisi di immagini fotografiche digitali e spettri ripresi direttamente in campo con la stessa metodologia di analisi speditiva al fine di determinare il livello di esposizione degli inerti all'atmosfera.

Attraverso una classificazione supervisionata su base non parametrica (metodo del Parallelepipedo), è stato calcolato, l'Indice dei Clasti Esposti (ICE) in grado di determinare i clasti esposti presenti in ogni fotogramma. E' stato quindi possibile ottenere una quantificazione oggettiva di un parametro correlato con lo stato di degrado delle singole pavimentazioni. Sono stati infine utilizzati dei dati spettro radiometrici nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 390 e 840 nm per valutare una possibile correlazione con l'ICE e quindi quantificare l'esposizione all'atmosfera della frazione litica.

#### 5.1.1 Metodologia e dati

Per lo svolgimento di questo studio è stato utilizzato un *dataset* costituito da 230 fotografie digitali di asfalti associate ad altrettante firme spettrali. I dati di campo utilizzati sono stati acquisiti nell'ambito di diverse campagne di misura effettuate nel tempo nell'ambito di diversi progetti effettuati per conto dell'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico – CNR. Le aree di acquisizione di dati radiometrici ed ancillari su asfalti sono riferiti alle aree che ricadono nella Provincia di Caserta e di Napoli (Regione Campania), Provincia di Roma di Rieti (Guidonia, Regione Lazio) e nella Provincia di Siracusa ed Augusta (Regione Sicilia).

L'utilizzo di fotocamere digitali può rappresentare un utile strumento per la definizione di particolari problematiche. Alcuni esempi di quanto affermato sono dati dalle elaborazioni statistiche di valori RGB di foto digitali effettuate al fine di parametrizzare superfici naturali quali le coperture nevose (Jia et al. 1993, Salvatori et al. 2011) oppure, l'applicazione di classificazioni non supervisionate per l'ispezione in automatico dei semi di granoturco (Qiu 2002). L'utilizzo di tecniche di classificazione (automatica o semiautomatica) di fotografie in RGB possono rappresentare un effettivo valore aggiunto a tali analisi consentendo di standardizzare le operazioni di elaborazione del dato acquisito e riducendo gli errori soggettivi operatore-dipendente. In ambito ingegneristico stradale questo tipo di analisi ha mostrato la possibilità di risalire alle caratteristiche morfometriche degli aggregati (Bessa et al. 2012) e alla ricostruzione di curve granulometriche (Bruno et al. 2012; Marinoni et al. 2005).

A causa dei processi di deterioramento, i conglomerati bituminosi presentano una perdita del bitume in superficie. Tale riduzione, accompagnata dall'esposizione degli inerti, si manifesta in modo marcato alle lunghezze d'onda del visibile con un aumento di valori di riflettenza e con l'apparizione di picchi di assorbimento caratteristici degli inerti. Generalmente infatti gli asfalti appena depositi (nuovi) presentano una "luminosità" più bassa rispetto a quelli vecchi o deteriorati. In base a tali considerazioni il deterioramento delle superfici bituminose può essere ricollegato nel visibile a variazioni colorimetriche. Attraverso l'analisi di valori di RGB di fotografie digitali, acquisite in maniera standardizzata, si può ottenere, determinando il livello di deterioramento di un conglomerato bituminoso, una quantificazione dell'esposizione dei clasti all'atmosfera, analogamente a quanto descritto del Capitolo 4.2.

I dati utilizzati prevedono per ogni campione una foto digitale, una descrizione della superficie e il relativo spettro. A tal fine sono state selezionate pavimentazioni il più possibile omogenee mediante una *query* su più di 5000 firme spettrali di conglomerati bituminosi organizzate in schede e contenute all'interno del geo-database messo a disposizione del CNR-IIA. Per ogni pavimentazione analizzata è stata acquisita un foto utilizzando una Nikon Coolpix S560 con una risoluzione di 10 Mpixel, un sensore da 1/2.3" *inch* CCD (10.7 milioni di pixels) e una lente da 35 mm. Al fine di ottenere fotografie confrontabili tra loro, anche se

acquisite in condizioni di illuminazioni diverse, è stato costruito un “regolo di calibrazione” (dimensioni di 40cm x 40cm) costituito da un’alternanza di tasselli da 5 cm bianchi e neri che fungono sia da scala dimensionale che da riferimento cromatico. Tali riferimenti hanno consentito infatti nella successiva fase di *pre-processing* di rettificare e calibrare le foto. Sebbene ogni fotografia sia stata acquisita in condizione di luce diversa, le bande bianche del regolo hanno permesso, prima dell’acquisizione di ogni fotogramma, una normalizzazione manuale. Per quanto riguarda invece l’assetto geometrico, tenendo in considerazione le dimensioni del regolo di calibrazione e dell’angolo di vista dello spettroradiometro (Fieldspec 3–A.S.D.), la fotocamera è stata posizionata su un treppiede e posta ad una distanza fissa di 68cm dal target.

Le firme spettrali, acquisite in valori di riflettanza grazie all’impiego di un pannello Spectralon come superficie a riflessione lambertiana coprono l’intervallo di lunghezze d’onda compreso tra 350 and 2500nm. Il numero di acquisizioni è stato stabilito in funzione delle condizioni ambientali, riferite in particolare alla stabilità della trasparenza atmosferica. Infatti, poiché nella determinazione del fattore di riflettanza si misura prima la risposta spettrale del pannello e dopo quella del target, bisogna evitare che le condizioni del cielo cambino fra queste due acquisizioni. Pertanto, nel caso in cui le condizioni del cielo non sia perfettamente stabile, il numero di acquisizione della singola curva è stato posto non superiore a 10 mentre pari a 25 in condizioni di cielo stabili.

Nel corso delle campagne di misura sono inoltre stati registrati dati meteorologici e calcolato l’angolo di elevazione solare al fine di poter prendere in considerazione unicamente le misure radiometriche acquisite in condizioni meteo simili e per poter confrontare i dati acquisiti in tempi e luoghi diversi.

L’ottica utilizzata per l’acquisizione radiometrica (angolo di vista di 25°) è stata posizionata alla stessa altezza della macchina fotografica (68cm) al fine di ottenere un’area di acquisizione di 706 cm<sup>2</sup>. L’altezza è stata calcolata considerando l’area interna del regolo (1600cm<sup>2</sup>), ossia considerando un diametro del *footprint* inscritto di 15 cm (figura 5.1-1). Tenendo in considerazione per la classificazione un’ area di interesse-AOI (Area Of Interest) all’interno del *footprint* radiometrico, la firma spettrale può essere considerata rappresentativa dell’area fotografata. Al fine di classificare il centro dell’area corrispondente con il centro di presa di ogni foto, un’area di interesse (AOI) è stata fissata con dimensioni note di 743 righe e 761 colonne per un totale di 565423 pixel al fine di avere all’interno il GIFOV dello spettroradiometro.

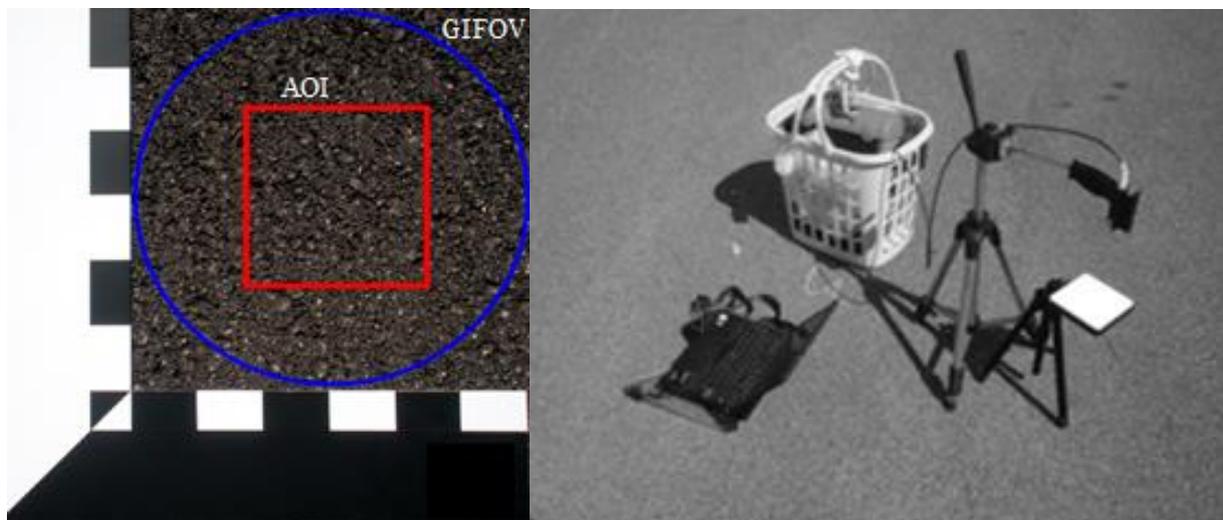


Figura 5.1-1: Regolo di calibrazione utilizzato. In blu il footprint dello spettroradiometro, In rosso l’AOI usata per la classificazione (sinistra). Schema geometrico utilizzato per l’acquisizione delle firme caratteristiche (destra).

Al fine di ottenere una firma spettrale rappresentativa di ogni pavimentazione acquisita, si sono scelte delle aree di 9m x 9m omogenee (ossia senza variazioni del tipo di asfalto o presenza di elementi di alterazione, gommature, sporco ecc.) suddivisi a loro volta in sub-target di 3m x 3m in modo da ottenere, per ogni firma spettrale una media di 9 firme spazialmente distribuite. Tale suddivisione ha avuto il duplice scopo di ottenere un numero costante di firme per ogni tipologia e di valutare la loro variabilità spettrale nello spazio tramite il calcolo del Coefficiente di Variazione (COV).

Al fine di associare ad ogni firma spettrale una descrizione fisica della superficie, a cui ricollegare un diverso tipo di alterazione, sono stati acquisiti diversi parametri descrittivi quali la percentuale stimata di bitume presente sulla superficie dei singoli granuli e il colore.

A tale proposito sono state create 5 classi di bitume tra 0-20% e 80-100% utilizzando come riferimento la scheda associata alla norma per la “Determinazione dell’affinità tra aggregato e bitume” UNI EN 12697-11 nonché al sistema di classificazione di Shvetsov's del 1954. Per quel che riguarda quest’ultimo, si tratta in effetti del riutilizzo di un sistema utilizzato in ambito sedimentologico (più dettagliato rispetto al primo) che consente una valutazione visiva quantitativa dei frammenti rocciosi da una analisi al microscopio rispetto ad un’area fissata. Infine, ad ogni superficie analizzata è stata associato, mediante l’utilizzo di tessere di confronto, un livello di grigio facendo riferimento alla sistema classificativo dei colori di Munsell, 1907 del 1912 ed in particolare alla Scala di tonalità dei Grigi. Per quanto riguarda i dati inerenti le caratteristiche fisiche degli asfalti, quali granulometria e morfologia dei grani, si è fatto uso delle tabelle appositamente elaborate e riportate in Salvatori et al. 2009. La scelta di acquisire questi dati accessori si è resa necessaria poiché le pavimentazioni sono generalmente costituite da miscele di aggregati in cui le percentuali e le dimensioni di questi costituenti variano a seconda dello strato, del tipo di strada nonché dell’ammaloramento stradale. Ne risulta pertanto che il loro intervallo granulometrico può essere estremamente variabile e da ciò può derivare una variazione nelle caratteristiche radiometriche delle superfici. Pertanto, per l’analisi dimensionale degli inerti presenti sulla superficie, si è fatto uso della scala granulometrica di *Wentworth* del 1922 prendendo in considerazione unicamente i 10 termini compresi tra le classi *Ciottoli grossolani (128-64 mm)* e *Sabbia fine (0.25-0.125mm)*. Infatti è tra queste due classi che ricadono le granulometrie più spesso utilizzate per la realizzazione di conglomerati bituminosi come riportato nel rapporto *FHWA 1996 - Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects (FP-96)*. Infine, è stata annotata la tipologia e il livello di alterazione complessivo del sito di misura e dei singoli target seguendo l’*Asphalt Pavement Guide (2008)* a cura della *Washington Asphalt Pavement Association*.

Al fine di poter quantificare in maniera oggettiva la percentuale di bitume valutata in campo usando il sistema classificativo di Shetsov, 1954 e Terry e Chilingar, 1955 si è utilizzato il dato fotografico dal quale estrarre dei parametri quantitativi per parametrizzare il ricoprimento del bitume sui singoli clasti. Invertendo la problematica, e quindi definendo quanti clasti siano privi di bitume e quindi esposti, è possibile risalire al valore di bitume rimosso e quindi all’usura. E’ stato perciò utilizzato l’Indice dei Clasti Esposti (ICE), ossia il rapporto tra il numero di pixel corrispondenti agli aggregati esposti e il numero totale di clasti pixel presenti nell’area di interesse esaminata (Area Of Interest-AOI). Il numero di pixel corrispondenti agli inerti esposti in superficie causa l’apparizione nelle firme spettrali degli asfalti delle “features” spettrali caratteristiche degli inerti.

### **5.1.2 Risultati e osservazioni**

#### ***Correlazione e varianza spettrale***

Tutte le informazioni raccolte in campo sono state inserite in database relazionale; ciò ha consentito di manipolare in modo efficiente una grande quantità di dati mediante l’esecuzione di *query* mirate. L’acquisizione delle caratteristiche descrittive di ogni singola pavimentazione acquisita ha permesso di uniformare la tipologia di spettri da elaborare e quindi di definire delle classi omogenee. Come prima analisi sono state selezionate quelle misure spettrali riferite a superfici suddividendole in base alla percentuale di clasti esposti facendo riferimento all’Indice dei Clasti Esposti (ICE) identificato nella fase di laboratorio.

La scelta di utilizzare l’ICE come elemento distintivo per la scelta delle classi deriva dalla considerazione che, come già visto nel capitolo 2.3, la risposta radiometrica di un asfalto è strettamente influenzata soprattutto dalla percentuale di bitume che ricopre i singoli granuli, oltre che dagli inerti costituenti e dalle diverse forme di ammaloramenti. La risposta radiometrica di una superficie asfaltata infatti è dominata dalla presenza del bitume e si modifica quando questo viene rimosso, a causa dell’usura, poiché diviene dominante il contributo radiometrico del tipo di materiale che costituisce gli inerti. Alle lunghezze d’onda del visibile e infrarosso vicino, infatti, la forma dello spettro non presenta picchi caratteristici; è debolmente concava per asfalti appena deposti, ma diviene convessa per superfici deposte da più di un mese.

In relazione a quanto emerso nel paragrafo 4.1.3, i dati selezionati all’interno del geo-database sono stati analizzati al fine di valutare la correlazione tra le lunghezze d’onda poste a  $\lambda 460\text{nm}$  e  $\lambda 740\text{nm}$  considerando pavimentazioni corrispondenti sia ad asfalti non alterati che con presenza di ammaloramenti. Pertanto il dataset è stato quindi suddiviso in dati radiometrici afferenti a pavimentazioni non usurate, ma con grado diverso di ricoprimento da parte del bitume, e pavimentazioni con fenomeni di sgranamento, fessurazione e presenza di buche. Proiettando in un grafico i valori di riflettanza estratti dagli spettri, utilizzando per le

ascisse i valori corrispondenti a 460nm e per le ordinate quelli corrispondenti 740nm, è possibile osservare una correlazione lineare esprimibile con un'equazione del tipo  $y = ax + b$ .

Nelle figure 5.1-2 e 5.1-3 vengono graficati gli *scatter plot* relativi ai dati radiometrici alle lunghezze d'onda a 460nm e 740nm di tali pavimentazioni. Sia che si tratti di pavimentazioni non usurate che usurate si può osservare una elevata correlazione in entrambi i casi; si osservano rispettivamente coefficienti di correlazione di 0.97 e 0.90.

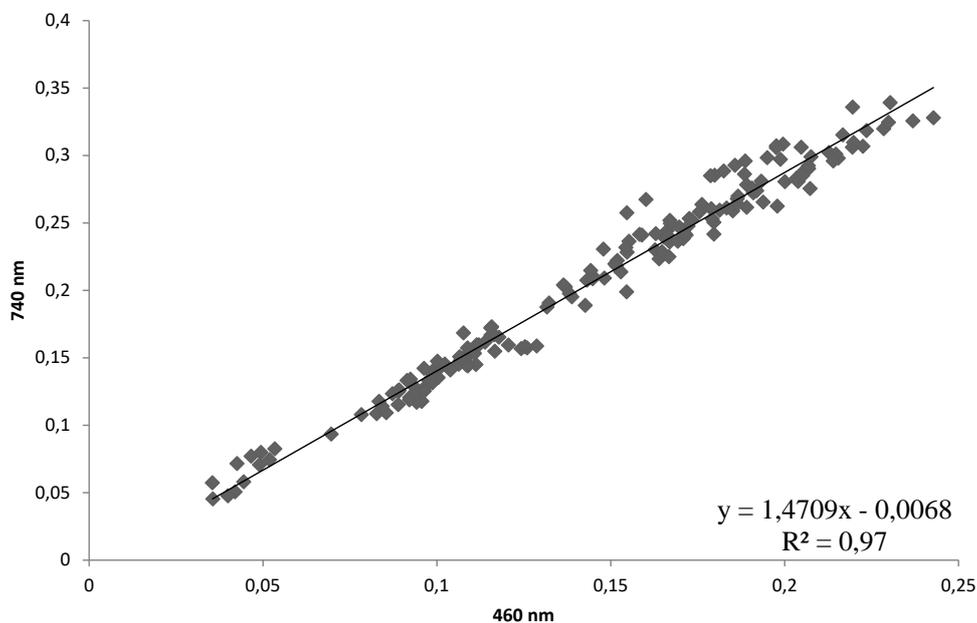


Figura 5.1-2: Relazione tra asfalti non usurati a 460nm e 740nm.

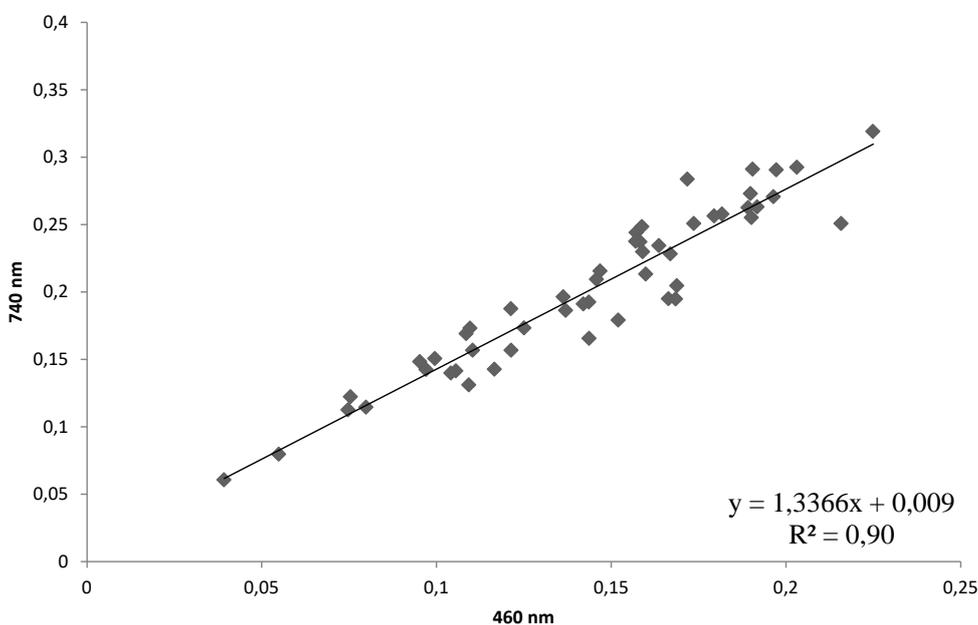


Figura 5.1-3: Relazione tra asfalti usurati a 460nm e 740nm.

Il geodatabase è stato poi interrogato per “aree di acquisizione” (ossia per sito dove sono state acquisite) e le firme spettrali estratte sono state elaborate cercando le correlazioni come descritto precedentemente.

L'analisi delle rette di correlazione per singola area di acquisizione ha mostrato un valore medio di  $R^2$  pari al 94.5% con una deviazione standard del 2.9%; la correlazione minima rilevata è del 90% mentre il valore massimo è pari al 98%. I valori dell'intercetta è molto prossimo allo 0 ( $\pm 0.002$ ) mentre il coefficiente angolare della retta oscilla tra valori compresi tra 0.6 e 0.8 (valore medio 0.7 e deviazione standard di 0.08)

Tali spettri sono stati analizzati anche per quanto riguarda la loro variabilità spettrale in termini spaziali tramite il calcolo del Coefficiente di Variazione (COV) espresso dal rapporto tra deviazione standard e media ed espresso in percentuale. L'analisi, anche qui, è stata condotta considerando 4 categorie di ICE (0%-20%, 20%-40%, 40%-60% e 60%-100%) per pavimentazioni che non presentano fenomeni di degradazione e in pavimentazioni degradate suddivise in quelle soggette a sgranamento e quelle soggette a fessurazione e alla presenza di buche.

Tabella 5.1-1: Analisi dei Coefficienti di Variazione dei dati radiometrici acquisiti

Pavimentazione	Descrizione	Media valore riflettanza (350-2500nm)	Deviazione standard	COV (%)	COV (%) mediato (350- 2500nm)	
<i>non degradata</i>	ICE (0%-20%)	VIS: 0.0787	0.003	4.7	4.4	
		NIR: 0.1110	0.004	3.8		
		MIR: 0.1804	0.008	4.5		
	<i>Numero di spettri 48</i>					
	ICE (20%-40%)	VIS: 0.14754	0.005	2.9	3.1	
		NIR: 0.19213	0.006	3.1		
		MIR: 0.2019	0.0063	3.3		
	<i>Numero di spettri 137</i>					
	ICE (40%-60%)	VIS: 0.2160	0.008	3.6	3.6	
		NIR: 0.2922	0.0116	3.9		
		MIR: 0.3270	0.0109	3.3		
	<i>Numero di spettri 56</i>					
ICE (60%-100%)	VIS: 0.2123	0.007	3.7	4.9		
	NIR: 0.2957	0.014	4.9			
	MIR: 0.3453	0.021	6.1			
<i>Numero di spettri 95</i>						
<i>degradata</i>	Sgranamento	VIS: 0.204	0.014	7.1	8.2	
		NIR: 0.283	0.019	6.8		
		MIR: 0.332	0.039	10.6		
	<i>Numero di spettri 270</i>					
	Fessurazione e buche	VIS: 0.182	0.022	13.6	15.3	
		NIR: 0.219	0.032	15.1		
<i>Numero di spettri 80</i>						

Dall'analisi dei risultati ottenuti, riportati in tabella 5.2-1, è possibile osservare come i valori di COV inferiori siano attribuibili alle pavimentazioni non degradate presentando un valore mediato di 4.0 contro l'11.75 di quelle degradate. Più nel dettaglio i valori maggiori di COV si osservano per le pavimentazioni che presentano fenomeni di fessurazione e presenza di buche rispetto a quelle soggette a sgranamento. Tali dati indicherebbero la forte variabilità spettrale delle pavimentazioni con degrado rispetto a quelle non degradate; tale dato è evidenziato anche dall'aumento dei valori di deviazione standard dei valori radiometrici medi riportati in tabella e riferiti ai diversi *range* spettrali. Tale aumento è inoltre ben evidente se si passa dal VIS al NIR e poi dal NIR al MIR, dove si sono calcolati i valori maggiori.

### Calcolo dell'ICE

Per poter calcolare l'ICE, le immagini digitali acquisite tramite fotocamera sono state oggetto di *pre-processing*. Tale fase ha comportato una co-registrazione usando gli angoli del regolo ed una calibrazione del bianco per permettere il confronto analitico tra le diverse foto. Quest'ultima fase è stata eseguita tramite la normalizzazione utilizzando il riferimento bianco del regolo, ottenendo così un intervallo compreso tra 0 e 1. A causa dell'elevato numero di target da trattare si è deciso di sviluppare una procedura normalizzazione in *batch* tramite software dedicato (*figura 5.1-4*).

Su tutte le immagini digitali sono stati estratti i valori di R, G e B degli aggregati, del bitume e dell'ombra in modo tale da ottenere per ognuno di essi un dato rappresentativo. Come suggerito nel paragrafo 4.2.3 le immagini così normalizzate e corrette geometricamente, sono state elaborate attraverso la classificazione non-supervisionata ISODATA. Attraverso tale elaborazione è stato possibile definire, il numero di pixel corrispondenti agli aggregati esposti e quindi, conoscendo l'AOI, calcolare l'Indice dei Clasti Esposti (ICE). In *figura 5.1-5* vengono riportati due esempi di target classificati aventi diversi valori di ICE.

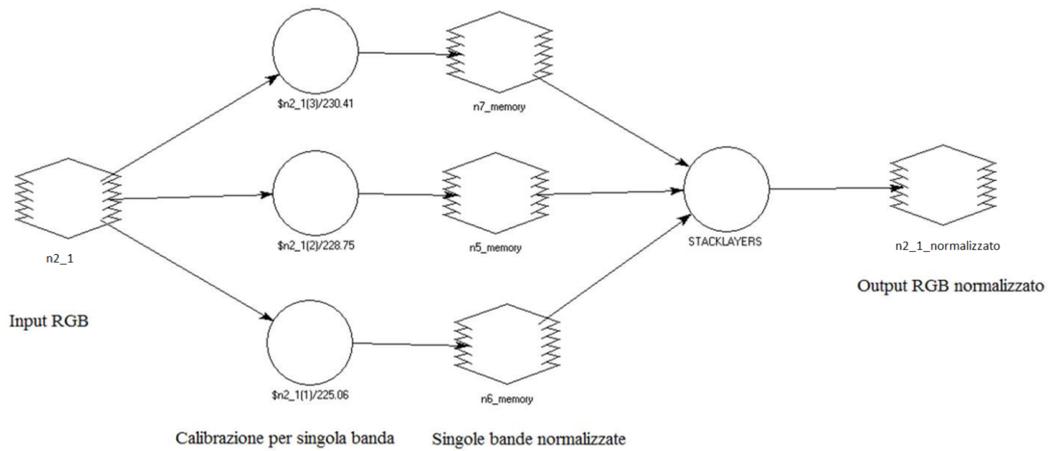


Figura 5.1-4: Schema relazionale per la normalizzazione delle immagini

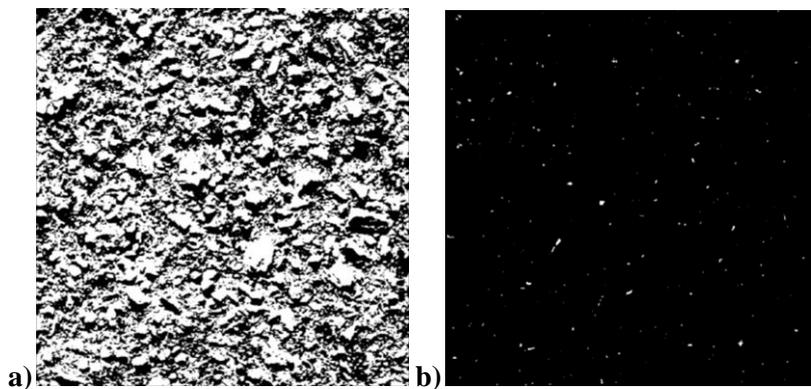


Figura 5.1-5: immagine classificata con ICE=53% (a) e con ICE=1% (b).

L'accuracy assessment, effettuato mediante l'adozione di un dataset di ROI di validazione, ha evidenziato una overall accuracy di 0.91 e un k-coefficient di 0.81 mostrando l'efficacia della procedura adottata anche per dati derivanti da acquisizione in campo, oltre che a quelle derivanti da dati di laboratorio.

Al fine di identificare una relazione tra l'Indice dei Clasti Esposti e i valori di riflettanza delle superfici indagate, sono state prese in considerazione le lunghezze d'onda maggiormente utilizzate in letteratura o comunque relazionate ad assorbimenti dovuti alla presenza di ossidi ferro (ricollegati a fenomeni di usura) e di idrocarburi (ossia di bitume e quindi assenza di usura).

E' stata posta l'attenzione alla correlazione tra i valori R,G,B delle fotografie e l'ICE e tra le lunghezze d'onda a 460nm e 740nm e l'ICE. La prima indagine è stata effettuata attraverso la realizzazione di uno scatter plot 3D (riportata in figura 5.1-6a) in cui viene evidenziata una clusterizzazione lungo la quale si può riconoscere la diminuzione della percentuale di bitume che ricopre gli aggregati (ICE) all'aumentare dei valori delle due lunghezze d'onda nell'intervallo del visibile. Analizzando invece la correlazione delle lunghezze d'onda a 460nm e 740nm, estratte dallo spettro, viene evidenziato un trend crescente dei valori di ICE (suddiviso in 4 classi: 0%-20%, 20%-40%, 40%-60% e 60%-100%) all'aumentare della riflettanza (figura 5.1-6b).

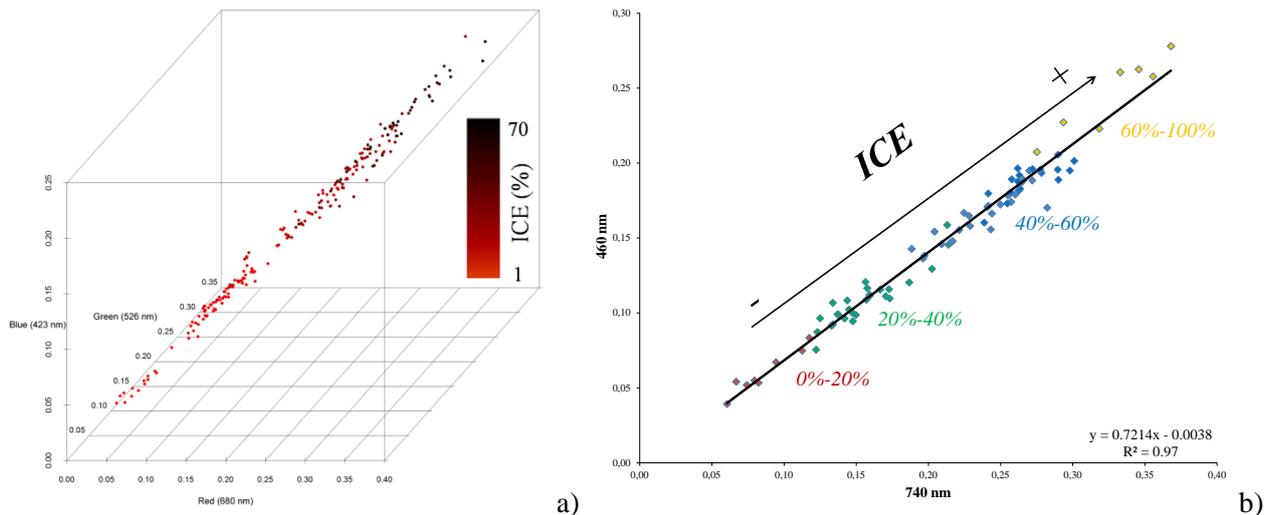


Figura 5.1-6: Scatter plot 3D della relazione tra valori R,G,B e ICE (a) e Scatter plot 2D delle lunghezze d'onda a 460nm e 740nm e trend delle classi di ICE individuate.

Dalle analisi fino ad ora condotte, e dalle nozioni acquisite dalla bibliografia, è evidente come un incremento del contenuto di bitume faccia decrescere i valori di riflettenza nel range VIS NIR (ed in particolare a 460 e 490nm), nonché un incremento dell'esposizione della quantità di inerti esposti faccia aumentare la differenza tra gli spettri a 460 e 830nm; pertanto maggiore sarà questa differenza maggiore sarà l'ICE. Si è quindi disposta una analisi degli spettri nell'intervallo spettrale 350-900 nm al fine di identificare le lunghezze d'onda che risentono maggiormente delle variazioni di aggregati esposti in superficie e, quindi, alla quantità di bitume presente. L'analisi della derivata prima nell'intervallo mostra a 400 nm la maggior variabilità (figura 5.1-7) mentre la minor variabilità si raggiunge a 670nm in corrispondenza di fenomeni di ossidazione. Tale dato è in accordo con Herold et al., 2005 in cui viene evidenziato il forte controllo da parte della quantità di bitume sulla superficie degli asfalti.

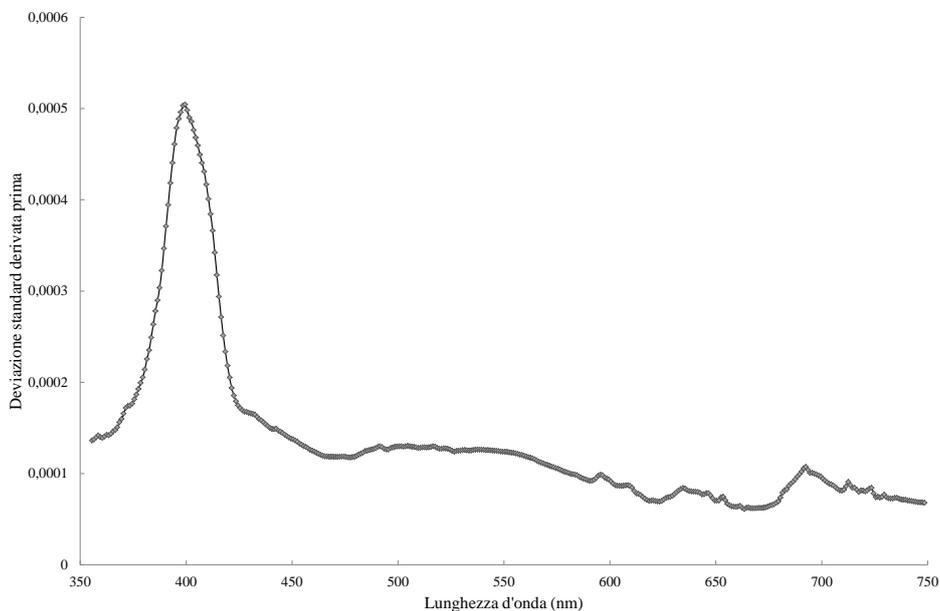


Figura 5.1-7: : variabilità delle derivate a 10nm nell'intervallo 350-900nm.

Al fine di studiare le correlazione tra l'ICE e dato radiometrico, sono state prese in considerazione diverse lunghezze d'onda per il calcolo di indici spettrali relativamente a pavimentazioni con e senza la presenza di alterazioni o forme di degrado. In particolare, per il confronto con l'Indice dei Clasti Esposti, le variabili considerate per la strutturazione degli indici spettrali sono state sia le lunghezze d'onda a 830nm e 490nm utilizzate all'interno del VIS2-difference tratto da Herold et al., 2008, sia le lunghezze d'onda 740 e 460 nm. In aggiunta sono stati presi in considerazione i valori di derivata prima a 400nm e 670nm.

Di seguito vengono riportate le formule dei 6 indici spettrali individuati:

$$I_1 = \sqrt{\lambda_{740nm} + \lambda_{830nm}} \quad (eq.1)$$

$$I_2 = \lambda_{830nm} * e^{\lambda_{740nm}} \quad (eq.2)$$

$$I_3 = der_{\lambda_{400nm}} \quad (eq.3)$$

$$I_4 = der_{\lambda_{670nm}} * e^{(der_{\lambda_{400nm}} - der_{\lambda_{670nm}})} \quad (eq.4)$$

$$I_5 = e^{((\lambda_{830nm} - \lambda_{490nm}) - (\lambda_{740nm} - \lambda_{460nm}))} + \lambda_{740nm} \quad (eq.5)$$

$$I_6 = \frac{(\lambda_{740nm} * \lambda_{830nm})}{\sqrt{\left(\frac{\lambda_{740nm}}{\lambda_{460nm}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_{830nm}}{\lambda_{490nm}}\right)^2}} \quad (eq.6)$$

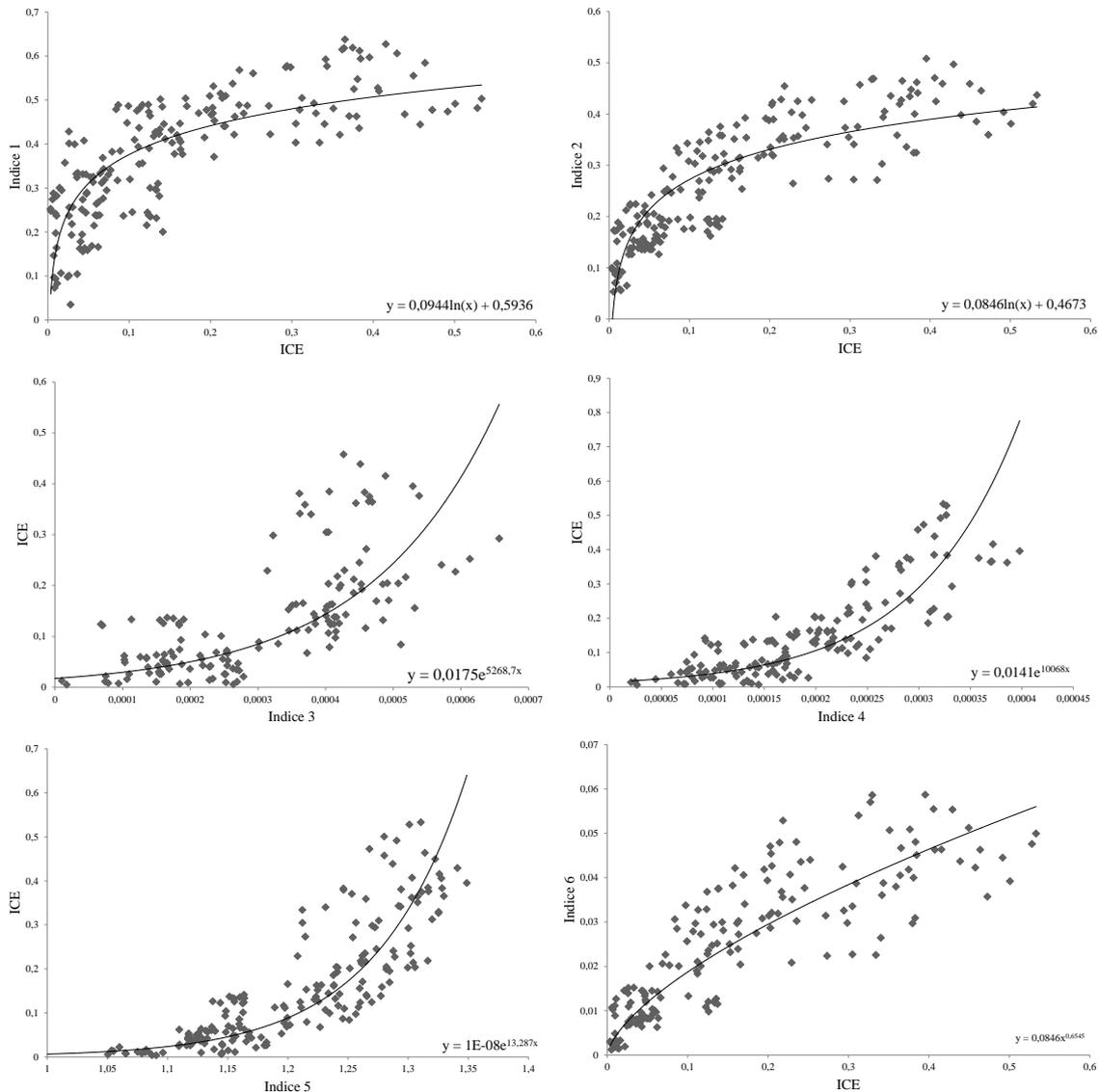


Figura 5.1-8: Correlazioni tra ICE e indici spettrali.

Gli scatterogrammi e le relative equazioni di correlazione sono invece riportate in figura 5.1-8 mentre in tabella 5.2-2 sono riportati i risultati delle correlazioni ( $R^2$ ) e relativi indici di correlazione secondo Bravais-Pearson (rs) ottenuti tra tali indici e l'ICE. L'indice  $I_6$  è quello che sia in termini di  $R^2$  che di rs (rispettivamente di 0.77 e 0.86) esprime la maggiore correlazione tra radiometria e ICE. Buoni risultati si ottengono anche con l'indice  $I_2$  dove  $R^2 = 0.75$  e  $rs = 0.82$ .

Tabella 5.2-2:Indici spettrali

Indici spettrali						
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$
$R^2$	0.61	0.75	0.69	0.64	0.74	<b>0.77</b>
$rs$	0.74	0.82	0.83	0.84	0.81	<b>0.86</b>

### Considerazioni circa l'applicazione dell'ICE a dati telerilevati

Se si considerano le lunghezze d'onda a 460 nm, 490 nm, 740 nm and 830 nm utilizzate per il computo degli indici spettrali, la loro applicazione può essere simulata su diverse tipologie di sensori, sia satellitari multispettrali, quali il QUICKBIRD e la WORLDVIEW-3, sia aviotrasportati iperspettrali come il *Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer* (MIVIS), l'*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) e il *Compact Airborne Spectrographic Imager* (CASI).

Nel campo di quest'ultimi sensori aviotrasportati citiamo il sensore MIVIS il quale è costituito da 4 spettrometri attraverso i quali viene misurata la radiazione incidente nel visibile (20 bande tra 430 nm e 830 nm), vicino infrarosso (8 bande tra 1150 nm e 1550 nm), medio infrarosso (64 bande tra 2000 nm and 2500 nm) e termico infrarosso (10 bande tra 8200 nm e 12700 nm) per un totale di 102 bande. Sebbene nel caso dell'AVIRIS e del CASI l'intervallo di lunghezze d'onda indagato sia inferiore rispetto al MIVIS, nell'intervallo spettrale di interesse questi due sensori sono dotati di più bande. L'AVIRIS è infatti costituito da 224 bande comprese tra 380 nm and 2500 nm mentre il CASI-1500 possiede 288 bande tra 380 to 1050 nm. Tutti e tre i sensori permettono di calcolare agevolmente gli indici sopra citati ed in particolare l'indice  $I_6$  in quanto dotati di una elevata risoluzione spettrale e radiometrica.

In considerazione dell'importanza della risoluzione spaziale che il target "strada" necessita per una accurata classificazione, i sensori aviotrasportati sopra descritti potrebbero non essere sufficientemente risolti. Conseguentemente l'impiego del dato satellitare ad alta risoluzione sub-metrico nel pancromatico e comunque inferiore ai 3 metri nel multispettrale, permetterebbe una migliore distinzione e categorizzazione di tali superfici.

La difficoltà, tuttavia, consiste nell'attribuire i valori radiometrici necessari al calcolo degli indici alle bande disponibili che non sempre corrispondono alle bande corrette. Se si considerano infatti immagini satellitari QUICKBIRD e WORLDVIEW-3, è infatti evidente il ri-utilizzo di alcune bande, come ad esempio la banda 1 del QUICKBIRD o la banda due del WORLVIEW-3 a cui viene assegnato sia il dato radiometrico a 460nm che quello a 490nm. In tabella 5.2-3 vengono riportate tutti gli abbinamenti banda-lunghezza d'onda per i sensori sopra descritti.

Tabella 5.2-2: Correlazione tra bande e lunghezza d'onda per il calcolo dei diversi indici spettrali descritti mediante l'utilizzo dei valori radiometrici a 460 nm, 490 nm, 740 nm and 830 nm

Sensori	Lunghezza d'onda				Risoluzione spaziale
	$\lambda=460$ nm	$\lambda=490$ nm	$\lambda=740$ nm	$\lambda=830$ nm	
AVIRIS	b8	b11	b40	b49	Dipende dalla quota di volo (generalmente maggiore di 3m)
MIVIS	b2	b3	b16	b20	
CASI-1500	b21	b29	b93	b116	
WORLDVIEW-3	b2-blue	b2-blue	b6-Red edge	b7-Near IR1	Pan:0.31m/MS:1.24m
QUICKBIRD	b1-blue	b1-blue	b4-Near IR	b4-Near IR	Pan:0.65m/MS:2.62m

Risulta pertanto evidente come, se dal punto di vista di risoluzione radiometrica e spettrale i sensori aviotrasportati siano quelli più adatti, al contrario dal punto di vista della risoluzione spaziale possano essere carenti rispetto ai sensori satellitari.

## 5.2 ROVER FOR ASPHALT ANOMALIES SURVEY (RAAS)

### 5.2.1 Metodologia e dati

In questo capitolo vengono descritte le prove effettuate per valutare le potenzialità di applicazione in campo dei sistemi di telerilevamento mediante l'integrazione di due diverse tipologie di acquisizione dati, entrambe legate all'*imaging* multispettrale, in associazione a dati spettroradiometrici. Il dataset "*ad immagini*" è stato acquisito mediante una camera multispettrale a 3 bande Tetracam ADC Lite e una fotocamera digitale ad alta risoluzione SONY DSC-QX100. Tale strumentazione è stata posizionata su di un prototipo di drone terrestre (ROVER), denominato RAAS (*Rover for Asphalt Anomalies Survey*), per l'acquisizione di immagini multispettrali delle diverse tipologie di pavimentazioni presenti all'interno di un'area test. Quest'ultima area, situata nei pressi di Passo Corese (Provincia di Rieti) (figura 5.2-1), è stata scelta per l'elevata eterogeneità, in termini di differenti tipologie e grado di ammaloramento, delle pavimentazioni stradali presenti. I dati sono stati acquisiti nei mesi di luglio, settembre ed ottobre 2016.

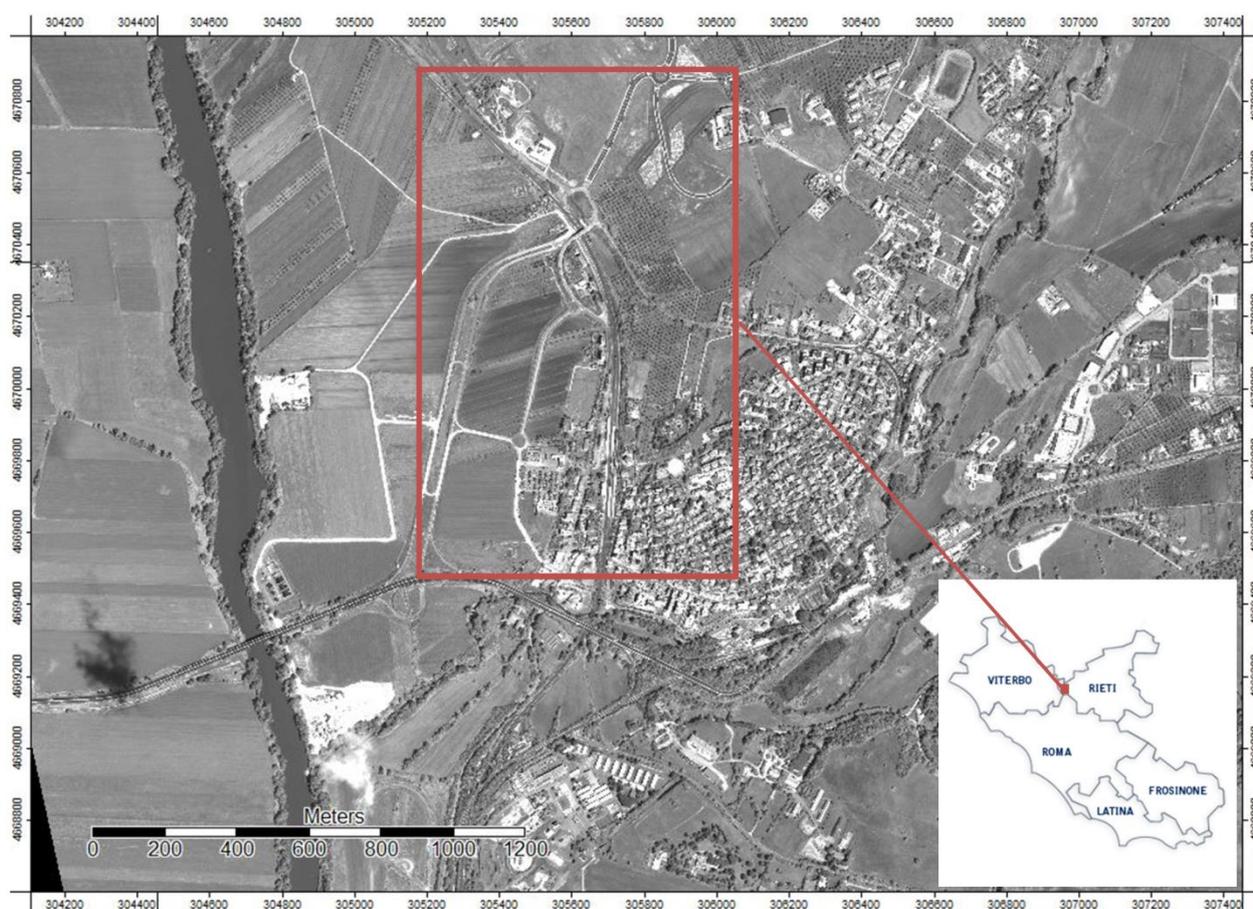


Figura 5.2-1: Area test ubicata nei pressi di Passo Corese (Rieti).

### Sistemi di acquisizione multi piattaforma

#### Spettroradiometro

Per le acquisizioni di campo è stato utilizzato uno spettroradiometro Fieldspec 4 della ASD i cui dati sono stati confrontati con quelli della piattaforma. Per le caratteristiche tecniche di questo strumento si rinvia al Capitolo 4.1.2. Per l'acquisizione delle firme spettrali si è tenuto conto della dimensione del regolo di calibrazione (40cm x 40cm e costituito da tasselli da 5 cm bianchi e neri), e dell'ottica utilizzata per l'acquisizione (con angolo di vista di 25°). La fibra ottica è stata posizionata a 68cm dal terreno al fine di ottenere un'area di acquisizione di 706 cm<sup>2</sup>. L'altezza è stata calcolata considerando l'area interna del regolo (1600cm<sup>2</sup>), ossia considerando un diametro del *footprint* inscritto di 15 cm (come descritto precedentemente).

Le firme spettrali, acquisite in valori di riflettanza grazie all'impiego di un pannello Spectralon come superficie a riflessione lambertiana, ricadono nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350 and 2500nm. Le misure sono state effettuate in un arco di tempo di circa 2 ore a cavallo del momento di massima insolazione e per una migliore caratterizzazione spettrale delle superfici sono state rilevate in media 10 firme spettrali per ogni tipologia di target indagato. Inoltre il numero di acquisizioni (25) è stato stabilito in funzione delle condizioni ambientali ed in particolare alla stabilità della stabilità atmosferica che è stata monitorata con dei cicli di apertura e chiusura del bianco di riferimento. In figura 5.2-2 si riporta la fotografia del sito PC1 presso l'area di studio a Passo Corese.



Figura 5.2-2: Sito PCI presso Passo Corese (Rieti).

#### Camera wireless

La fotocamera digitale utilizzata per l'acquisizione delle fotografie digitali RGB è una camera SONY DSC-QX100 (figura 5.2-3) wireless estremamente versatile e performante. La camera monta un sensore CMOS Exmor R® con risoluzione ottica di 20.2 megapixel. L'ottica ha un range di apertura del diaframma di F1.8 - F4.9, la lunghezza focale è invece compresa tra 4.45 a 44.5mm. Per quanto riguarda la velocità di scatto massima è di 1/2000s. Le caratteristiche tecniche, le dimensioni e il peso ridotto di questa camera la rendono ideale per essere montata sul RAAS o su droni aerei e quindi per effettuare il tipo di rilievo proposto.



Figura 5.2-3: SONY DSC-QX100

#### Camera multispettrale

I dati multispettrali (immagini) sono stati acquisiti mediante l'impiego della camera ADC Lite della Tetracam. Si tratta di una camera di ridotte dimensioni e peso ed anche questa ben si presta ad essere impiegata per i "small-payload-carrying vehicles" quali rover terrestri o Unmanned Aerial Vehicules (UAV) quali ottacotredri o droni ad ala fissa. La camera contiene un sensore da 3.2 megapixel CMOS (2048 x 1536 pixels) ottimizzato per catturare l'energia elettromagnetica tra 520nm e 920nm e monta una lente da 8 mm.

Per quel che riguarda le dimensioni della camera queste sono di 114 mm x 77 mm x 22 mm senza considerare la lente da 8mm e di 114 mm x 77 mm x 60.5 mm considerando la lente. Il peso, contenuto, è di 200 grammi. I dati vengono immagazzinati in una Compact Flash alloggiata all'interno della camera. Le 3 bande di acquisizione corrispondono al Green, Red and NIR che approssimativamente ricadono nelle bande TM2, TM3 e TM4 del sensore multispettrale satellitare Landsat. La ADC Lite ha al suo lato diversi connettori per il collegamento all'esterno tra cui: un connettore USB, un connettore Video Out, un connettore per il trigger, un connettore per il ricevitore GPS e una uscita per l'alimentazione. In figura 5.2-4 sono riportate lo schema della camera con le dimensioni, le connessioni e la fotografia della ADC Lite e foto durante un test di acquisizione ad una altezza di circa 1.5m.

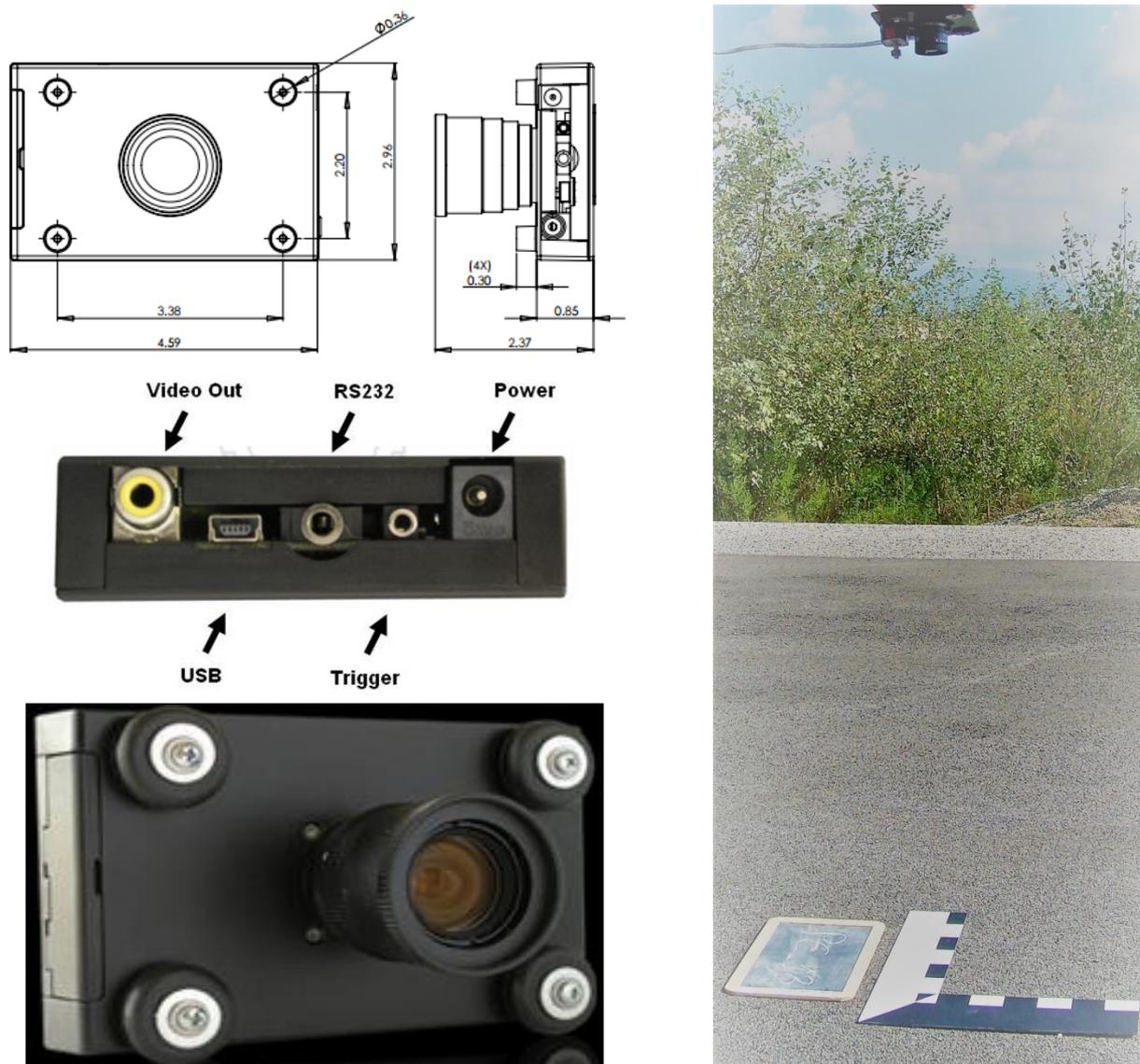


Figura 5.2-4: Caratteristiche ADC Lite (da scheda tecnica Tetracam) e test acquisizione in campo

La camera è dotata di un software associato, *PixelWrench2*, che consente la cattura ed il processamento di immagini multispettrali a partire da dati di tipo RAW e DCM. Il software ne consente inoltre la conversione diretta nei formati BMP, JPEG, PNG, WMF e TIFF. La radiazione elettromagnetica viene registrata in tre formati a 10bit in DCM e RAW e a 8bit in RAW a seconda di come viene configurata la camera.

La camera possiede inoltre la possibilità di settare, a seconda delle necessità, il tempo di acquisizione delle singole immagini. In tabella 5.2-3 vengono riportati gli intervalli di acquisizione e la risoluzione del pixel a diverse distanze target-sensore tenendo conto di un utilizzo sia di tipo avionico che a bassa quota.

Tabella 5.2-3 Intervalli temporali tra acquisizioni successive

Risoluzione immagine	8-Bit Raw Image	10-Bit Raw Image	10-Bit DCM
2048 x 1536 pixels	3.0 Seconds	5.0 Seconds	7.5 Seconds

Dimensione del Sensore (mm)	Distanza dall'oggetto (m)	Risoluzione a terra (mm per pixel)	FOV (larghezza x altezza) (m)
6.55 x 4.92	0.5	0.2	0.41 x 0.31
<b>Pixel Size (microns)</b>	0.7	0.28	0.57 x 0.43
3.2	1	0.4	0.82 x 0.615
	1.5	0.60	1.23 x 0.92
	5	2.0	4.10 x 3.07
	10	4	8.18 x 6.15
	122 m	48.8	100 x 75
	213.4 m	85.4	175 x 131

### *Sviluppo drone terrestre per il monitoraggio delle pavimentazioni stradali*

Il rover utilizzato, di derivazione dal drone terrestre in possesso presso il CNR-IIA per il monitoraggio ambientale volto al controllo di emissioni diffuse di biogas in discarica, è stato riprogettato e modificato tenuto conto della necessità di contenere sia i costi sia i tempi relativi allo sviluppo di un prototipo di drone terrestre per il monitoraggio delle pavimentazioni stradali.

La base meccanica è rappresentata da un modello radiocomandato a motore elettrico (RC) della Traxxas, il Summit scala 1/10 (modello 56076). Il rover è equipaggiato con sensori telemetrici costituiti da un'antenna GPS (Global Positioning System) capace di fornire in tempo reale, all'operatore in remoto, le coordinate relative alla posizione in latitudine e longitudine del veicolo. Al fine di controllare il veicolo a distanza è presente una telecamera in alta definizione radiocollegata ad uno schermo specifico così da poter osservare in tempo reale il percorso del drone.

Le dimensioni degli ingombri massimi e del telaio sono indicate in figura 5.2-2, mentre il peso, senza il pacco batterie, è di circa 5 Kg.



Figura 5.2-5: Dimensioni del rover.

Sul modello originale sono state inoltre sostituite le batterie a NiMH con due batterie LiPo rendendo possibile dalla presenza del sistema di rilevamento di bassa tensione a due stadi (LVD, Low Voltage

*Detection*). Ogni batteria, di dimensione pari a 137,5 x 46 x 25 mm e di 280g di peso, vengono fornite con connettori *Deans Ultra T-Plug* e cavo *JST XH* per il bilanciamento delle celle durante la carica. La struttura meccanica è stata quindi completata da un involucro realizzato in lamina di alluminio, fissato con apposite cerniere ma di semplice rimozione, al fine di poter accedere facilmente ai dispositivi elettronici, ai sensori e al sistema idraulico posizionati sulla base.

I collegamenti radio di cui il rover è munito consentono ad un utente remoto il controllo del dispositivo. Il radiocomando utilizzato è il modello “*Flash 7*” della *HITEC* (Figura 5.2-6a), progettato per essere in grado di fornire una risposta rapida grazie alla risoluzione da 4096 passi e alla latenza da 7 ms di cui è dotato che permettono un controllo dei servocomandi più preciso e netto. La *Flash 7* è provvista di un vano batterie per 4 pile Alkaline AA o batterie ricaricabili della dimensione delle AA. Nella schermata principale della *Flash 7* è possibile visualizzare il voltaggio della batteria e una barra che indica la capacità rimanente.



Figura 5.2-6: Trasmittente Hitec Flash 7 utilizzata e dettaglio dei pulsanti (a) e Ricevente Hitec Optima 7 (b).

La ricevente radio installata sul drone è il modello “*Optima 7*” della Hitec (figura 5.2-6b), ha dimensioni pari a 56.9 x 20.8 x 11.6mm e peso di 17g; il voltaggio di funzionamento è di 3.7 – 8.4V e la corrente assorbita è pari a 30 mA.

L’antenna della ricevente è un’antenna “*Sperrtopf*”: la parte superiore, della lunghezza pari a  $\lambda/2$ , costituisce la parte radiante, mentre la parte inferiore, lunga un quarto d’onda cioè  $\lambda/4$ , serve ad adattare l’impedenza dell’antenna con il trasmettitore o con il ricevitore (a seconda che l’antenna sia in trasmissione o ricezione) e ad avere un *ROS* (Rapporto d’Onda Stazionario) il più basso possibile. La parte bassa della *Sperrtopf* è una linea a  $\lambda/4$  aperta da un lato; viene utilizzata come “trasformatore variabile”. Al suo estremo aperto l’impedenza è altissima, paragonabile a quella dell’antenna, e scende gradualmente fino a zero nel punto di cortocircuito. Esiste quindi un punto intermedio in cui l’impedenza risulterà adattata con quella del trasmettitore/ricevitore e in quel punto è stato applicato il segnale proveniente dal ricevitore o equivalentemente prelevato il segnale disponibile al ricevitore. L’antenna così configurata è quasi omnidirezionale, esclusi i nulli sull’asse d’antenna.

Con l’accoppiata trasmettente/ricevente delineata, i possibili distinti canali di trasmissione sono sette, ognuno associabile ad uno dei comandi della *Flash 7* e facilmente programmabili. Il collegamento tra la ricevente e i vari dispositivi avviene tramite tre cavi (alimentazione, massa e segnale); il canale 7 è quello collegato alla centralina di regolazione elettronica della velocità e quindi permetterà all’utente remoto di controllare l’accelerazione del drone. Il canale 1 e il canale 2 sono rispettivamente collegati ai servocomandi che governano la sterzata e il rapporto di trasmissione. I canali rimanenti, lasciati liberi in questa prima fase di sperimentazione, sono in grado di comandare degli appositi interruttori (“*SRC Switch*”) al fine di controllare lo start e stop della piattaforma sensoristica di imaging multispettrale.

Grazie al sistema di telemetria installato sul drone, l’utente remoto ha la possibilità di monitorare in tempo reale le informazioni GPS e il voltaggio della batteria che alimenta la piattaforma. La stazione di telemetria utilizzata è il modello “*HTS-SS ADVANCE*” (*Telemetry System Sensor Station*) della Hitec di dimensioni pari a 40.4 x 28.4 x 11.7 mm, e con un range di voltaggio di funzionamento pari a 4.8 – 8.4 V.

Per permettere una guida più agevole del drone da remoto si è scelto di installare una videocamera con tecnologia di acquisizione *CMOS* (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) da 1/3” (3.6 x 4.8 mm), *FOV* (field of view) di 127° in diagonale, 110° in orizzontale e risoluzione di 700 *TVL* (numero di Linee TV Verticali). La trasmissione del segnale avviene tramite trasmettitore dotato di antenna lineare operante sulla banda 5645 – 5945 MHz in modulazione di frequenza FM (portante a 8 GHz) che può essere alimentata da una tensione di funzionamento tra 7 e 24 V (corrente di funzionamento pari a 190 mA). Sia per la

videocamera sia per il trasmettitore si sono realizzati gli involucri di protezione in plastica e i supporti per posizionarli sul drone; la videocamera è stata posta sul palo del sistema di supporto a 26 cm dal piano della base. Il segnale video è visualizzato su un apposito schermo LCD portatile (alimentato da una batteria interna ricaricabile) da 7" con ricevente incorporata.

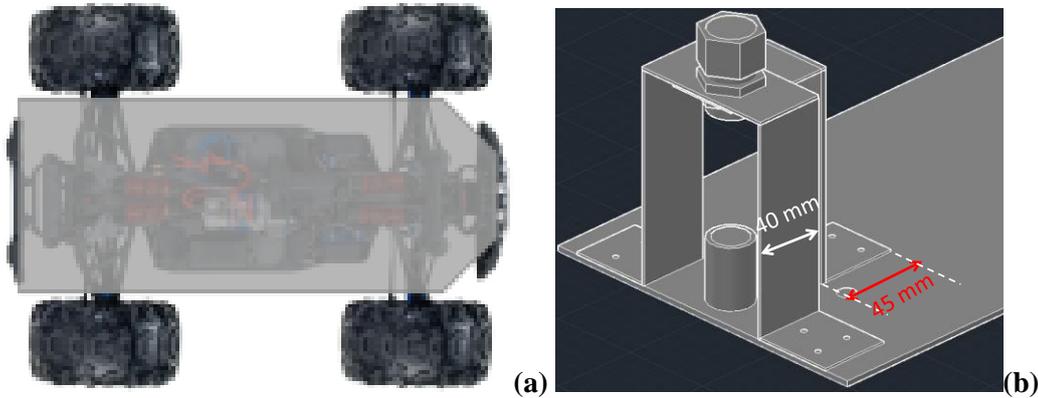


Figura 5.2-7: Base di supporto e posizionamento sul rover (a) e modello CAD del sistema di supporto ottiche di acquisizione (b).

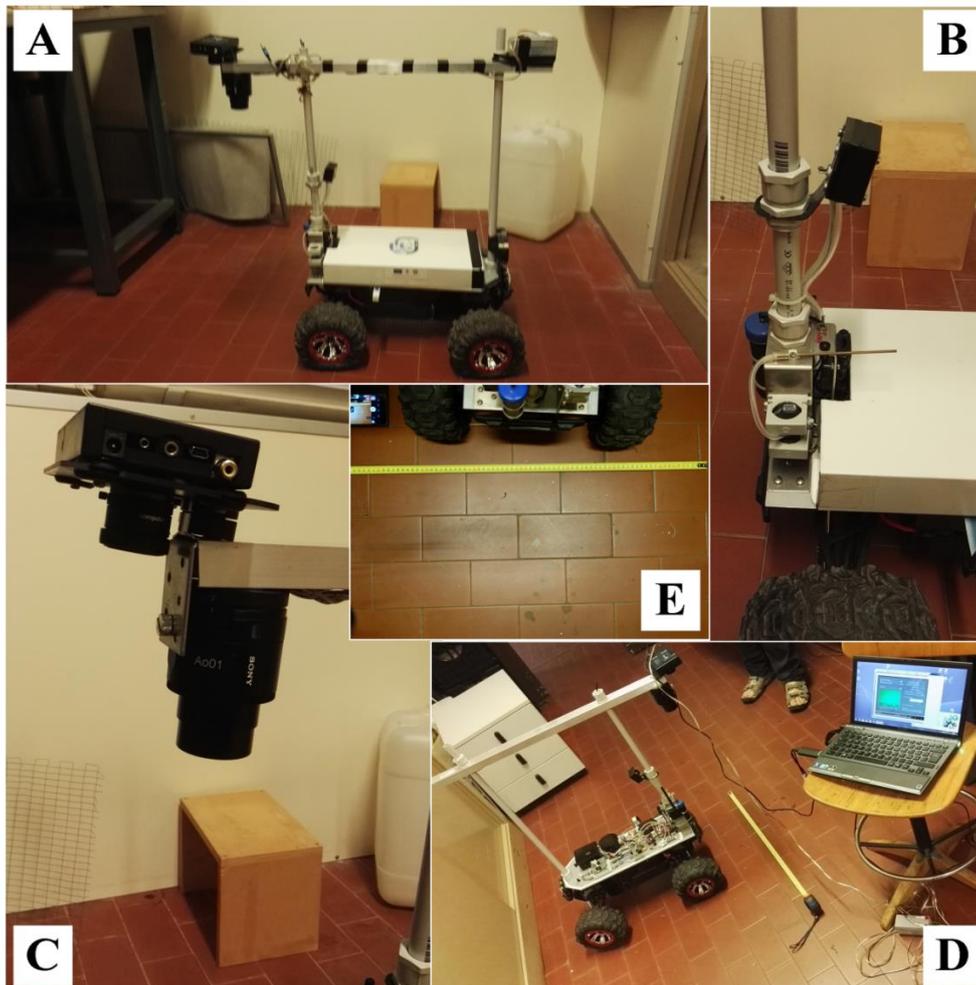


Figura 5.2-8: Rover allestito per il monitoraggio delle pavimentazioni stradali. A) ROVER pronto per l'utilizzo, B) camera per il controllo di navigazione e sensore GPS, C) dettaglio del posizionamento delle camere e D) e E) fasi di calibrazione delle ottiche.

Alla struttura sono state apportate alcune modifiche al telaio al fine di ottenere un solido pianale per il montaggio delle staffe di supporto dell'apparecchiatura di imaging, telecamera di navigazione e GPS. La base è realizzata attraverso un materiale composito costituito da due lamine di alluminio che racchiudono

uno strato di materiale plastico, di spessore compressivo pari a 3mm (figura 5.2-7a). Il sistema di sostegno per l'installazione delle camere è realizzato attraverso un tubo di PVC alloggiato su un supporto costruito in alluminio di spessore pari a 1.5 mm e connettori in gomma. L'obiettivo fotografico si trova ad una altezza di 50 cm da terra mentre la camera multispettrale a 70 cm da terra producendo un pixel di 0.28mm ed un FOV di 0.57 x 0.43m.

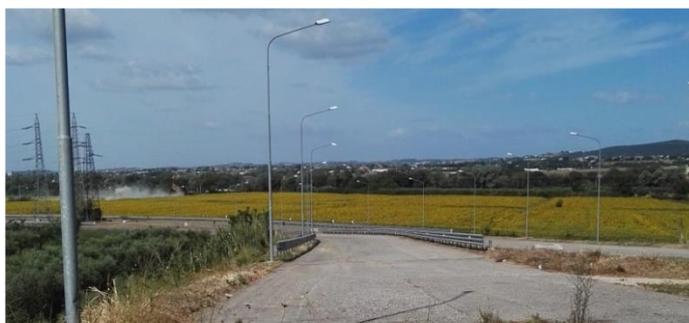
La batteria di alimentazione della tetracam è stata posizionata sempre sull'asta in alluminio ma nella parte anteriore del rover per bilanciare il peso delle due camere, così come è stato aggiunto un contrappeso sulla parte anteriore del pianale. Le gomme e le sospensioni sono state settate irrigidite al massimo in modo da ottenere una migliore stabilità. Nella figura 5.2-7b viene mostrato il progetto realizzato attraverso AutoCAD riportante gli alloggi per il posizionamento dei tubolari e le staffe di supporto.

In figura 5.2.8 viene invece illustrato il prototipo durante la fase di allestimento della strumentazione di bordo e la fase di calibrazione e taratura della distanza sensore-target e calcolo dei parametri di risoluzione e campo di vista della camera multispettrale.

## 5.2.2 risultati e osservazioni

### Ubicazione siti e caratterizzazione tipologie di ammaloramento

L'acquisizione dei dati multispettrali ad immagini attraverso l'utilizzo del drone terrestre e dei dati radiometrici puntuali di campo attraverso lo spettroradiometro è avvenuta durante una campagna di rilievo effettuato nel mese di settembre 2016 nei pressi dell'area adiacente alla stazione ferroviaria di Passo Corese. In figura 5.2-9 si riporta il dettaglio dell'area di studio con l'ubicazione dei siti di monitoraggio dalla pavimentazione stradale con le fotografie dei principali settori investigati.



a)



b)

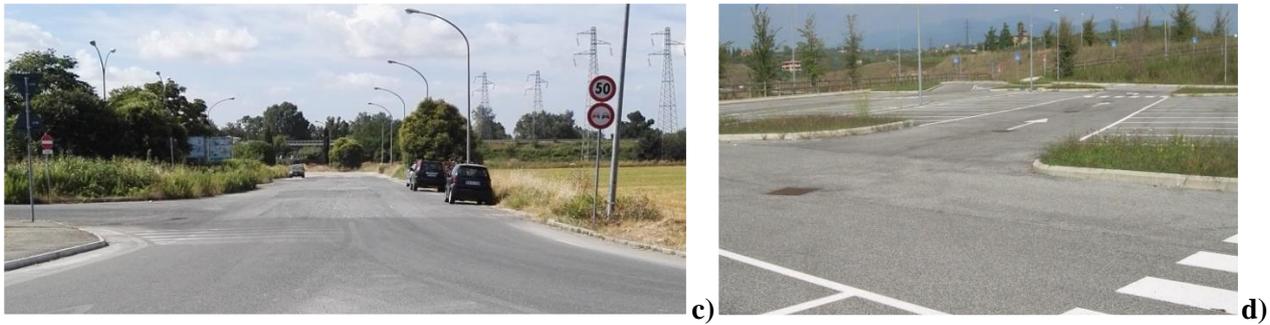


Figura 5.2-9: Area di indagine con ubicazione dei siti di campionamento dati e fotografie settore A pc8\_9\_10\_11(a), settore B pc\_6\_7\_14(b), settore: pc1\_2\_3\_4\_5\_15\_16 (c) e settore D: pc\_12\_13(d).

Il settore A corrisponde ad un tratto di strada finita ma rimasta chiusa al traffico per lungo tempo. La sua realizzazione risale a prima del 2010 con una prima asfaltatura compresa tra il luglio 2010 e il settembre 2010 ed una seconda asfaltatura tra il marzo 2012 e il luglio 2012. Tali periodi sono state dedotti a partire dalla fotointerpretazione delle immagini storiche presenti su Google Earth ®. Solo ultimamente, nel mese di settembre 2016, è stata completata ed aperta al traffico. Tale strada rappresenta un'importante snodo merci a seguito della realizzazione del polo logistico di Passo Corese. Il settore B è rappresentato da un tratto di strada in buone condizioni, senza la presenza di fessurazioni o buche. La realizzazione di tale tratto risale al periodo di giugno/luglio 2010 ed è una strada generalmente poco trafficata. Il settore C rappresenta la via di comunicazione per l'accesso al parcheggio principale della stazione di Passo Corese nonché dell'arrivo del terminal dei bus di linea per Roma, Orte e Rieti. Su tale tratto insiste inoltre il traffico pesante legato alla presenza di una cava di inerti leggeri. A causa dell'intenso traffico sia leggero che pesante, tale tratto di strada presenta diverse tipologie di ammaloramenti tra cui difetti di regolarità, di aderenza e di portanza. Il settore D, infine è stato considerato in quanto facente parte di un'area non ancora soggetta a traffico veicolare, realizzata tra l'agosto 2011 e il marzo 2012 (pc\_12) e tra l'ottobre 2014 e il luglio 2015 (pc\_13), e caratterizzata da pavimentazioni nuove.

In tabella 5.2.4 si riporta, per ogni settore analizzato il tipo di pavimentazione e la relativa tipologia di ammaloramento. Per ognuno dei siti è stato realizzato un transetto da lato a lato della carreggiata mediante l'acquisizione tramite camera multispettrale utilizzando a tale scopo il RAAS. In totale sono stati acquisiti 9 transetti in corrispondenza dei siti sopra indicati.

Tabella 5.2.4: Stato delle pavimentazioni indagate

Settore	Sito	Strato	Ammaloramento pavimentazione	Transetto
A	PC_8	Usura	Nessuna - vecchia	T1
	PC_9	Usura	Nessuna - recente	
	PC_10	Usura	Nessuna - vecchia	T2
	PC_11	Binder	-	
B	PC_6	Usura	Nessuna – nuova appena stesa	T3
	PC_7	Usura	Nessuna - appena stesa	
	PC_14	Usura	Nessuna - vecchia	T4
C	PC_1	Usura	Nessuna - nuova	
	PC_2	Usura	Arrotondamento aggregati	
	PC_3	Usura	Fessurazione ramificata	T5
	PC_4	Usura	Sgranamento lieve	
	PC_5	Usura	Arrotondamento aggregati con olii	
	PC_15	Usura	15_1:Fessurazione ramificata profonda, 15_2: Sgranamento lieve, e 15_3: Nessuna, 15_4: Fessurazione	T6
	PC_16	Usura	16_1:Fessurazione, 16_2:Toppe, 16_3: Buche profonde	T7
D	PC_12	Usura	Nessuna - nuova	T8
	PC_13	Usura	Nessuna – recente	T9

### *Analisi dati radiometrici*

Per ogni sito indagato sono state effettuate delle acquisizioni effettuate mediante camera fotografica digitale e camera multispettrale (vedi più avanti) installate sul rover in corrispondenza delle quali sono state acquisite anche le rispettive firme spettrali. Di seguito vengono riportate le firme spettrali, suddivise per prossimità con le rispettive fotografie nonché la descrizione del dataset radiometrico sintetizzato nei seguenti punti:

- *PC\_1-2-3-4-5*: (figura 5.2-10). Risulta evidente la differente risposta spettrale che la pavimentazione *PC\_1* ha rispetto alle altre. Questa tende ad avere dei valori costantemente più bassi su tutto l'intervallo di lunghezze d'onda in relazione al fatto che si tratta di una striscia di pavimentazione realizzata da poco e che quindi ha in superficie una certa quantità di componente bituminosa che ricopre gli aggregati. Questo è anche evidente dal fatto che il picco a circa 2300nm-2350nm relativo all'esposizione degli aggregati calcarei all'atmosfera è poco pronunciato. In questa zona spettrale l'appiattimento è ancora maggiore per il *PC\_3* e *PC\_5* dove non vi è la presenza di aggregati calcarei. Per quanto riguarda invece il *PC\_2* e *PC\_4* non si notano particolari variazioni nell'andamento delle firme spettrali se non che il *PC\_4* presenta valori mediamente più alti di riflettanza su tutto lo spettro. Tale effetto sembra essere principalmente dovuto ad una maggiore esposizione della componente litica dovuta ad lieve effetto di sgranamento della superficie.
- *PC\_6-7*: (figura 5.2-11). si tratta di una pavimentazione stesa 4 giorni prima alla misura. La firma *PC\_6* è stata acquisita al bordo della strada, dove il passaggio è molto inferiore/praticamente assente, mentre il *PC\_7* è stata acquisita al centro della carreggiata in corrispondenza di dove si formano solitamente le ormaie. Sebbene le due pavimentazioni siano praticamente identiche l'analisi degli spettri rileva una piccola variazione sia in termini di valori medi di riflettanza che in termini di convessità delle firme nel VIS-NIR. La firma relativa al *PC\_6* è infatti più bassa e più convessa rispetto alla *PC\_7* in quanto è riuscita a mantenere una maggiore quantità di componente idrocarburica sulla sua superficie.
- *PC\_8-9-10-11*: (figura 5.2-12). è possibile osservare la netta differenza in termini di forma della firma spettrale nel VIS-NIR del *PC\_9* (pavimentazione fresca) e la forma concava delle altre quattro firme dovuta dalla perdita della componente idrocarburica. Inoltre nella firma *PC\_9* è possibile osservare la presenza del doppietto di assorbimento degli idrocarburi a 2310nm -2350nm che invece nelle altre firme è assente e che, in particolare in *PC\_11*, lascia il posto all'assorbimento dovuto alla componente litica. E' interessante osservare come sia evidente, sebbene le pavimentazioni *PC\_8* e *PC\_9* non abbiano ancora subito l'azione degradante dovuta al traffico di veicoli, la differenza tra le due risposte spettrali che è da imputare alla sola differenza temporale di esposizione a fenomeni atmosferici. La differenza tra *PC\_10* e *PC\_11* invece, è da attribuire al fatto che quest'ultimo è uno strato di binder e quindi la componente litica è più evidente. E' inoltre interessante osservare la sottile differenza tra le firme *PC\_8* e *PC\_10* dovuta alla maggiore esposizione temporale agli agenti atmosferici di *PC\_8* (stesa risalente al 2010) rispetto a *PC\_10* (stesa risalente al 2012).
- *PC\_12-13*: (figura 5.2-13). Le firme in questione sono riferite a pavimentazioni di recente stesa ma non ancora aperte al traffico. In particolare la *PC\_13-1*, sebbene non presenti più il caratteristico andamento convesso, presenta ancora il doppietto di assorbimento a 2310nm-2350nm. Se paragonata alla *PC\_13-2*, in cui è accentuata una forma di sgranamento piuttosto evidente, quest'ultima presenta generalmente valori di riflettanza più bassi ma non presenta più il doppietto sopra citato. La *PC\_12*, riferita ad una pavimentazione di un'area di parcheggio e stesa da più tempo, mostra valori più elevati di riflettanza ed una maggiore pendenza nel VIS-NIR ed un picco di assorbimento più marcato all'intorno dei 2350nm.

- *PC\_14*: (figura 5.2-14). La firma PC\_14-1 rispetto alla PC\_14-2 e PC\_14-3 presenta valori più elevati di riflettanza su tutto lo spettro considerato ed una pendenza maggiore nel VIS-NIR. Inoltre anche il picco di assorbimento a 2350nm è più marcato rispetto alle altre due. Questa distinzione è dovuta al fatto che la prima firma è stata acquisita in una carreggiata a maggiore traffico rispetto a quella dove è stata acquisita la PC\_14-2 e la PC\_14-3 dell'area di parcheggio (che presenta i valori di riflettanza minori tra tutte e tre).
  
- *PC\_15*: (figura 5.2-15). Le firme relative alle pavimentazioni PC\_15-1, PC\_15-2, PC\_15-3 e PC\_15-4 presentano delle firme spettrali con la stessa forma e si differenziano unicamente per modeste variazioni in termini di valori medi di riflettanza sullo spettro elettromagnetico investigato. La PC15-1, affetta da evidente fessurazione ramificata con fessurazioni beanti, mostra i valori più bassi di riflettanza probabilmente dovuti all'effetto dell'ombra che si genera all'interno delle profonde crepe. La PC15-3 e PC\_15-4 hanno invece i valori più alti in quanto sono le pavimentazioni più chiare. Risulta complessa una loro distinzione attraverso l'identificazione di picchi di assorbimento caratteristici.
  
- *PC\_16*: (figura 5.2-16). La firma PC\_2 rappresenta una porzione di pavimentazione che è stata rattoppata. Questa, sebbene non presenti particolari picchi di assorbimento, presenta i valori più bassi di riflettanza rispetto alle altre due firme spettrali. La firma PC\_1, rappresentante un tratto di pavimentazione interessato da forte fessurazione ramificata, si discosta dalla PC\_2 e dalle PC\_15 nell'intorno dei 2350nm a causa della presenza di un forte picco di assorbimento dovuto alla forte componente carbonatica presente. Nelle firme PC\_15 infatti, sebbene sia anche lì molto marcata la fessurazione, tale picco non è così evidente in quanto gli aggregati che costituiscono il conglomerato bituminoso sono di tipo basaltico. Infine la PC\_3 si discosta dalle altre due sia per una maggiore pendenza della firma nel VIS-NIR, per la presenza di un picco di assorbimento a 2350nm più marcata e la comparsa di un picco a 2145nm. Tale differenza è legata principalmente al fatto che all'interno della buca sia presente una grande quantità di clasti e pertanto la firma PC\_3 rappresenta una sorta di media tra quella di un asfalto e quella di un calcare.

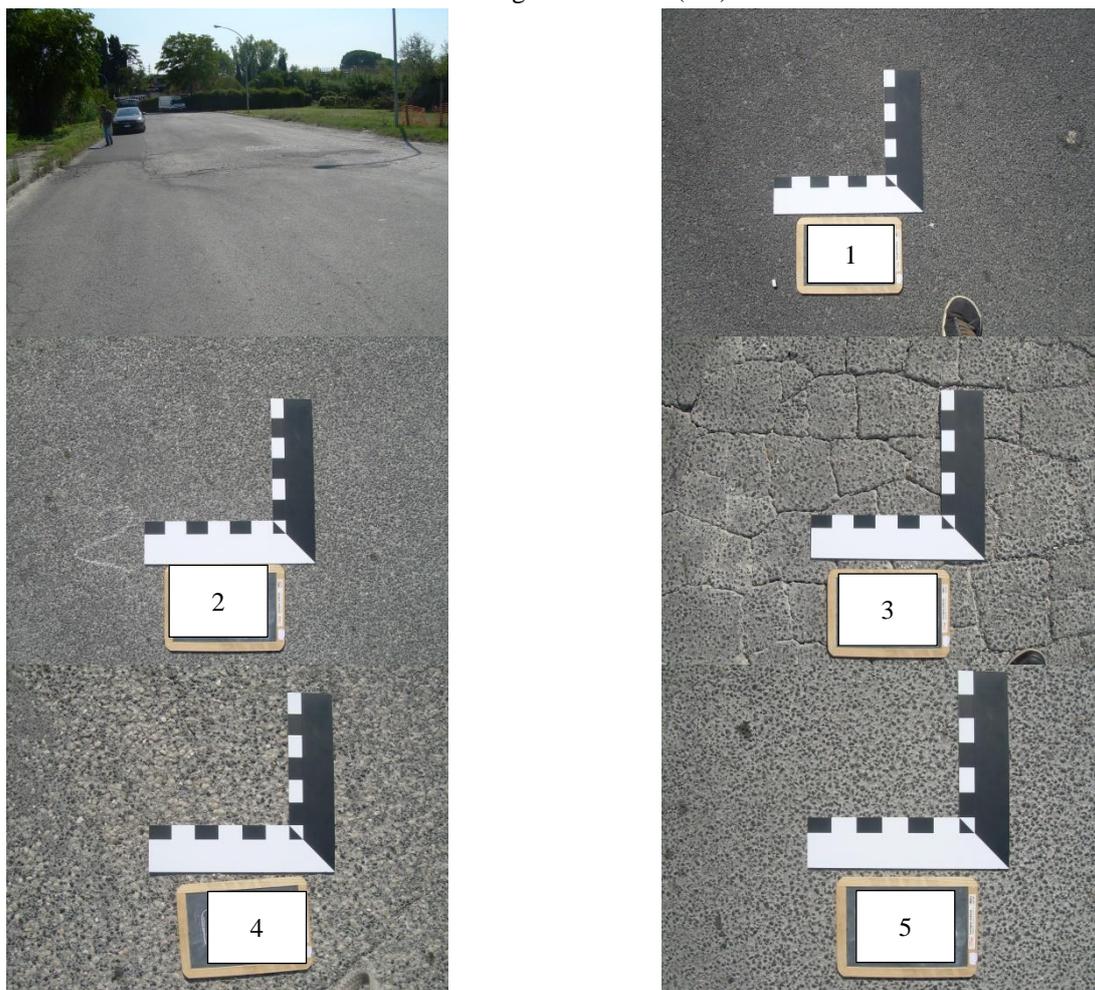
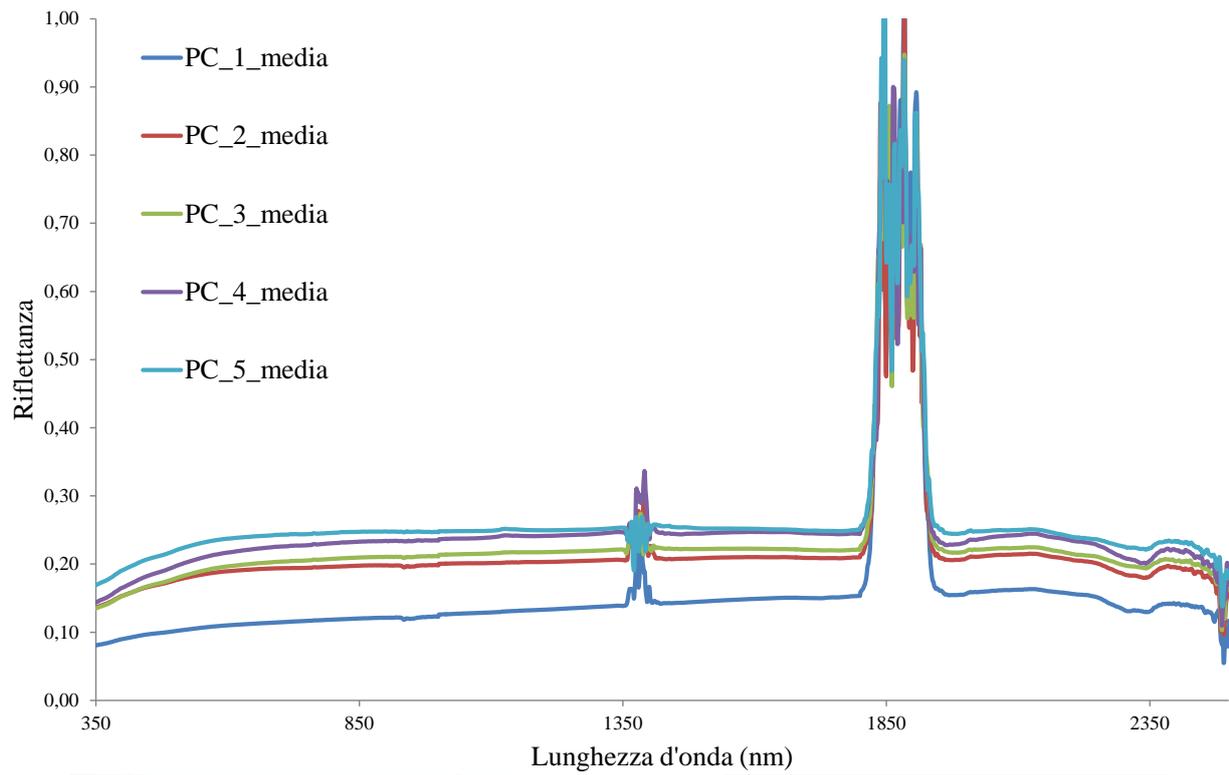


Figura 5.2-10: PC\_1, PC\_2, PC\_3, PC\_4, PC\_5

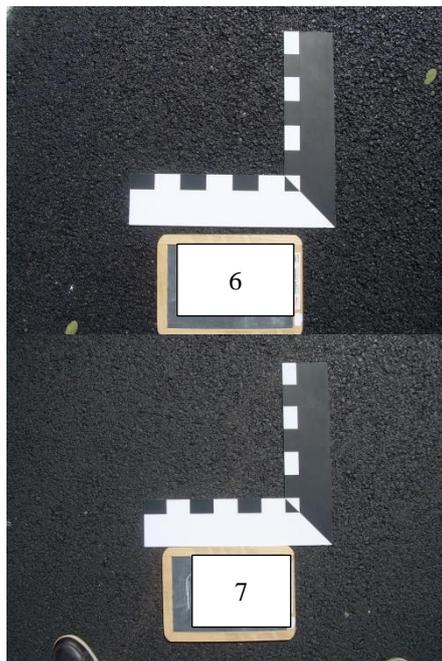
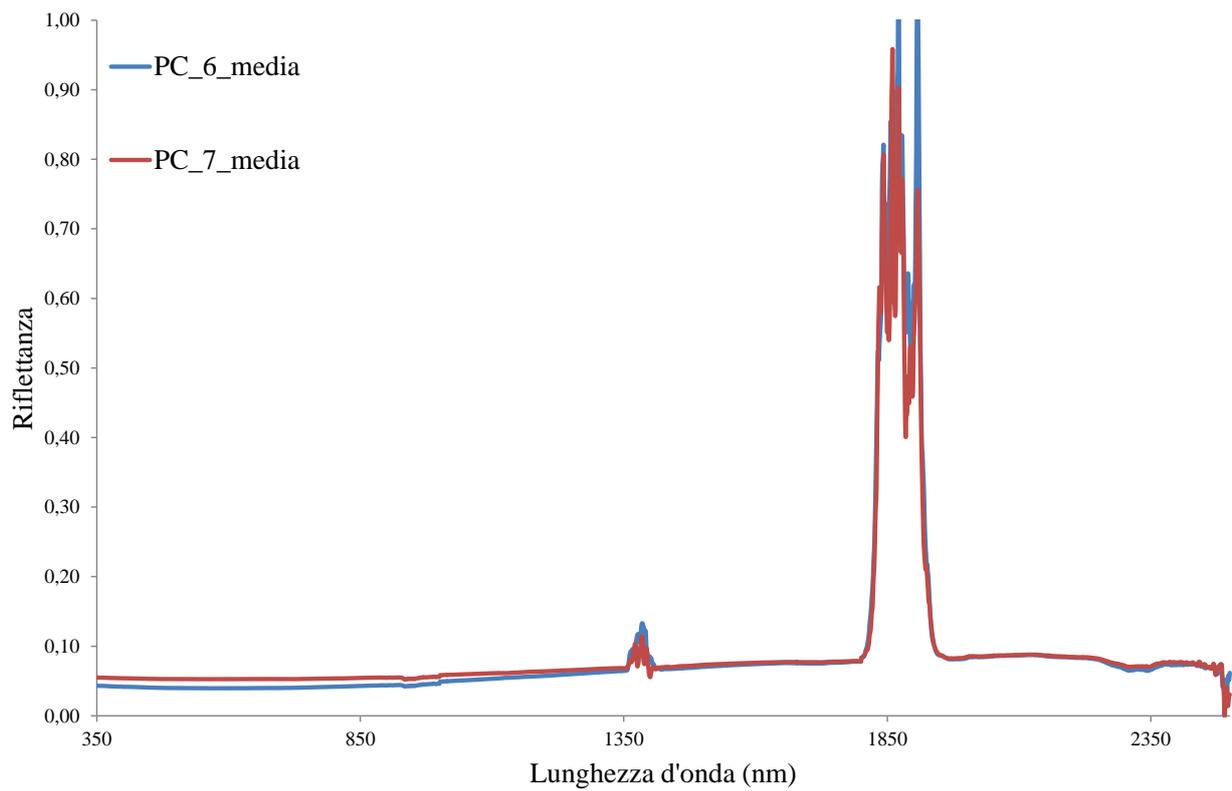


Figura 5.2-11: PC\_6, PC\_7

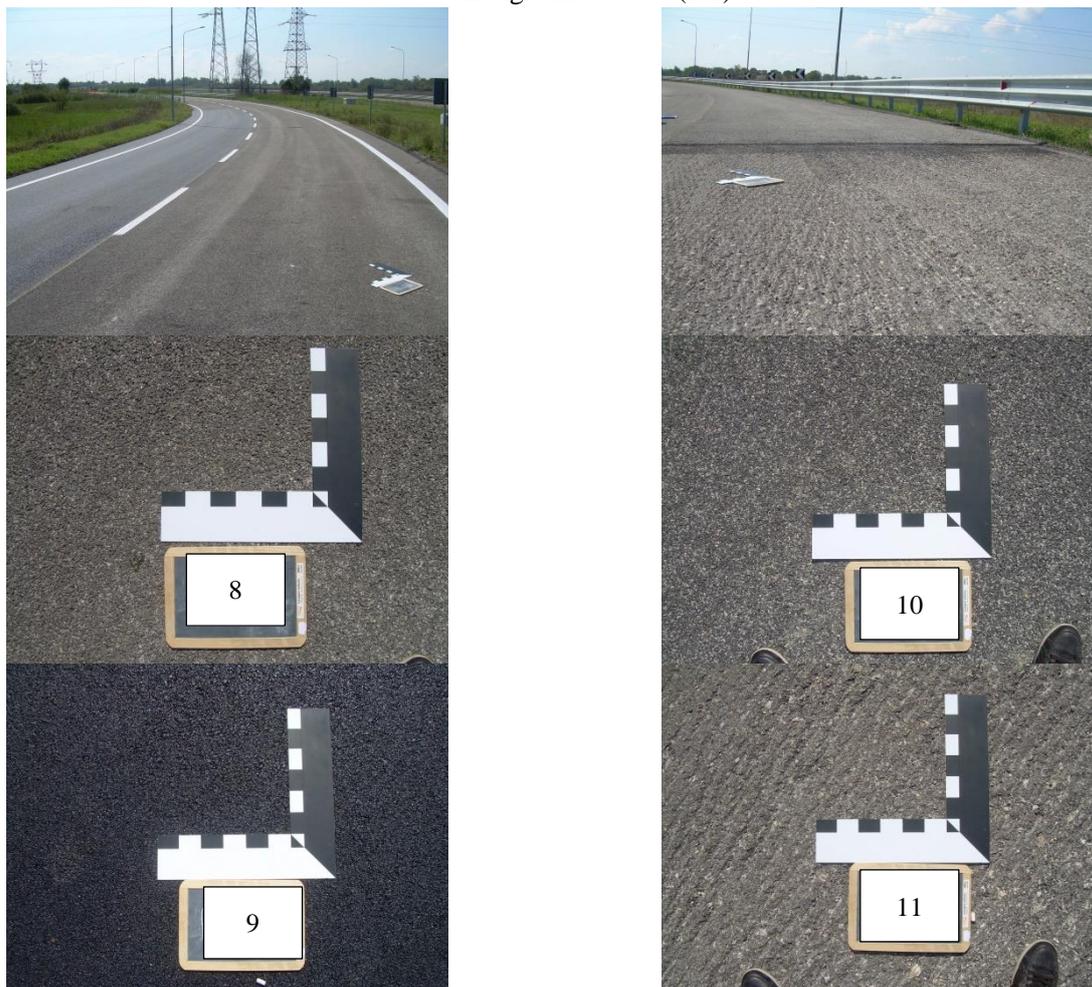
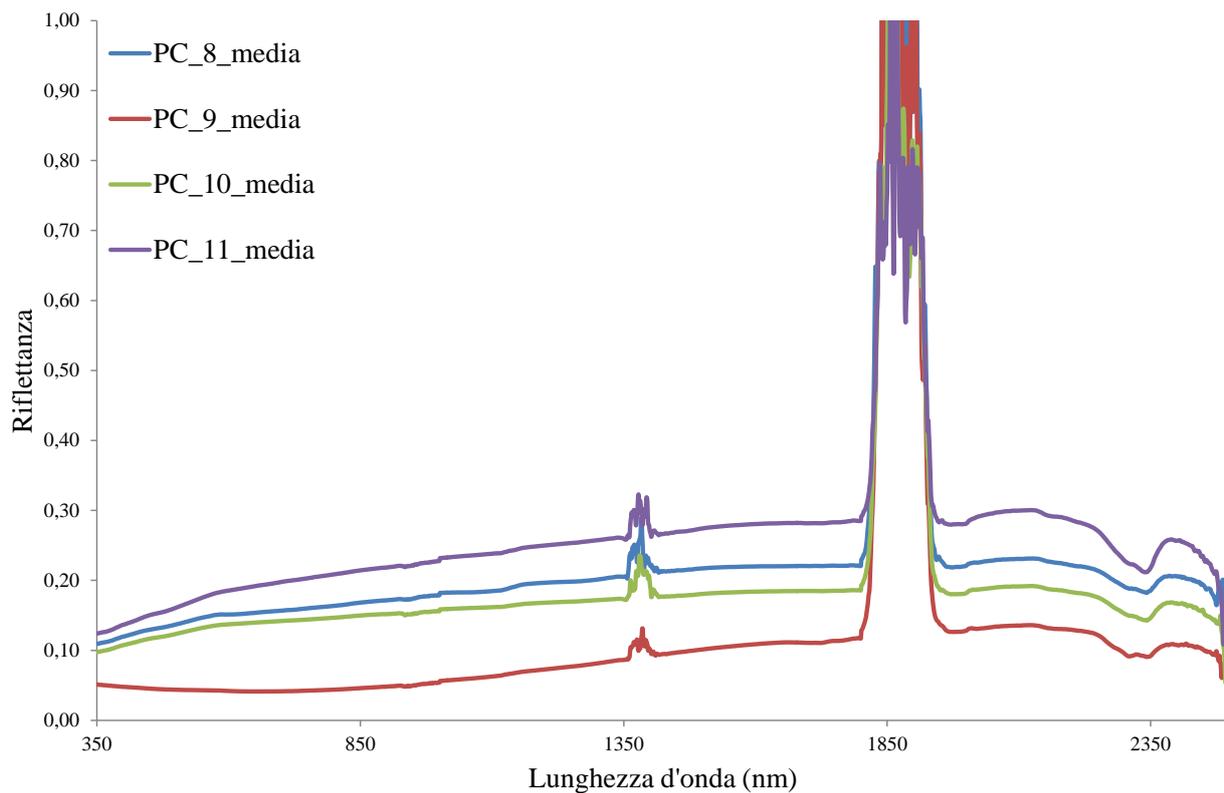


Figura 5.2-12: PC8, PC9, PC10, PC11

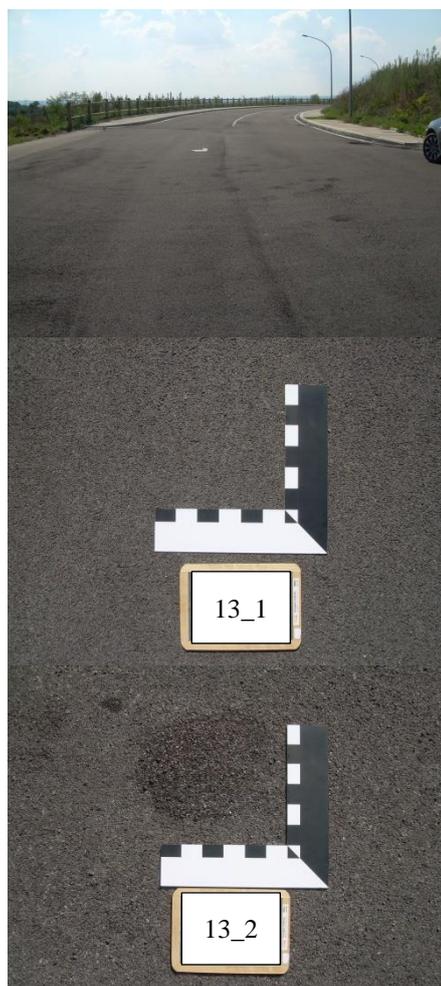
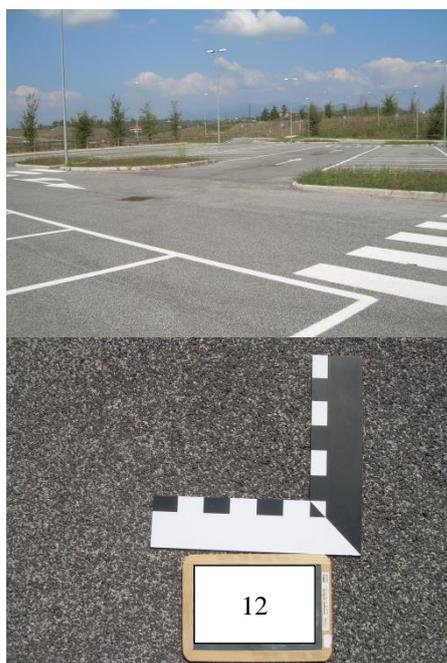
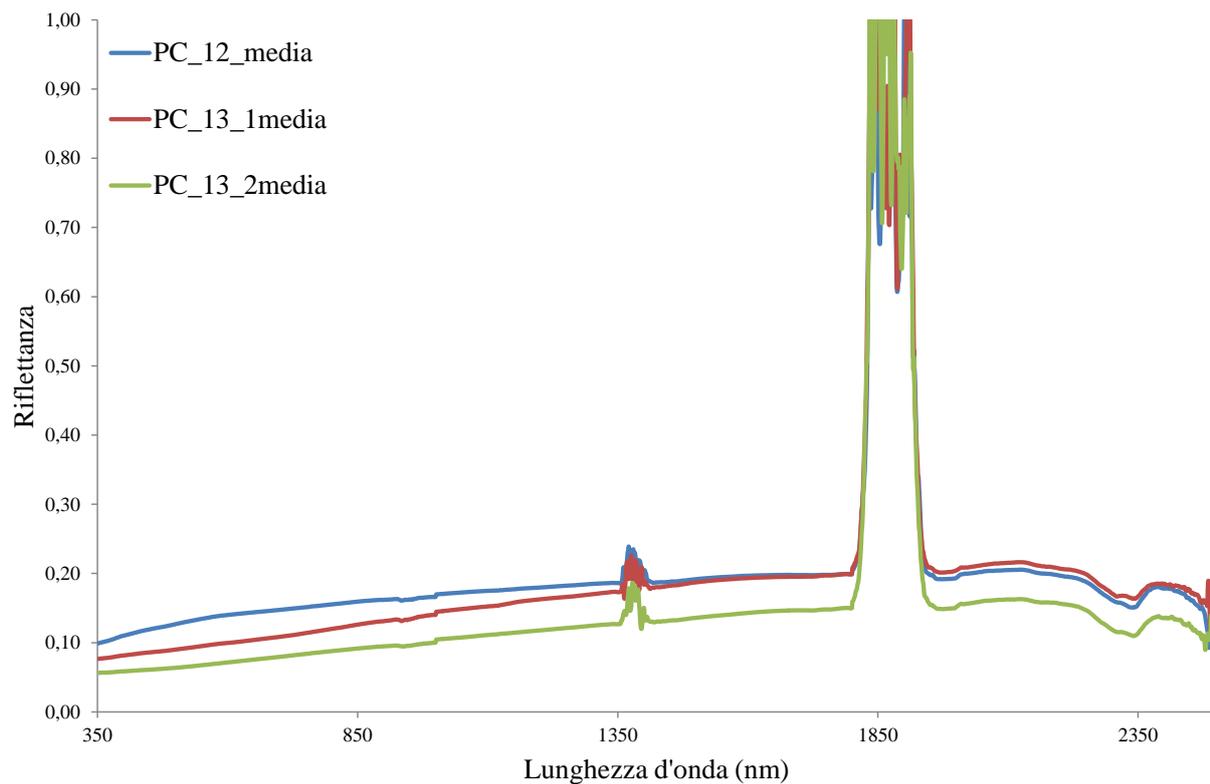


Figura 5.2-13: PC\_12 PC\_13

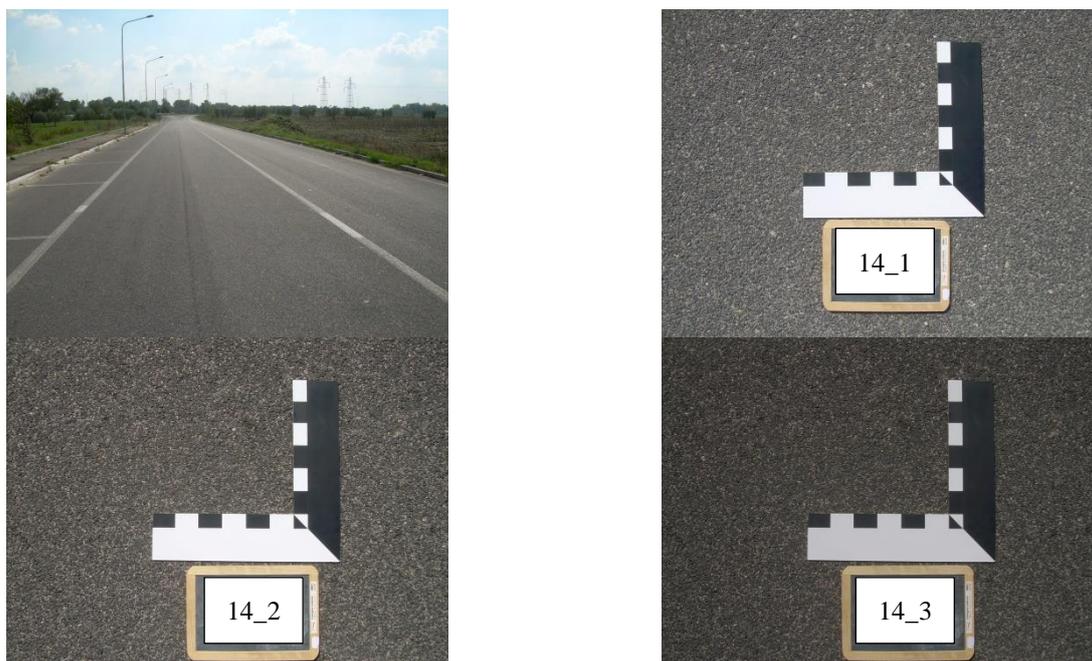
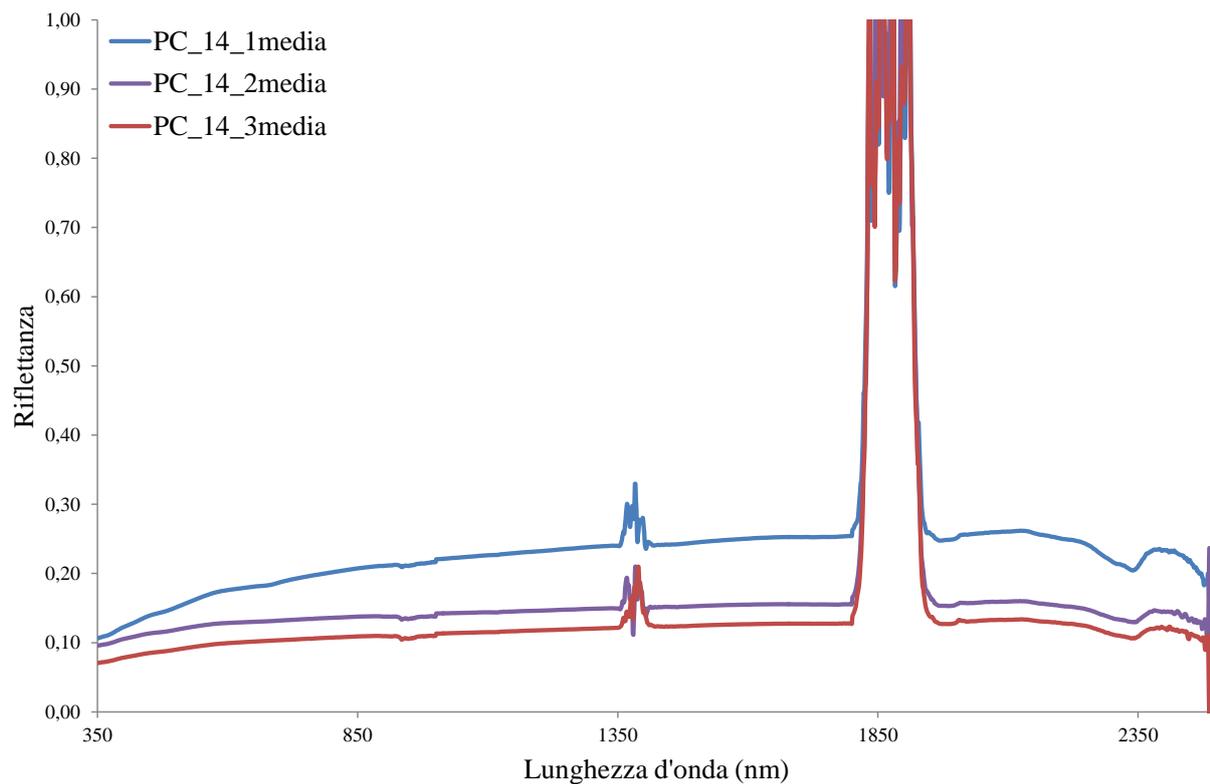


Figura 5.2-14 PC\_14

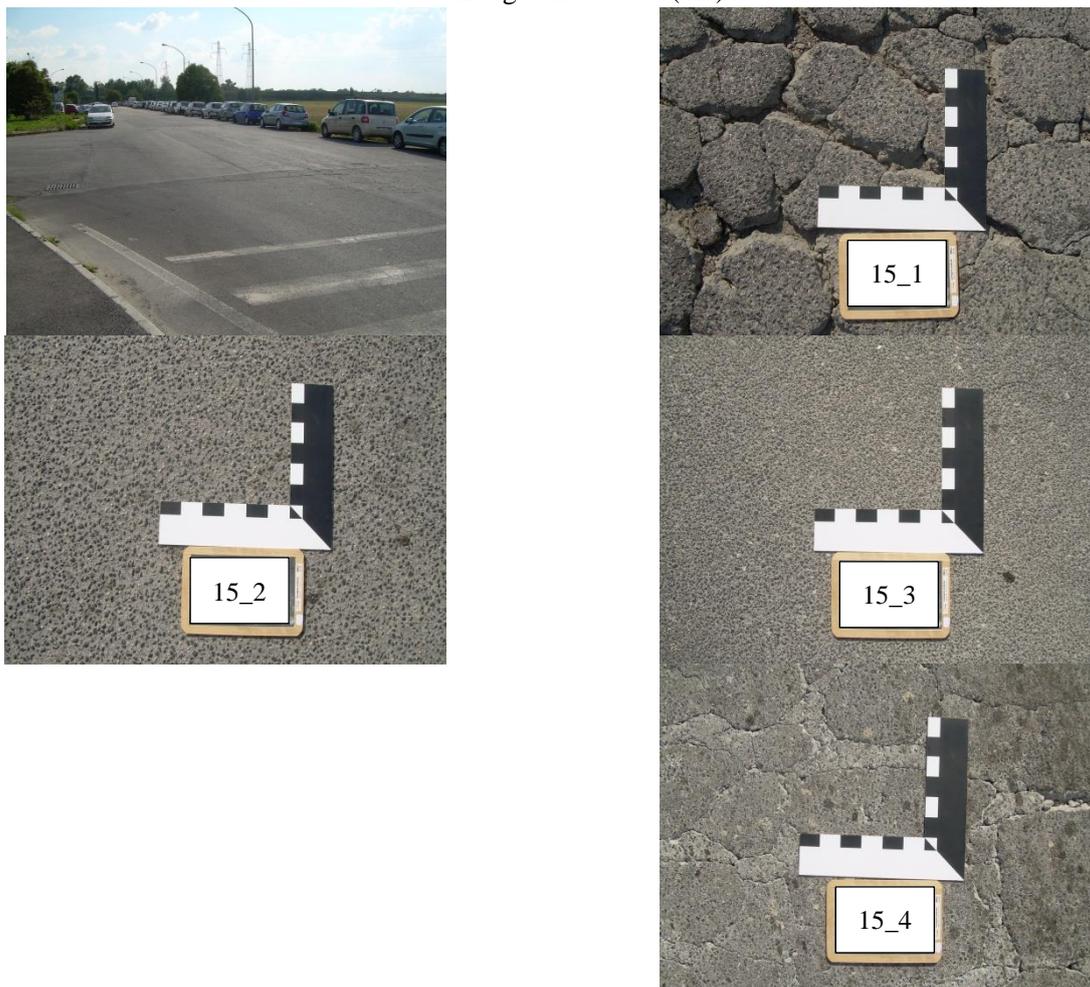
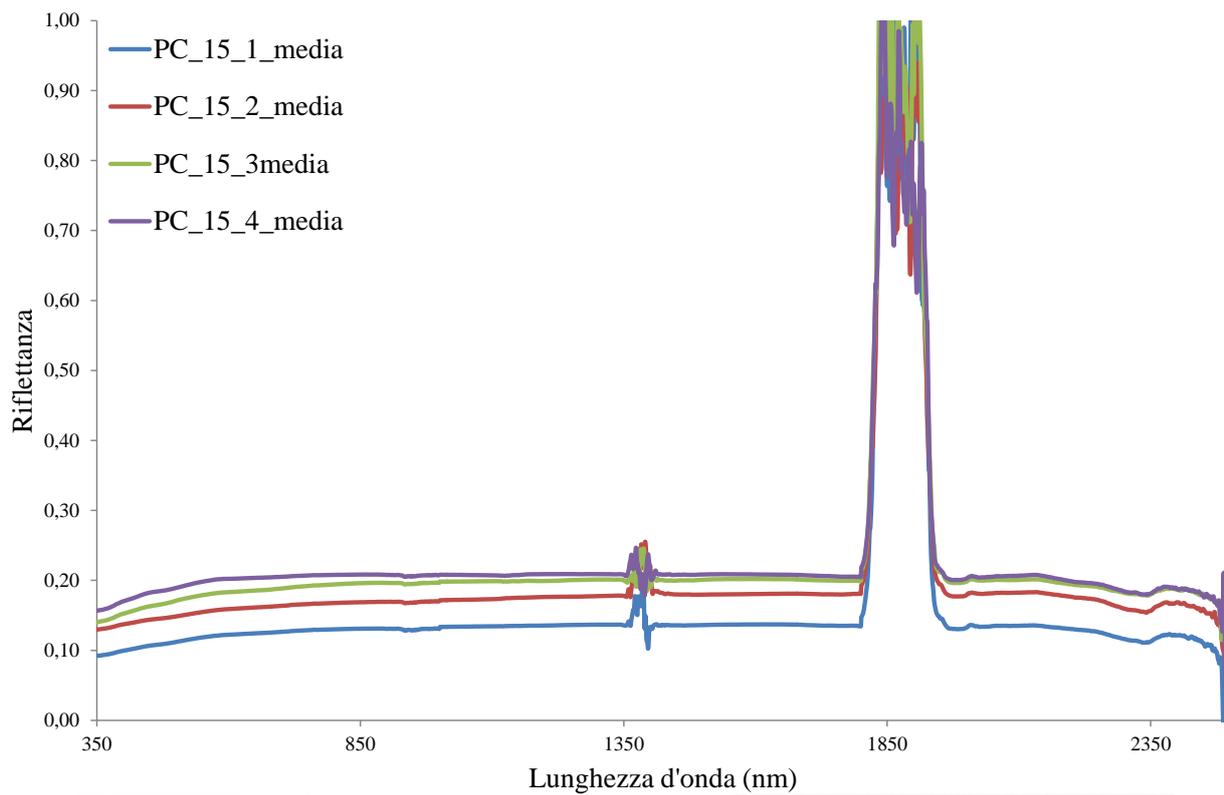


Figura 5.2-15: PC\_15

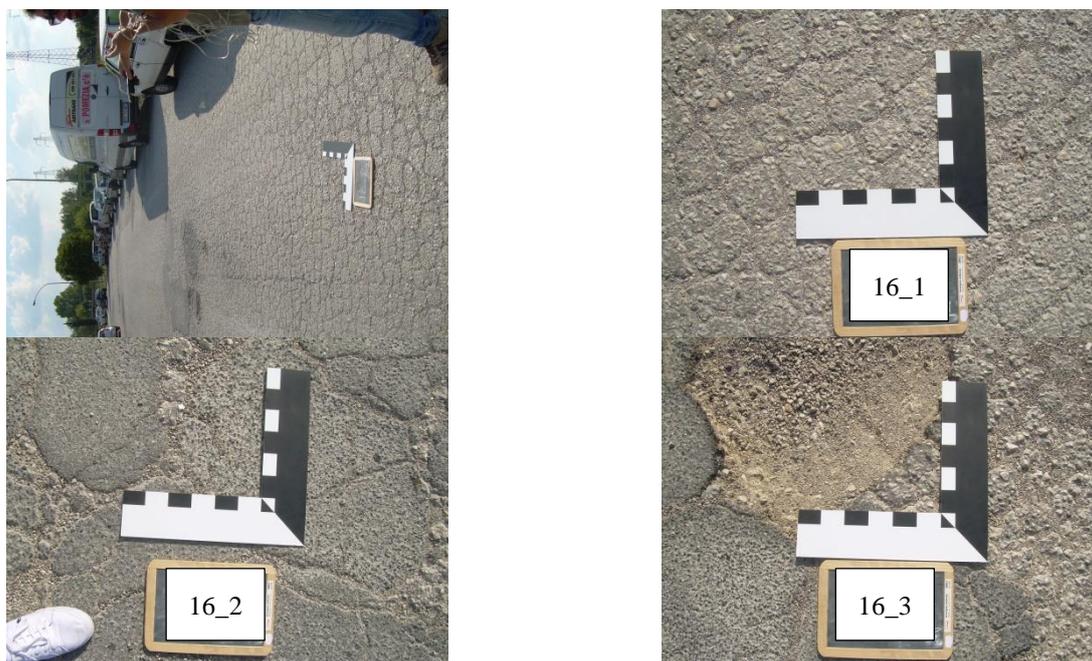
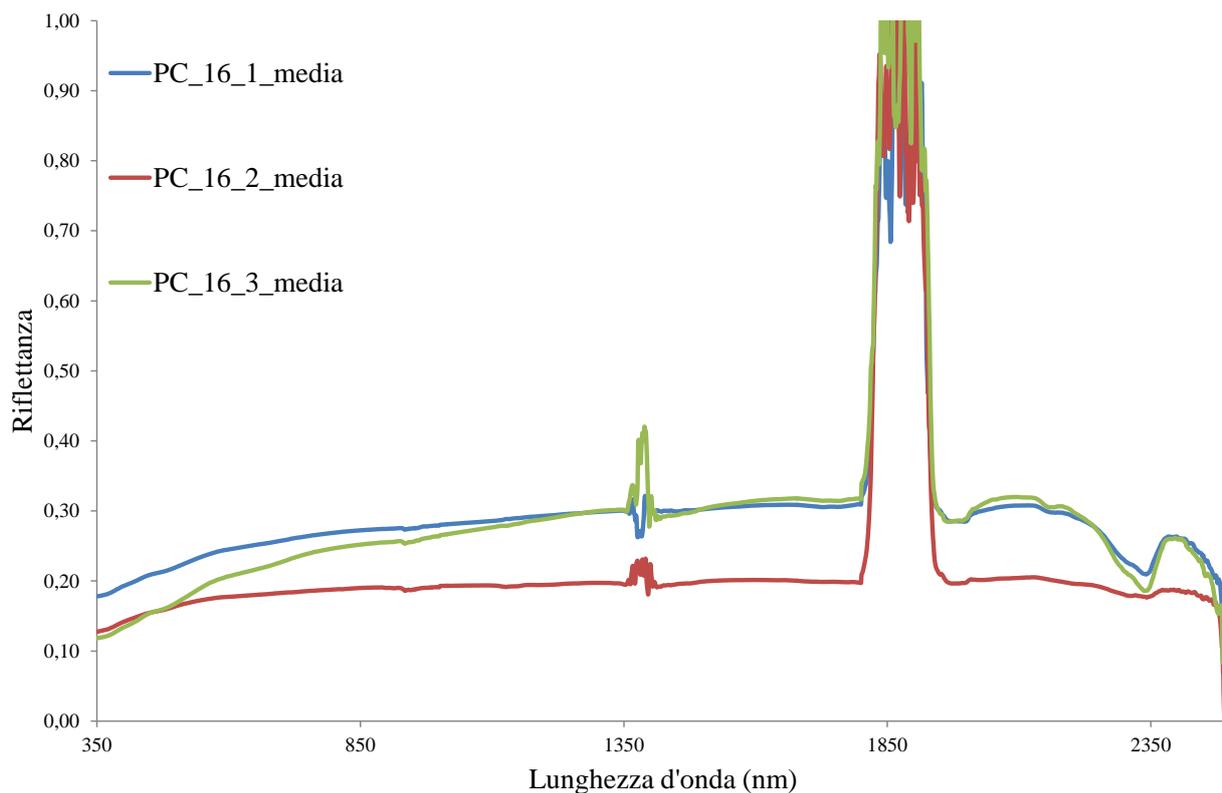
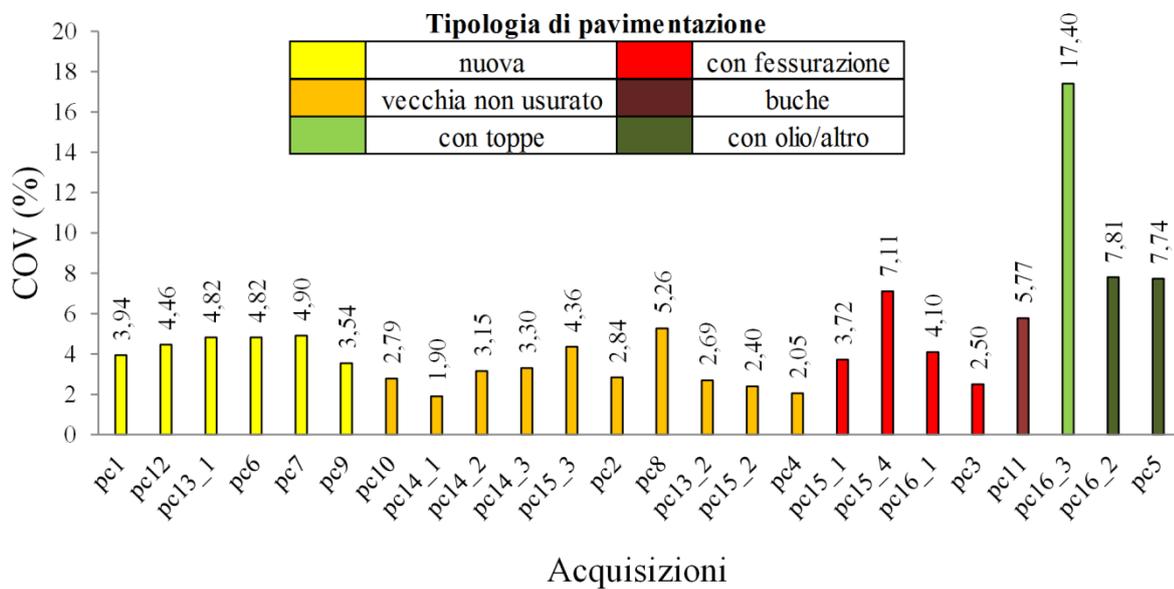


Figura 5.2-16: PC\_16

L'analisi delle firme spettrali evidenzia particolari difficoltà nel differenziare i diversi tipi di usura unicamente su valori di riflettanza media o la presenza di picchi di assorbimento. La distinzione tra asfalti nuovi, vecchi ma senza evidenze di usura o forme di ammaloramenti strutturali e pavimentazioni con evidenti ammaloramenti come la presenza di buche superficiali o profonde, fessurazioni e sgranamenti è possibile solo parzialmente e con un certo grado di incertezza. Questo è anche in accordo con i tentativi che sono stati effettuati da Herold et al 2005 correlando dati spettrali e il *Pavement Condition Index* ottenendo delle correlazioni di 0.63 e con quanto evidenziato anche sul sito ufficiale del *National Consortia on Remote Sensing in Transportation* nell'ambito del progetto "Pavement health evaluation".

Tale difficoltà può essere espressa anche in termini di omogeneità spettrale di questa tipologia di superfici considerando la statistica relativa alla deviazione standard e al coefficiente di variazione delle firme spettrali acquisite in campo nell'intervallo 350nm-2500nm. Al fine di migliorare la lettura e l'interpretazione di tali dati, questi valori sono stati suddivisi per pavimentazioni nuove, vecchie ma non usurate e con presenza di toppe, di fessurazione, di buche e con tracce di olio o altre impurità superficiali. In figura 5.2-17 e in figura 5.2-18 è possibile osservare un generale aumento delle deviazioni standard e del coefficiente di variazione se si passa da pavimentazioni che non presentano forme di ammaloramento a pavimentazioni che invece ne presentano. Tali risultati sono congruenti con quelli ottenuti nel Capitolo 5.1 e riportati in tabella 5.2-1 dove è evidente una marcata variazione tra queste due tipologie di pavimentazioni. Per quanto riguarda questo dataset, i valori medi di deviazione standard e di COV per le pavimentazioni non soggette a forme di ammaloramento sono rispettivamente di 0.010 e 3.58 mentre per quelle soggette a forme di ammaloramento sono rispettivamente di 0.019 e 7.02. I delta di variazione tra questi due valori, 0.009 in deviazione standard e di 3.44 in COV, non sembrano essere sufficienti ad una loro efficace distinzione. Si ritiene che questo sia dovuto in buona parte al fatto che ogni firma spettrale corrisponde ad una superficie omogeneamente non usurata o omogeneamente usurata.



5.2-17: Coefficiente di variazione dei dati radiometrici per i diversi tipi di pavimentazioni

Figura

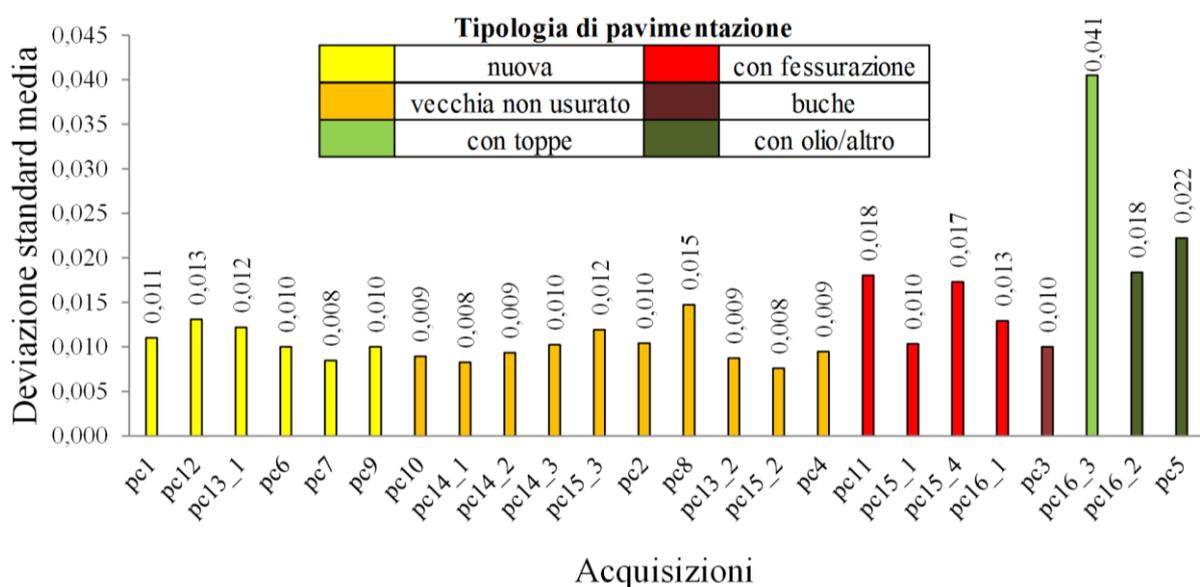


Figura 5.2-18: Deviazioni standard dei dati radiometrici per i diversi tipi di pavimentazioni

Essendo problematico differenziare le diverse tipologie di ammaloramenti stradali mediante l'utilizzo di soli indici spettrali, si è cercato di evidenziare le differenze in termini di variazione di omogeneità spaziale per ogni singolo sito. Questo concetto si basa sull'assunto che se come già visto una superficie ammalorata, o non ammalorata, presenta valori non molto diversi tra loro in termini sia di firme spettrali ma soprattutto di deviazione standard e COV, l'accento va posto sulla transizione tra queste due tipologie di pavimentazioni. Di fatto, minimizzando la problematica a superfici in buona condizione (nessun intervento di ripristino è necessario) e superfici in pessima condizione (intervento necessario) si vuole ottenere, attraverso lo studio della distribuzione statistica dei valori di deviazioni standard e COV, a risalire all'eterogeneità di una pavimentazione. Essendo che una pavimentazione in buone condizioni può essere assunta come invariante nello spazio (ma pseudo-invariante nel tempo) (Mei et al. 2016), ossia può essere assunta come spettralmente omogenea, una pavimentazione fessurata, sgranata o con la presenza di buche, induce una serie di elementi di discordanza da un punto di vista spettrale che si discosteranno dall'omogeneità della risposta spettrale afferente a una superficie non usurata.

I valori di COV espressi in tabella 5.1-1 mostrano chiaramente come superfici omogenee siano spettralmente stabili nello spazio, ossia in una dimensione di spazio nota che può variare a seconda del caso di studio. Ad esempio nel caso della calibrazione di immagini MIVIS, le superfici asfaltate vengono adoperate con successo se, in una matrice di dimensione di 9m x 9 m, si ottengono valori di COV inferiori al 5 (Mei et al. 2016).

Dal passaggio da una superficie omogenea ad una superficie non omogenea e calcolando le differenze in termini di COV e di deviazione standard, si possono ottenere il delta deviazione standard ( $\Delta\sigma$ ) e delta COV ( $\Delta\text{COV}$ ) che risulteranno tanto più elevati quanto più marcata è la differenza tra due le due pavimentazioni. L'accento viene quindi posto non tanto sulla possibilità di identificare una o l'altra tipologia di pavimentazione ma piuttosto sul fatto che si sta passando da un tipo di pavimentazione (che avrà la sua risposta radiometrica definita) ad un'altra pavimentazione (con una differente risposta radiometrica). Si vuole quindi puntare sul fatto che una pavimentazione sana e regolare, avrà una risposta spettrale costante nello spazio mentre una pavimentazione usurata, fessurata o con buche presenterà una maggiore eterogeneità spettrale nello spazio facendo aumentare la deviazione standard e il COV. La "risposta spettrale di transizione" può essere quindi un parametro in grado di segnalare che in un dato luogo vi è una disomogeneità spettrale e quindi una pavimentazione ammalorata che necessita di un intervento di ripristino.

Tale evidenza è riportata in figura 5.2-19 e figura 5.2-20 dove sono riportati i valori mediati di deviazione standard e COV calcolati per ogni sito di indagine. Risulta evidente come, nel caso di una pavimentazione che non presenta fenomeni di ammaloramento (caso di superficie omogenea), benché non recentissima (fine 2011/inizio 2012) (PC\_12) il valore di COV e devstd risultino bassi (rispettivamente di 4.46 e 0.0131) mentre la presenza di un fenomeno di sgranamento all'interno di una pavimentazione stesa da pochissimo tempo (fine 2014 / inizio 2015) (PC\_13) (caso di superficie non-omogenea), mostra elevate variazioni in termini di COV (16.58) e di devstd (0.0293). La massima distinzione la si può osservare per PC\_8-9 in cui i valori di COV e devst (45.62 e 0.0579) sono da attribuire alla differenziazione tra una pavimentazione vecchia priva di ammaloramento ed una nuova di recentissima stesura (2016). E' evidente che in tale caso, non potendo essere sufficiente questo tipo di analisi, sarà necessario introdurre altri tipi di indagine come l'analisi foto-interpretativa da immagini ad alta risoluzione. E' anche a tale scopo che è stata montata sul rover, in abbinamento alla camera multispettrale, una fotocamera ad alta risoluzione. Interessante è anche il caso PC\_1-2-3-4-5, PC\_16, PC\_15 dove le differenze sono dovute al passaggio da superficie da diversamente ammalorate a non ammalorate. Infine il caso PC\_6-7 dove si riesce ad evidenziare la sottile differenza legata all'usura di soli 4 giorni di passaggio di veicoli di una pavimentazione stesa da pochi giorni: il bordo stradale evidenzia la presenza della componente idrocarburica non ancora rimossa (PC\_6) rispetto alla parte centrale (PC\_7) (notare che presi singolarmente i valori dei COV differivano solo di 0.08 contro il 9.41).

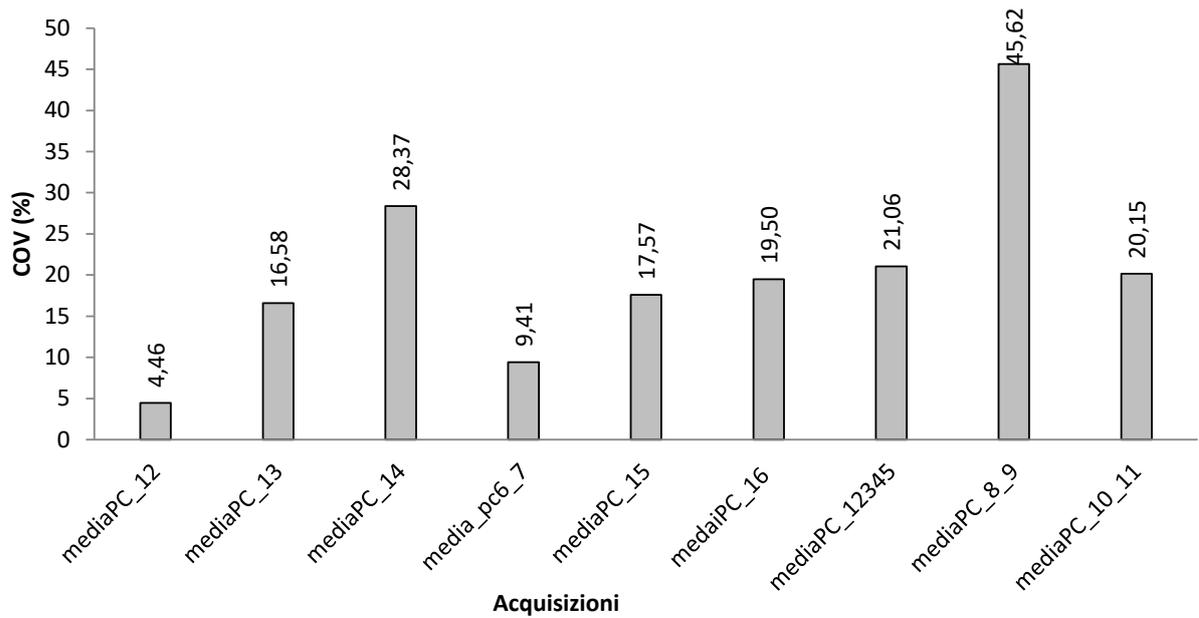


Figura 5.2-19: Delta-COV delle pavimentazioni investigate

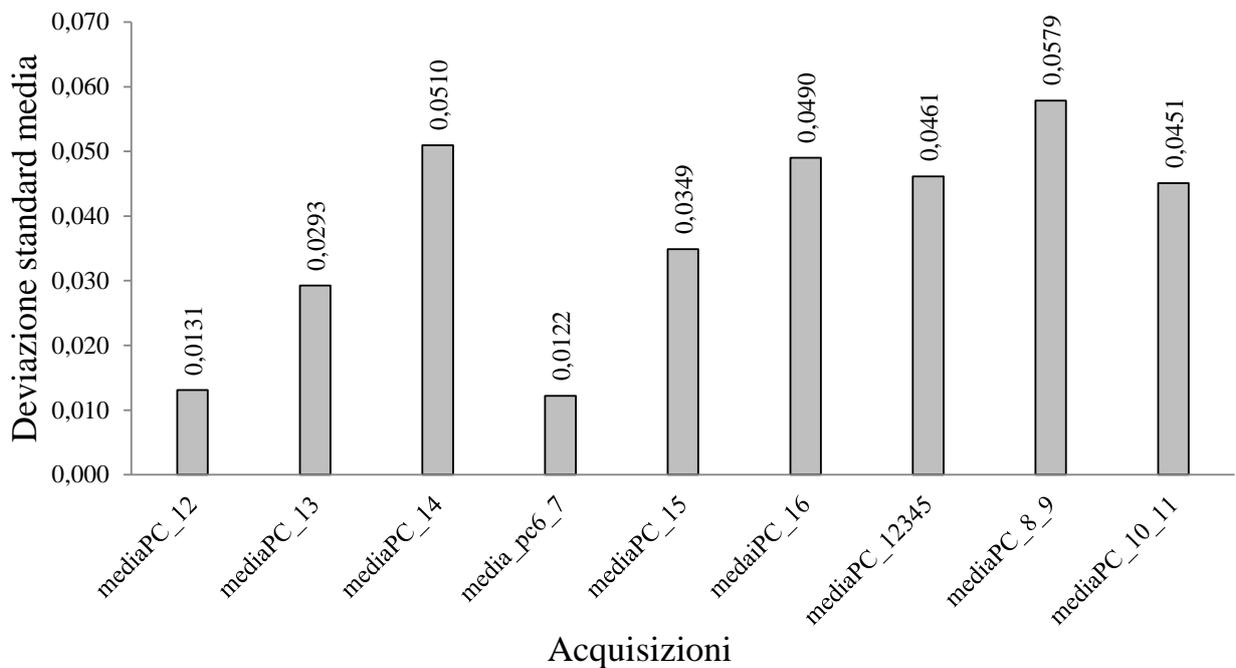


Figura 5.2-20: Delta- $\sigma$  delle pavimentazioni investigate

Risulta evidente come l'applicazione del  $\Delta\sigma$  o del  $\Delta COV$ , se applicato a larga scala con l'ausilio di dati satellitari ad alta risoluzione spaziale apparrebbe in grado di snellire la fase di valutazione dello stato di degrado degli assi viari principali e secondari.

### ***Dati multispettrali***

Il rover è stato utilizzato per l'acquisizione di dati multispettrali e fotografici nei settori già investigati attraverso l'analisi spettroradiometrica. In particolare, nei siti PC\_1-2-3-4-5, Pc\_15, PC\_16, PC\_14, PC\_10-11 e PC\_13 sono stati effettuati dei transetti da un lato all'altro della carreggiata al fine di poter confrontare tali risultati con l'elaborazione dell'immagine satellitare ad alta risoluzione Worldview-3 trattata nel Capitolo 6.2. Tale dataset è stato comunque utilizzato anche in questo paragrafo per aumentare la variabilità statistica del campionario spettrale analizzato. In figura 5.2-21 viene riportato il RAAS in fase di acquisizione. La camera multispettrale acquisisce i dati in 4 canali ed ha una dimensione di 2048 pixels x 1566 pixels. Nella fase di *pre-processing*, le immagini sono state ritagliate affinché si ottenessero delle immagini di dimensione 1000 pixel x 1000 pixels costituite da 3 bande dove: il NIR è corrispondente alla banda 1, il RED è corrispondente alla banda 2 e il GREEN è corrispondente alla banda 3.

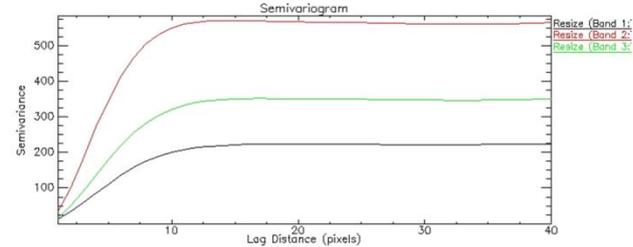
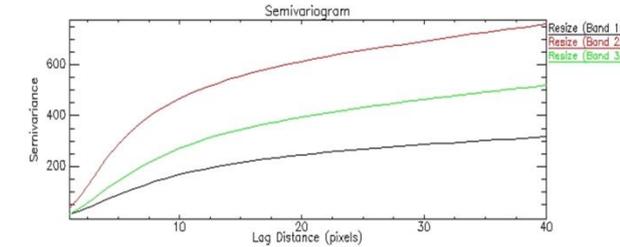
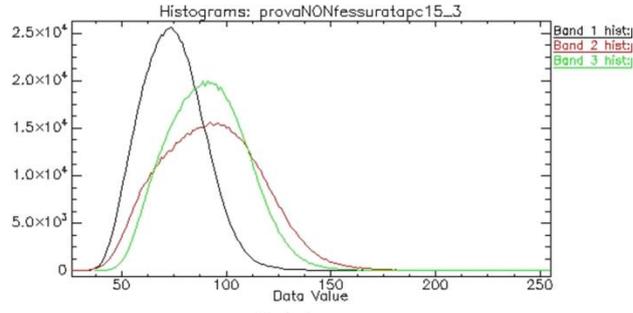
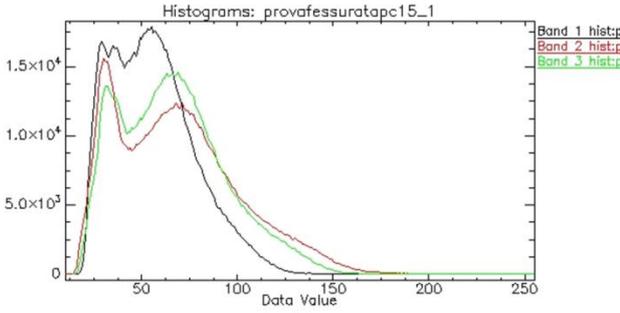
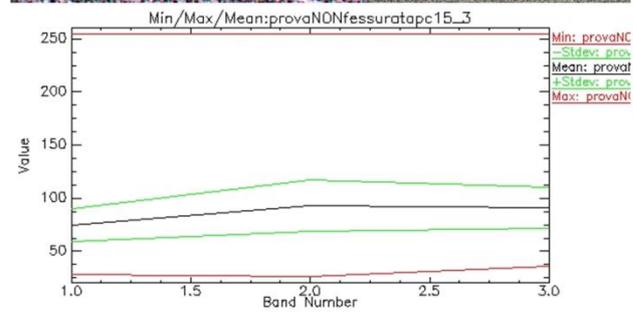
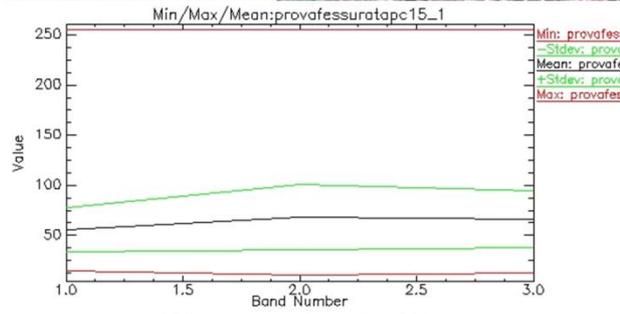
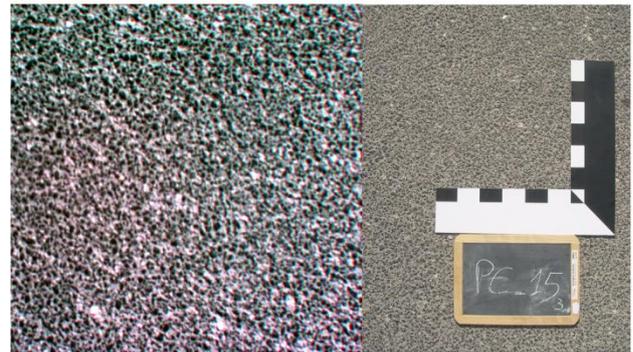


Figura 5.2-21: RAAS in fase di settaggio e di acquisizione nel punto PC\_13

Nel caso di dati a più dimensioni il contenuto radiometrico di un pixel non può essere definito attraverso un singolo valore ma deve essere descritto attraverso un vettore. Nello studio di una immagine multispettrale l'insieme dei dati è a più dimensioni, pertanto ogni misurazione multivariata è rappresentata da un vettore in uno spazio a  $n$  dimensioni. La distribuzione statistica dei vettori definisce le proprietà e la complessità del dataset analizzato.

Al fine di evidenziare le differenze indotte dalla variazione in termini di non-omogeneità spettrale da una superficie non ammalorata ad una ammalorata, come descritto nel paragrafo precedente, è stata posta l'attenzione su alcune coppie di pavimentazioni. In figura 5.2.22 sono riportati i risultati derivanti dalle analisi di 2 tipologie di pavimentazioni utilizzate per testare quanto affermato tenendo conto dei valori di deviazione standard, della frequenza di distribuzione dei valori nelle 3 bande (istogrammi) e delle relazioni spaziali attraverso i semi-variogrammi. Appare evidente, come per i dati spettroradiometrici, i valori di deviazioni standard di superfici omogeneamente non-ammalorate ( $\sigma= 19.3$ ) si discostano in maniera abbastanza marcata da pavimentazioni ammalorate (eterogenee) ( $\sigma= 27.3$ ). Tale evidenza è maggiore se si osservano i singoli valori di deviazioni standard per la banda 2 (32.5/24.0) e per la banda 3 (27.7/19.0) rispetto alla banda 1 (21.8/15.3).

Per quanto riguarda invece la distribuzione dei dati nelle tre bande è evidente, in questo caso, una bi-modalità legata alla pavimentazione fessurata rispetto alla uni-modalità di quella non ammalorata.



Basic Stats	Min	Max	Mean	Stdev	Eigenvalue
Band 1	15	255	55.9	21.8	2136
Band 2	10	255	68.4	32.5	116
Band 3	14	255	66.3	27.7	45
Covarianza	Band 1	Band 2	Band 3		
Band 1	475	581	515		
Band 2	-	1054	850		
Band 3	-	-	768		
Correlazione	Band 1	Band 2	Band 3		
Band 1	1	0.82	0.86		
Band 2	-	1	0.94		
Band 3	-	-	1		

Basic Stats	Min	Max	Media	Stdev	Eigenvalue
Band 1	28	255	74.4	15.3	976.0
Band 2	26	255	93.1	24.0	133.4
Band 3	37	255	91.2	19.0	59.3
Covarianza	Band 1	Band 2	Band 3		
Band 1	233	211	174		
Band 2	-	574	392		
Band 3	-	-	361		
Correlazione	Band 1	Band 2	Band 3		
Band 1	1	0.58	0.60		
Band 2	-	1	0.86		
Band 3	-	-	1		

Figura 5.2-22: Variazione spettrale, in termini di deviazione standard, distribuzione dei valori da istogramma e parametri geostatistici, dovuta al passaggio da una pavimentazione non-ammalorata a una ammalorata.

Essendo che la distribuzione statistica dei vettori definisce le proprietà e la complessità del dataset analizzato, se le variabili di un fenomeno multivariato hanno un certo grado di correlazione allora i vettori

rappresentativi del fenomeno tenderanno ad occupare solo una porzione dello spazio, pertanto una variabile di dimensione  $n$  riempie uno spazio di dimensione minore.

Essendo che ognuna delle immagini acquisite costituisce un insieme di misure che si distribuiscono lungo gli assi dello spazio multidimensionale, la misura dei valori di radianza misurati per ogni banda spettrale, costituisce una popolazione statistica che presenta le variazioni dovute alle diversità nella scena e che risulta distribuita con certe frequenze attorno a valori più ricorrenti. Tale variabilità spettrale, attraverso la definizione degli autovalori ed autovettori che caratterizzano le singole immagini, può essere utile alla distinzione delle differenti pavimentazioni.

Associata ad ogni matrice quadrata  $B$  di ordine  $n$  esiste una funzione  $f(\lambda)$  definita come funzione caratteristica di  $B$ . La risoluzione di questa equazione  $f(\lambda)$  fornisce gli  $n$  autovalori della matrice  $B$ . Esistendo per ogni autovalore almeno un autovettore, la definizione di questo numero può essere indicativo della complessità del dato trattato e può essere utilizzato per la risoluzione di problemi di tipo dinamico. Gli autovalori sono quindi collegati alla quantità di informazione contenuta negli assi rispettivamente collegati.

Nella figura 5.2.22 è evidente la netta differenza si considerano i valori degli autovalori (*eigenvalues*) nel NIR (banda 1) che sono molto più elevati nelle pavimentazioni ammalorate rispetto a quelli delle altre bande. Tale evidenza è ben rappresentata dall'analisi delle componenti principali riportate in figura 5.2-23 dove si nota come la maggior parte dell'informazione sia racchiusa nella banda 1.

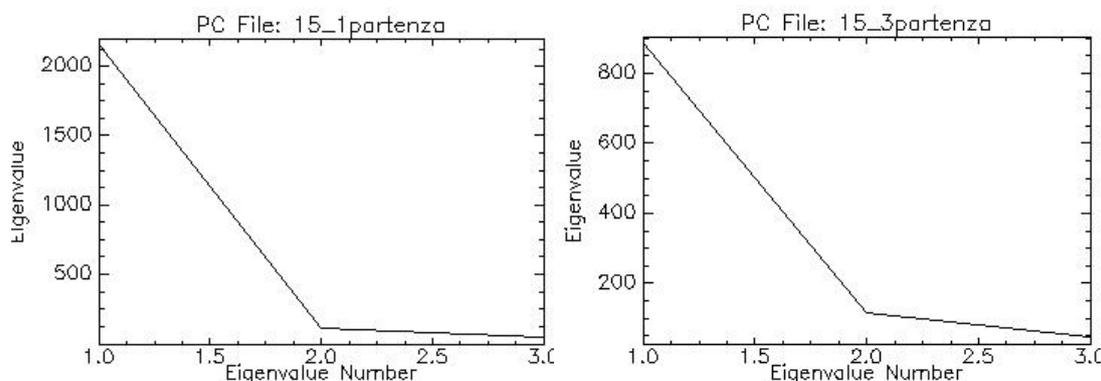


Figura 5.2-23: Componenti principali delle due pavimentazioni individuate

Al fine di individuare l'indice spettrale con cui poter elaborare tutto il dataset, sono state analizzate le matrici di covarianza e di correlazione tra le 3 bande. A partire dall'immagine è possibile infatti definire la tali matrici. Per una immagine a  $n$  bande, la matrice di covarianza è una matrice costituita da  $n \times n$  elementi che contiene tutte le varianze e covarianze relative alle  $n$  bande in cui sono organizzati i dati dell'immagine. I valori più elevati di covarianza e di correlazione, sia per pavimentazioni non ammalorate che ammalorate, sono rappresentati in corrispondenza delle bande 3 (GREEN) e 2 (RED) ed in corrispondenza della coppia banda 1 (NIR) e banda 2 (RED).

Infine, come analisi aggiuntiva, al fine di valutare le correlazioni tra i diversi pixel che compongono le singole immagini da un punto di vista spaziale, è stato effettuato uno studio di tipo geostatistico che generalmente viene applicato per la realizzazione di iso-mappe attraverso la stima di un valore in punti dove non è stata acquisita fisicamente la misura. Lo studio, mediante i semi-variogrammi, della funzione che interpola le semivarianze dei valori osservati in gruppi di coppie di punti consente di descrivere la correlazione spaziale delle variabili di una distribuzione di punti. L'analisi dei semi-variogrammi riportati in figura rivela il raggiungimento più veloce di valori massimi di semivarianze per le pavimentazioni non fessurate rispetto a quelle fessurate; ne deriva una maggiore velocità con cui cresce la semivarianza la quale riflette il grado di diversità all'aumentare della distanza tra i campioni. La semivarianza può, in linea teorica, aumentare all'infinito se la variabilità del fenomeno non ha limiti. Al contrario, se il variogramma raggiunge un valore finito, chiamato *sill*, significa che esiste una distanza oltre la quale la funzione  $Z(x)$  e  $Z(x+h)$  non sono più correlati. Questa distanza è chiamata *range* che, nel nostro caso, dà il senso del concetto di area di influenza del campione (valore dei singoli pixel) (Chiles & Delfiner, 1999) e quindi dell'eterogeneità della superficie. Tale analisi evidenzia bene l'elevata eterogeneità della pavimentazione ammalorata rispetto a quella sana. La distanza di autocorrelazione, di 10 pixels (lag distance) per le pavimentazioni non fessurate, è la massima distanza alla quale considerare differenti due pixels. Questa informazione fornisce un'idea della variabilità spaziale dei valori dei pixel all'interno delle immagini. Il modello è stato implementato considerando 20 lag sia per le pavimentazioni non fessurate (ottenendo una semivarianza di 48.8 in banda 1,

177.5 in banda2 e 111.5 in banda 3) che per le pavimentazioni fessurate in quanto non si osserva nessuna tendenza dei valori a stabilizzarsi per *lag* superiori, al contrario mostrano un costante aumento. Un parametro che aiuti a discriminare pavimentazioni non usurate da quelle usurate potrebbe effettivamente essere rappresentato dalla possibilità di identificare la *lag* distance in maniera univoca e comunque con valori “bassi”.

Al fine di individuare l’indice spettrale con cui poter elaborare tutto il dataset, una parte dei dati acquisiti è stata oggetto di una pre-elaborazione mediante l’utilizzo di diversi indici spettrali che tenessero conto delle 3 bande. In particolare è stata valutata una pavimentazione nuova non usurata, una vecchia non usurata ed una vecchia con fessurazione ramificata. In questa fase sono stati confrontati i valori di deviazione standard delle sole bande del NIR, RED e GREEN e i seguenti indici spettrali:

$$I_1 = b_{Red} - b_{NIR}$$

$$I_2 = b_{Red} / ((1/b_{Red}) + (1/b_{NIR}))$$

$$I_3 = (b_{NIR} * b_{Red}) / \sqrt{((b_{NIR}/2)^2 + (b_{Red}/2)^2)}$$

$$I_4 = b_{Red} - b_{Green}$$

$$I_5 = (b_{NIR} - b_{Red}) / (b_{NIR} + b_{Red})$$

I risultati ottenuti dall’applicazione di questi indici alle immagini multispettrali sono riportati nelle figure 5.2-24 e 5.2-25 insieme alle rispettive immagini classificate.

Dall’analisi dei risultati emersi si può dedurre che gli indici  $I_1$  e  $I_3$  non mostrano nessun trend di variazione tra pavimentazioni non ammalorate ad ammalorate al contrario del  $I_4$  il quale, se da una parte mostra valori crescenti di  $\sigma$ , dall’altra lo scarto tra loro è molto ristretto e non sembra idoneo ad una distinzione univoca delle differenti pavimentazioni.

Per quanto riguarda i valori di  $\sigma$  derivanti dalle sole bande spettrali, si osserva un trend di aumento dei valori di deviazione standard da pavimentazioni non usurate a pavimentazioni usurate. Tale trend è inoltre osservato per gli indici  $I_2$  e  $I_5$ .

Al fine di valutare quale sia lo scarto maggiore tra i valori di deviazione standard nelle 3 tipologie di pavimentazione, per ogni indice è stato calcolato il  $\Delta\sigma_{medio}$  secondo la seguente relazione:

$$\Delta\sigma_{medio} = ((\Delta\sigma_{pc15-1} - \Delta\sigma_{pc6}) + (\Delta\sigma_{pc15-1} - \Delta\sigma_{pc15-3}) + (\Delta\sigma_{pc15-3} - \Delta\sigma_{pc6})) / 3$$

Il  $\Delta\sigma_{medio}$  calcolato nel NIR, nel RED e nel GREEN è rispettivamente pari a 9.4, 12.4 e 10.9 mentre per gli indici  $I_2$  e  $I_5$  è rispettivamente di 12.4 e di 4.6. Considerando il discreto scarto tra i diversi  $\Delta\sigma$  tra le 3 diverse categorie, il dataset onnicomprensivo di tutti i dati acquisiti, e composto da 204 immagini, è stato processato al fine di calcolare la deviazione standard a partire dalle singole bande che utilizzando l’indice  $I_5$ .

In particolare il dataset è così composto: 145 immagini acquisite nei 23 siti per una media di circa 6 immagini a sito e 59 immagini acquisite per i 7 transetti per una media di circa 8 immagini a transetto. Mediamente quindi, per ogni sito o transetto, sono state acquisite complessivamente 7 immagini.

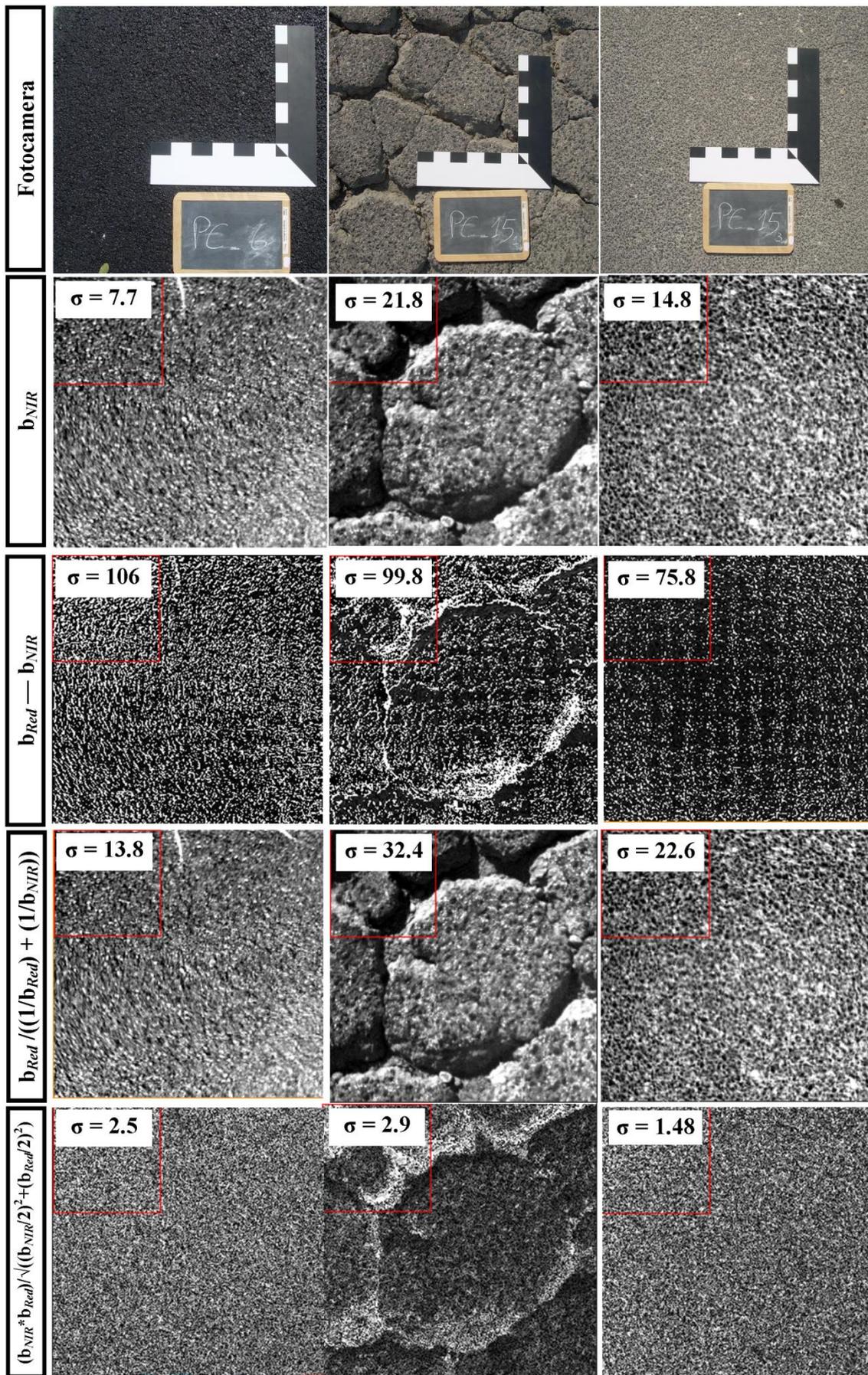


Figura 5.2-24: Elaborazioni indici spettrali parte 1

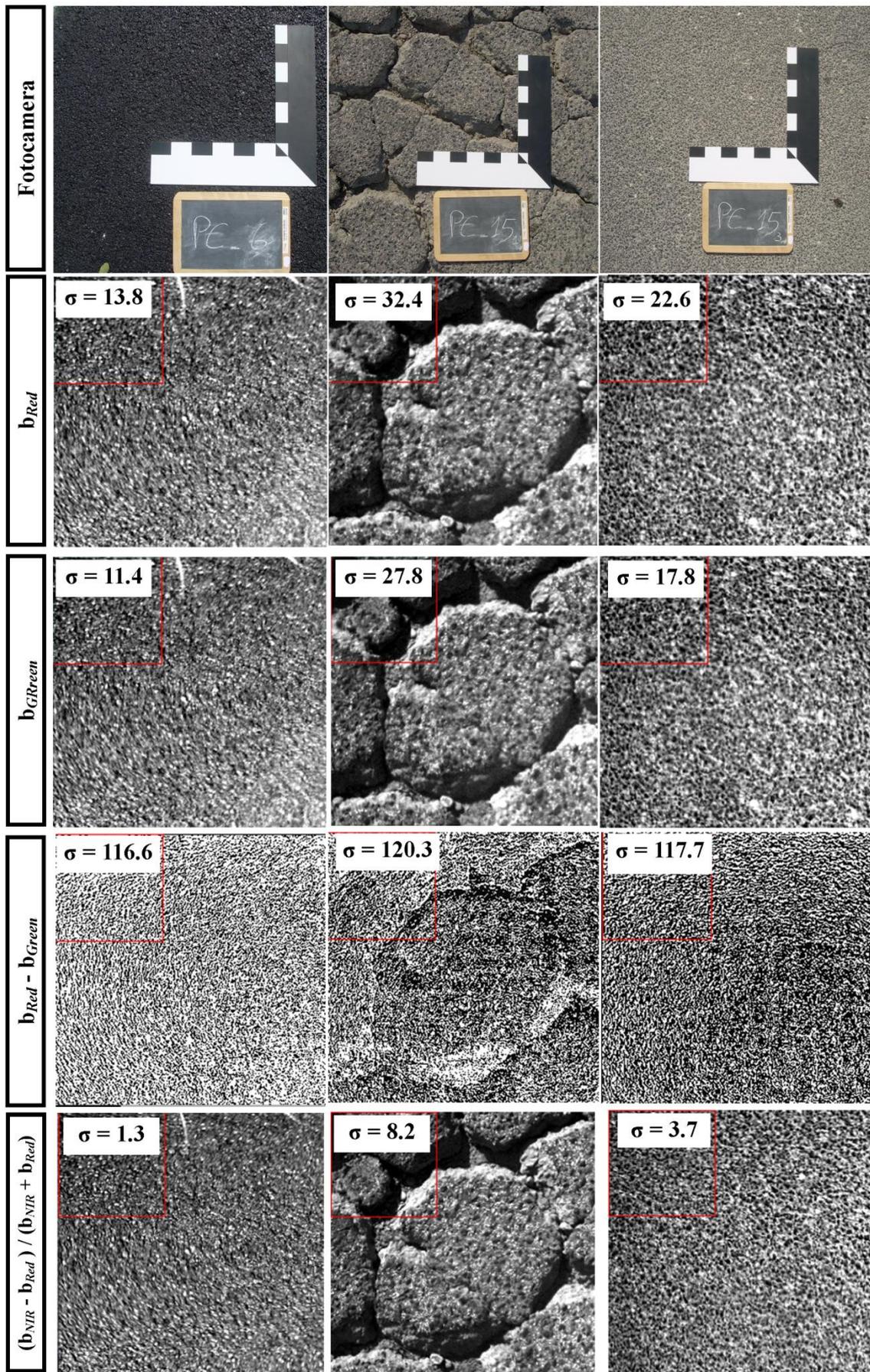


Figura 5.2-24: Elaborazioni indici spettrali parte 2

I risultati delle elaborazioni sono sintetizzate nelle figure seguenti. Partendo dall'analisi del trend evolutivo delle deviazioni standard calcolate a partire dalle bande del NIR, RED, GREEN e  $I_5$  si può osservare in figura 5.2-25 come sia possibile suddividere 2 tipologie di pavimentazioni: nuove e vecchie non usurate e pavimentazioni vecchie con diversi gradi di ammaloramento. Le pavimentazioni nuove e vecchie ma senza la presenza di fenomeni di ammaloramento presentano i valori di deviazione standard più bassi di tutto il dataset e ben si differenziano dalle altre pavimentazioni. I limiti di assegnazione a questa classe sono stati posti a 15, 23, 18, 5 rispettivamente nel NIR, RED, GREEN e  $I_5$ . Valori superiori a questi sono invece attribuiti a superfici con diversi gradi di ammaloramenti. I valori maggiori in deviazione standard vengono raggiunti per quelle pavimentazioni vecchie e fessurate (i valori salgono ancora se agli inerti basaltici tipici dello strato di usura sono stati miscelati inerti calcarei), pavimentazioni con buche e il binder. Inoltre è possibile notare come, anche per una pavimentazione molto recente ma che ha subito un fenomeno di sgranamento locale, con questo tipo di analisi sia possibile identificarla.

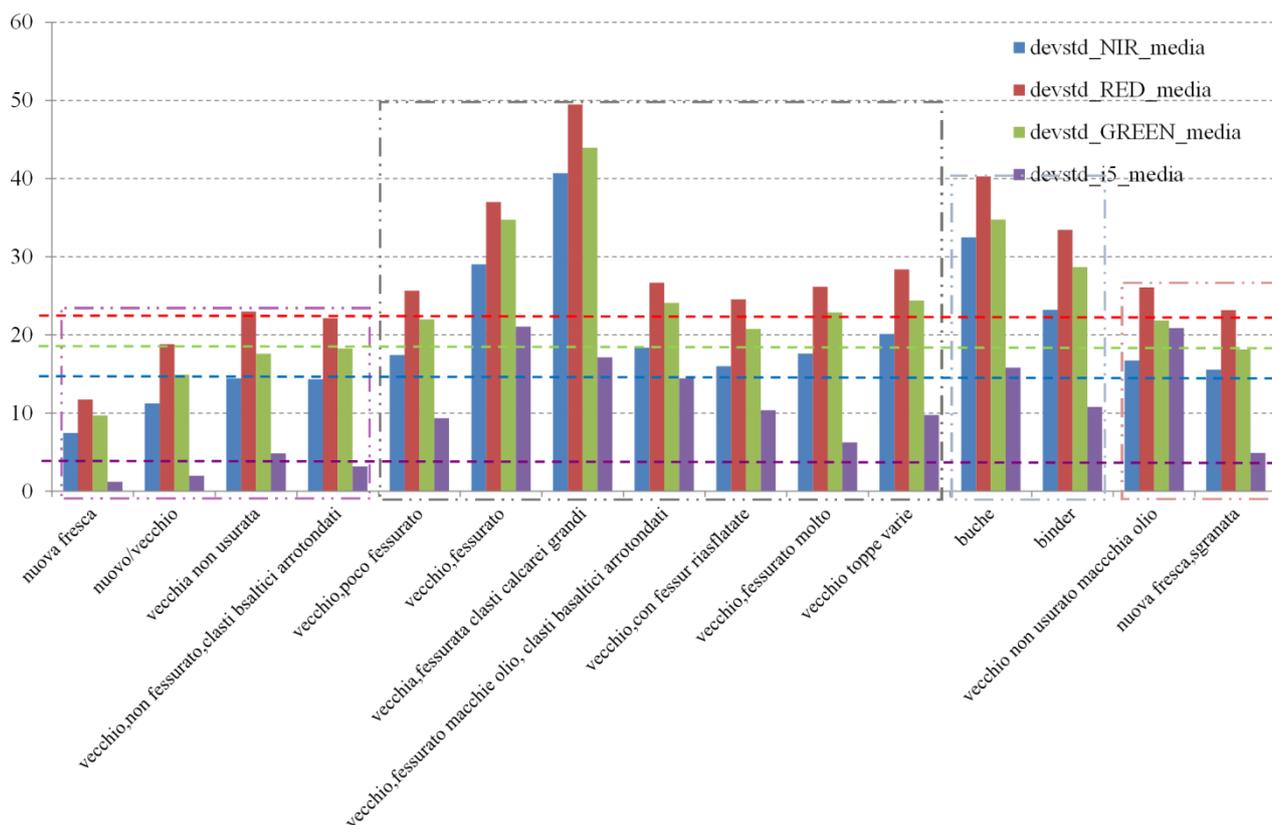


Figura 5.2-25: Deviazione standard delle immagini acquisite

L'effetto della non-omogeneità delle pavimentazioni ammalorate si riflette anche nella variazione degli autovalori relativi alle 4 variabili considerate. In figura 5.2-26 viene riportato questo trend che ben evidenzia la predominanza della quantità di informazione che viene acquisita nella banda nel NIR rispetto alle altre. In questo caso se si considera unicamente la banda del NIR, è stato posto il limite tra pavimentazioni usurate e non usurate a 1000.

Tali variazioni se osservate in termini geostatistici, si può osservare un netto divario tra superfici omogenee (non usurate) e pavimentazioni non-omogenee (usurate). In figura 5.2-27 è possibile infatti osservare il trend evolutivo delle *lag distance* ottenuti al momento del valore di *range*. Come è possibile notare il raggiungimento dell'autocorrelazione dei pixel avviene prima in quelle pavimentazioni che non presentano fenomeni di ammaloramento rispetto alle altre che invece tendono a raggiungerlo per valori di *lag* superiori o a non raggiungerlo affatto. In tal senso il valore limite di attribuzione della classe delle pavimentazioni non usurate è stato posto a 8 (per  $I_5$ ) anche se la pavimentazione nuova con sgranamento tende a confondersi. I valori ottenuti per le bande NIR, RED e GREEN non sono stati presi in considerazione in quanto tendono a confondere le classi.

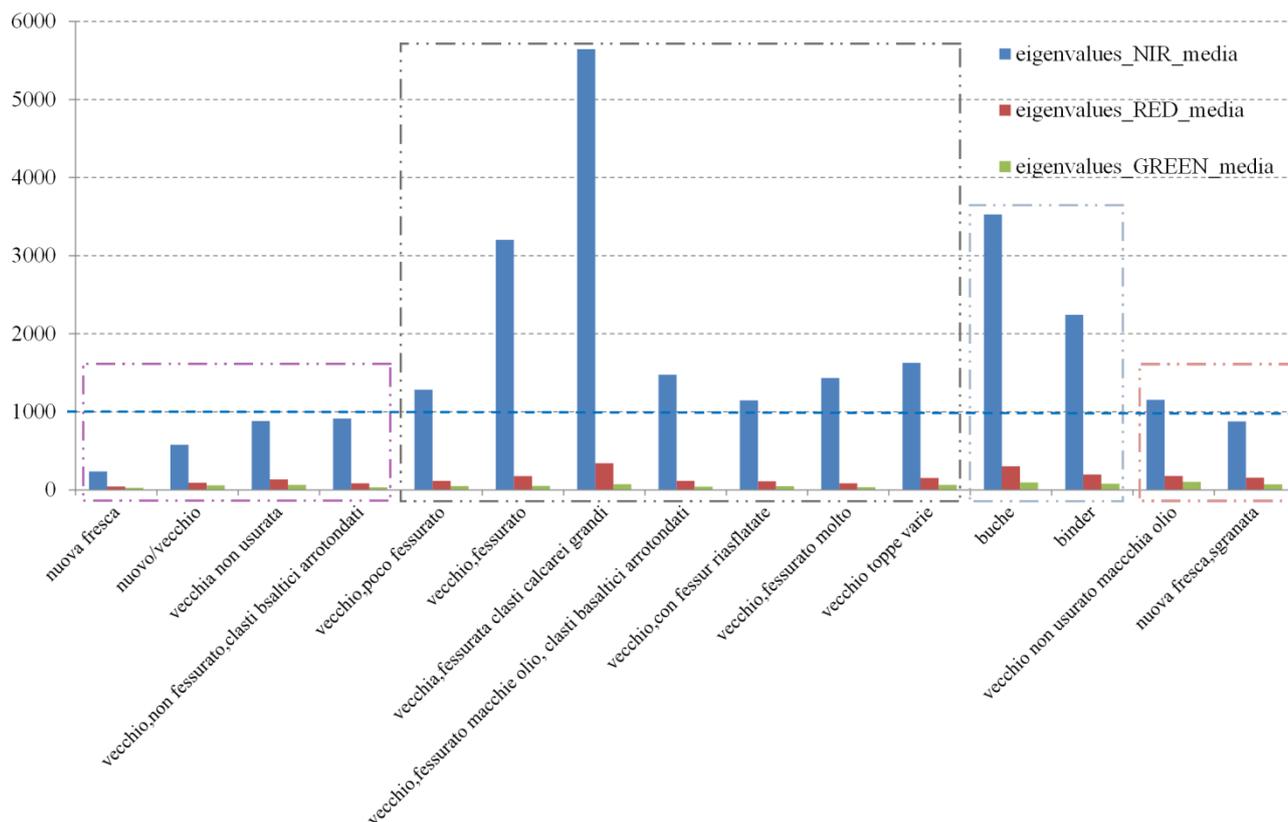


Figura 5.2-26: Autovalori delle immagini acquisite

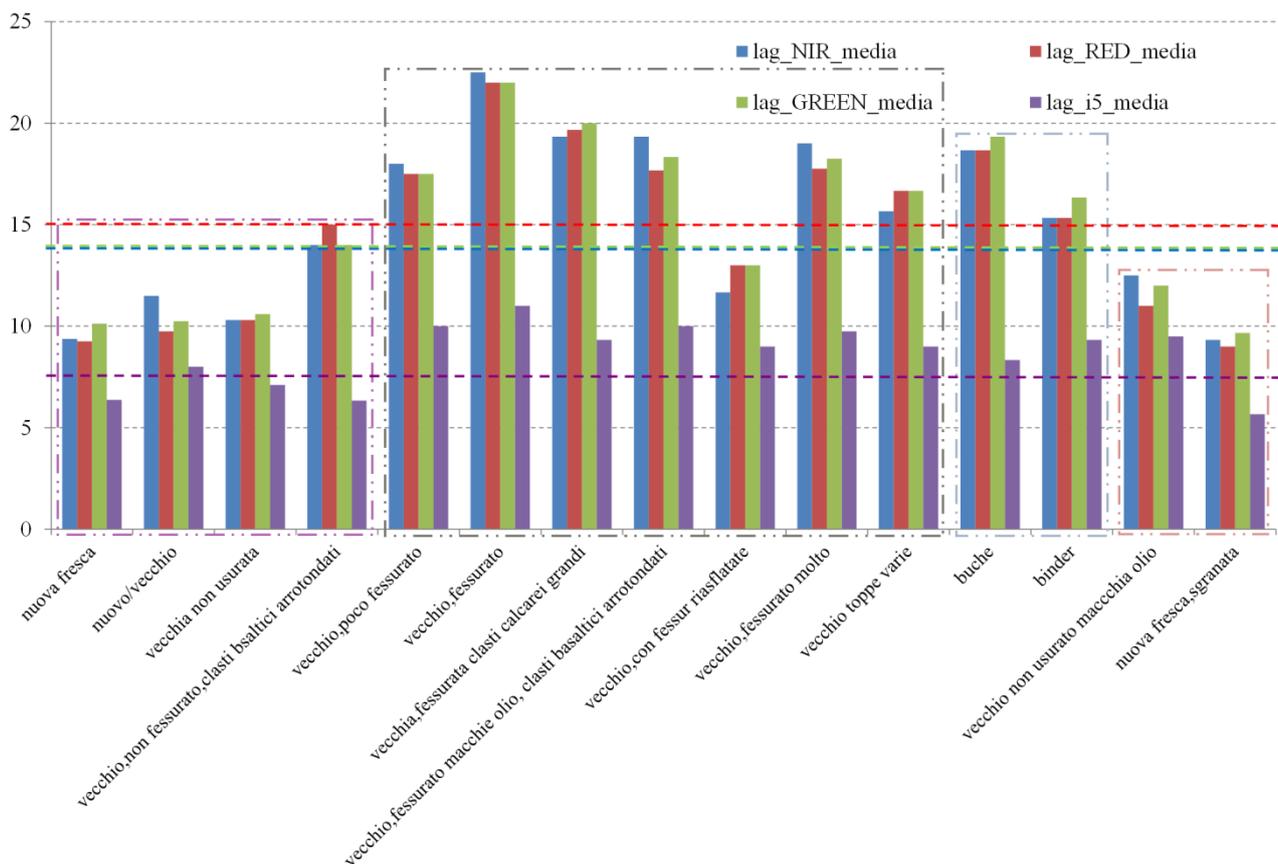


Figura 5.2-27: Lag distance delle immagini acquisite

Infine, se si prendono in considerazione i valori delle semivarianze ottenute al raggiungimento della distanza di autocorrelazione dei pixel, l' $I_5$  sembra essere il parametro che meglio discrimina le due tipologie di pavimentazioni ponendo il limite a 30 (figura 5.2-28).

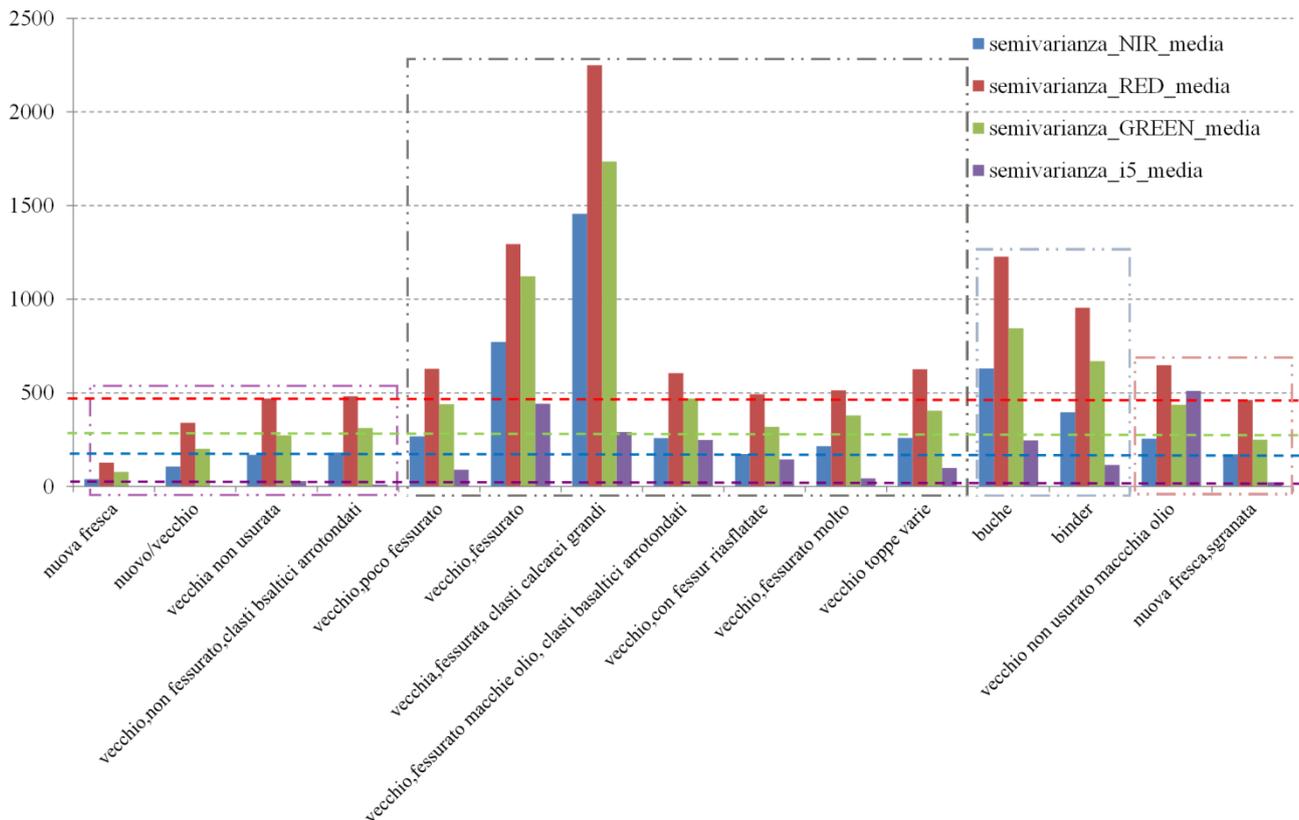


Figura 5.2-28: Semivarianze delle immagini acquisite al raggiungimento della lag distance

Con tale sperimentazione si è cercato di applicare una metodica innovativa tramite l'utilizzo di una camera multispettrale ad un rover terrestre per la valutazione dell'ammaloramento di una pavimentazione stradale. A discapito di classificare le immagini acquisite attraverso metodiche classiche (che molto spesso sono dispendiose in termini di tempi di calcolo), si è optato per la valutazione dell'omogeneità delle pavimentazioni stradali attraverso dei calcoli matematici relativamente semplici e rapidi come il calcolo dei valori di deviazione standard e degli autovalori. I dati ottenuti, avvalorati da computi geostatistici e su firme spettrali su *range* spettrali 350-2500nm, ha permesso di evidenziare, con estrema semplicità di calcolo, la possibilità di distinguere le pavimentazioni che hanno bisogno di manutenzione da quelle che invece non ne hanno bisogno.

## 6. Step 3 - TELERILEVAMENTO

Attualmente la maggior parte degli studi che riguardano la distinzione delle differenti pavimentazioni stradali attraverso l'elaborazione di dati satellitari, riguarda l'individuazione delle relazioni tra il dato radiometrico e le condizioni di qualità delle superfici pavimentate. Dall'analisi di immagini telerilevate multi- ed iper-spettrali, sono state recentemente individuate delle procedure speditive che consentono sia l'estrazione del reticolo stradale che la sua classificazione in base al grado di usura attribuito nel corso di campagne di rilievi al terreno (Lin et al. 2009, Potuckova et al. 2010, Mei et al. 2014).

Le potenzialità del telerilevamento, ed in particolare di quello iperspettrale, sono menzionate in molte occasioni (Usher & Truax, 2001; Gomez, 2002) in quanto l'individuazione di indici radiometrici consente di effettuare analisi da remoto sempre più di dettaglio anche grazie all'avvento di nuove generazioni di satelliti. Tuttavia non è ancora possibile discriminare con esattezza nella risposta spettrale il contributo legato all'invecchiamento dei materiali, all'erosione della superficie del conglomerato bituminoso, ai danni strutturali della pavimentazione né tanto meno derivarne con esattezza le caratteristiche composizionali.

Sulla base dei risultati emersi, presentati nei Capitoli 4 e 5, ed in particolar modo in riferimento alla possibilità di classificare le pavimentazioni stradali in base alla percentuale di ricoprimento degli aggregati da parte del bitume e al grado di dissesto, una parte delle attività di ricerca del dottorato sono state focalizzate sull'analisi di immagini iperspettrali MIVIS e satellitari WORDLVIEW-3 con due scopi differenti. Nel Capitolo 6.1 vengono descritti i risultati ottenuti per categorizzare gli assi viari in base a classi di ricoprimento di bitume mediante l'analisi degli indici spettrali calcolati su dati MIVIS; nel Capitolo 6.2, si fa riferimento ai risultati ottenuti utilizzando dati di campo, descritti nel paragrafo 5.2, per distinguere le pavimentazioni ammalorate da quelle non ammalorate nelle immagini WORDLVIEW-3.

### 6.1 ELABORAZIONE IMMAGINI IPERSPETTRALI MIVIS

A seguito dell'avvento di nuovi sensori satellitari ed aviotrasportati ad alta risoluzione, le ultime ricerche in campo ingegneristico hanno iniziato, già da qualche anno, ad interessarsi della possibilità di estrarre informazioni utili al monitoraggio delle condizioni delle strade. L'analisi sinottica che i sensori remoti sono in grado di offrire è una prerogativa che risulta essere di grande importanza nei processi di monitoraggio in ambito urbano per il mantenimento degli standard di sicurezza stradale. In molte ricerche l'attenzione è stata più volte rivolta alla differenziazione delle pavimentazioni in base alla loro differente luminosità in considerazione del loro invecchiamento. Come abbiamo visto in precedenza, la rimozione del bitume e l'affioramento della componente litica, sono tra gli effetti fondamentali legati ai fenomeni di usura del manto stradale. Il grado di usura del manto stradale può quindi contribuire sensibilmente alla risposta radiometrica delle superfici stradali. Essendo l'area superficiale dei clasti esposti il fattore che maggiormente influenza tale contributo, vi è la necessità di individuare una metodologia per la quantificare da remoto la distribuzione percentuale dei clasti esposti. Sulla base dei risultati ottenuti nei Capitoli precedenti ed in particolare al 4.2 e 5.1, si è cercato di estrarre da immagini iperspettrali MIVIS la mappatura delle strade in funzione della percentuale di clasti esposti in termini di Indice dei Clasti Esposti (ICE). Per far ciò si è proceduto all'utilizzo dell'indice spettrale che meglio riesce a modellare la correlazione tra ICE e radiometria.

#### 6.1.1 *metodologia e dati*

##### *Area di studio*

Al fine di ottenere la mappa relativa all'Indice dei Clasti Esposti tramite il computo di indici spettrali, è stata presa in considerazione una immagine iperspettrale MIVIS di un'area in prossimità della Città di Napoli, ad ovest del Parco Nazionale del Vesuvio. L'area di studio ricade all'interno di una zona più estesa dove sono stati acquisiti parte dei dati di campo utilizzati nel Capitolo 5.1. L'area di studio è riportata in figura 6.1-1.

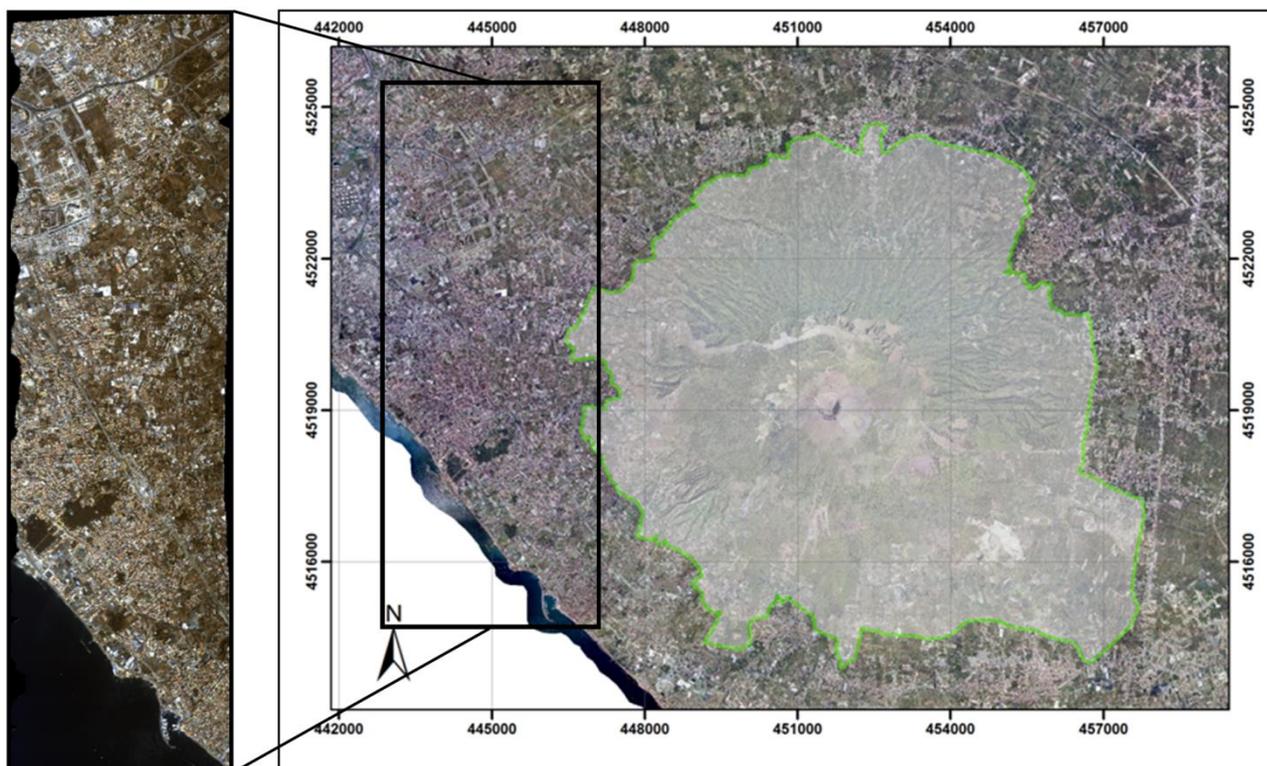


Figura 6.1-1: Localizzazione geografica dell'area di studio e dettaglio dell'immagine MIVIS elaborata

L'area di studio è stata scelta in funzione della disponibilità di immagini MIVIS e per l'elevata percentuale di siti per la calibrazione e validazione dei dati remoti, che nel nostro caso di studio sono stati presi come riferimento per le elaborazioni a fini stradali.

### **Sensore MIVIS**

Il *Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer* (MIVIS) è uno strumento di tipo a specchio rotante costituito da 4 spettrometri che riprendono simultaneamente la radiazione proveniente dalla superficie terrestre nelle lunghezze d'onda del visibile e "primo" infrarosso vicino (20 bande tra 0.43-0.83  $\mu\text{m}$ ), dell'infrarosso vicino (8 bande tra 1.15-1.55  $\mu\text{m}$ ), dell'infrarosso medio (64 bande tra 2.0-2.5  $\mu\text{m}$ ), e dell'infrarosso termico (10 bande tra 8.2-12.7  $\mu\text{m}$ ), per un totale di 102 canali.

Le caratteristiche principali del MIVI, sono riportate di seguito:

- 102 bande spettrali simultaneamente digitalizzate e registrate.
- Copertura spettrale compresa tra 0.43 e 12.7  $\mu\text{m}$ .
- 2 corpi neri di riferimento calibrabili in funzione della temperatura ambiente.
- Registrazione spaziale di tutte le bande con un IFOV di 2.0 mrad.
- Field Of View digitalizzato 90°.
- Velocità rotazionale di scansione selezionabile da 25 sino a 6.25 scansioni/sec.
- Scena ripresa su 949 pixels per linea di scansione.
- Interfaccia con un sistema GPS/INS Applanix 410 costituito da un ricevitore GPS per la determinazione della posizione e della velocità della piattaforma aerea, e da un giroscopio per la registrazione dei dati di assetto dell'aereo per la successiva correzione geometrica dei dati.
- Moving Window Display tipo CRT ed oscilloscopio digitale per il monitoraggio contemporaneo di 2 canali selezionabili durante le operazioni di ripresa.

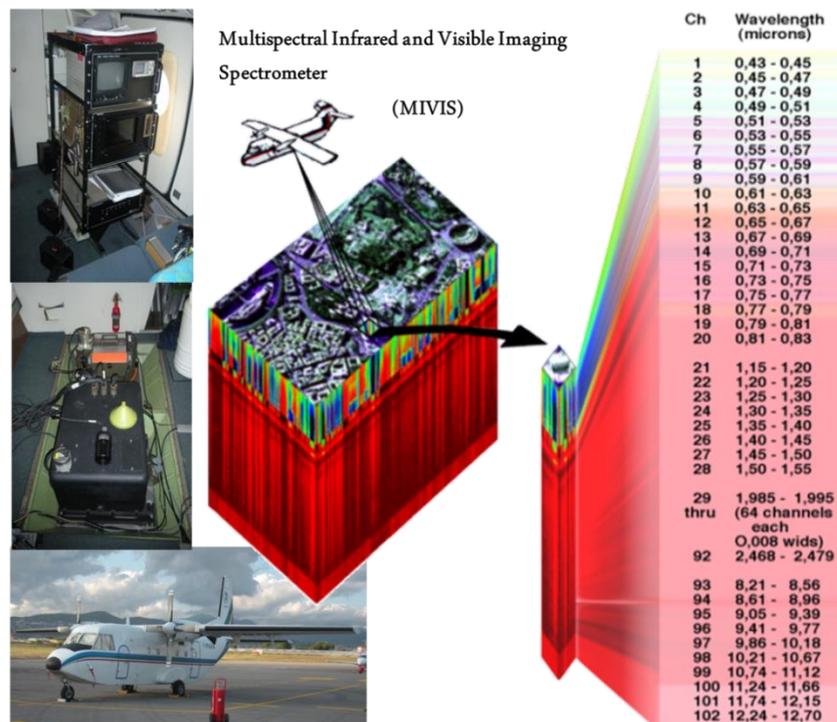


Figura 6.1-2: Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer (MIVIS)

Il MIVIS è costituito da cinque componenti principali:

- *Testa di Scansione e Spettrometro*: costituita da elementi ottici che comprendono il telescopio collimatore primario ed uno specchio rotante di scansione, dal motore-contatore che controlla la frequenza di scansione, da corpi neri di riferimento termico e da una struttura d'acciaio invar e alluminio che contiene i componenti, schermo la radiazione ottica dispersa e fornisce l'interfaccia con lo spettrometro. L'energia proveniente dalla scena e raccolta dallo specchio di scansione è focalizzata e diretta entro l'apertura Field Stop da un paraboloide. Ognuno dei corpi neri di riferimento è visto una volta per ogni rotazione dello specchio di scansione. Lo spettrometro riceve l'energia collimata dalla Testa di Scansione e la suddivide tramite filtri dicroici all'interno di 4 spettrometri singoli. Ogni spettrometro contiene un reticolo di diffrazione, lenti ottiche, un array di sensori e l'elettronica di pre-amplificazione del segnale.
- *Digitalizzatore*: converte i 102 segnali analogici in forma digitale a 16 bit, formatta questi dati e li registra sul supporto HD. Questo processo è sincronizzato con la rotazione dello specchio di scansione per mezzo di segnali inviati dal contatore ottico installato nel motore di scansione.
- *Distributore d'Alimentazione*: rappresenta l'interfaccia tra l'alimentazione dell'aereo ed i restanti sottosistemi del MIVIS.
- *Moving Window Display e Monitor*: contiene un Monitor, un oscilloscopio digitale ed un invertitore di potenza. Il Monitor riceve le immagini dal Digitalizzatore per il monitoraggio di due canali selezionabili.
- *Sistema di Storage dei dati*: consente la registrazione di grandi quantità di dati digitali su Hard drive ad alta velocità su Hard disk allo stato solido.

Nel 2007 la casa costruttrice del MIVIS ha eseguito un upgrade sul sistema inserendo una piattaforma inerziale Applanix. In questo modo, ogni volta che il MIVIS registra una singola linea, il sistema tramite la piattaforma è in grado di determinare i parametri geometrici del sensore in quel preciso istante e di metterli in correlazione con il dato MIVIS registrato.

#### **Dati di campo**

I dati di campo, acquisiti contemporaneamente al sorvolo del MIVIS, constano in firme spettrali nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350-2500 nm acquisite mediante spettrometro portatile Fieldspec A.S.D., in una documentazione fotografica delle singole pavimentazioni e in informazioni ancillari

sempre relative alle singole pavimentazioni. Per le caratteristiche specifiche della metodologia adoperata per l'acquisizione del dataset spettrale, fotografico ed ancillare si rimanda al Capitolo 5.1.

Per lo svolgimento di questo studio è stato utilizzato un *dataset* costituito da 15 firme spettrali caratteristiche ed altrettante fotografie digitali di asfalti associate. Tali dati sono stati acquisiti durante le campagne di misura effettuate nel corso del 2010 e 2011 prendendo in considerazione asfalti con differenti stati di usura. Ognuna delle 15 firme risulta essere la media di 10-20 acquisizioni. In figura 6.1.3 si riporta la fotografia digitale di un target acquisito mediante spettrometro e una parte della libreria spettrale realizzata sulla base delle firme acquisite.

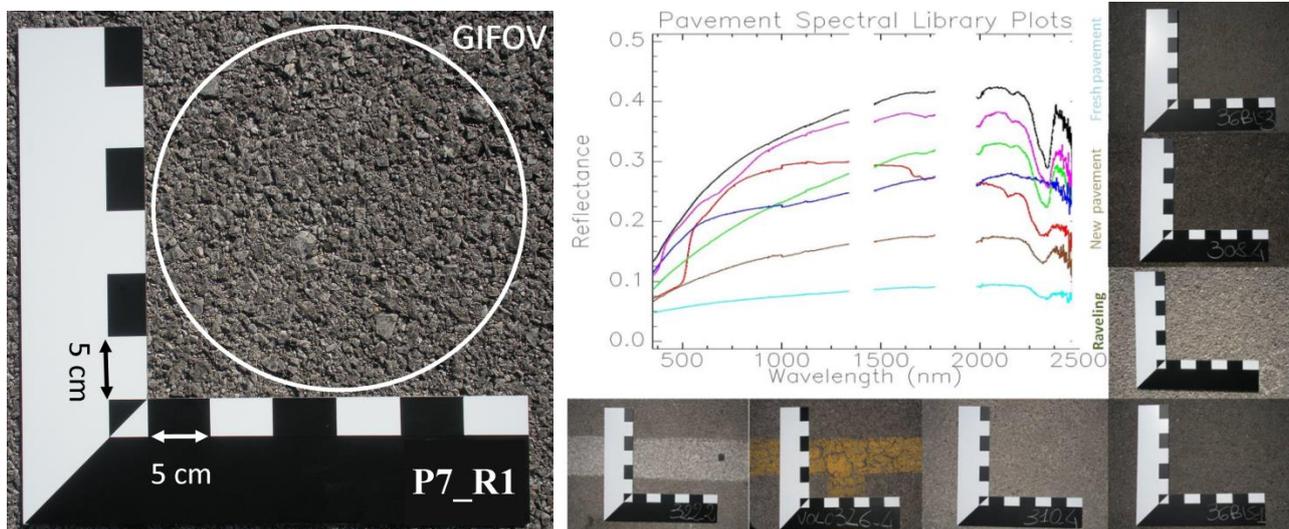


Figura 6.1-3: Regolo di calibrazione con all'interno il footprint radiometrico della firma spettrale rappresentativa dell'area fotografata. Libreria di alcune firme spettrali acquisite.

### Correzione atmosferica ed ortorettifica

Prima di poter elaborare le immagini è opportuno effettuare diversi passaggi di *image pre-processing*. Come prima cosa, il dato grezzo acquisito è stato elaborato a terra utilizzando una opportuna stazione di decommutazione. Sono stati eliminati eventuali rumori sistematici introdotti accidentalmente ed il dato sorgente è stato calibrato radiometricamente utilizzando sia i dati provenienti dalle sorgenti di riferimento del sensore registrati durante il volo, sia i dati della calibrazione effettuata al banco di taratura prima dell'effettuazione delle riprese. Alla fine del processo si sono ottenuti, per la bande comprese tra la 1 e la 92 (visibile ed infrarosso vicino e medio), dei valori definitivi di radianza espressi in  $\mu\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$  mentre i dati calibrati radiometricamente per i canali dal 93 al 102, calcolati con una interpolazione lineare tra i valori di riferimento dei due corpi neri, sono espressi in temperature al sensore ( $^{\circ}\text{C}$ ). Il dato corretto in formato .bip o .bsq o .bil, e georeferenziato può passare alla fase successiva per la correzione atmosferica.

Al fine di eliminare il contributo dell'influenza dell'atmosfera sui dati radiometrici che si elaborano, è importante eseguire un processo di correzione atmosferica. Pertanto, alcune di queste firme sono state utilizzate, anche per la calibrazione e validazione delle immagini tramite il metodo dell'*empirical line* (Clark et al. 2011). L'applicazione di questo metodo consente di trasformare i valori di DN o radianza delle immagini in valori di riflettanza (Conel, 1987; Lau, 2004, Ben-Dor et al. 2004). L'applicazione di questo metodo necessita almeno di due target di riferimento in un range di riflettanze il più ampio possibile (Smith and Milton 1999, Karpouzli and Malthus 2003) al fine di definire la relazione lineare tra dato al sensore e dato a terra, calcolato per ogni banda (Liang, 2004). Tale correlazione permette di calcolare i valori di gain e offset utili alla conversione da DN/radianza a valori di riflettanza escludendo così il contributo atmosferico (Clark et al. 2002) attraverso tale relazione per ogni banda  $i$ :

$$\rho_{si} = k_i * L_{ri} + b_i$$

Dove  $\rho_{si}$  è la riflettanza della superficie,  $L_{ri}$  è il valore in DN o radianza per la banda  $i$ esima,  $k_i$  è il valore di gain, ossia l'angolo della relazione lineare e  $b_i$  è il valore di offset che indica il contributo in path radianza all'interno di ogni banda  $i$ esima (Zhou et al. 2011, Schott, 1997).

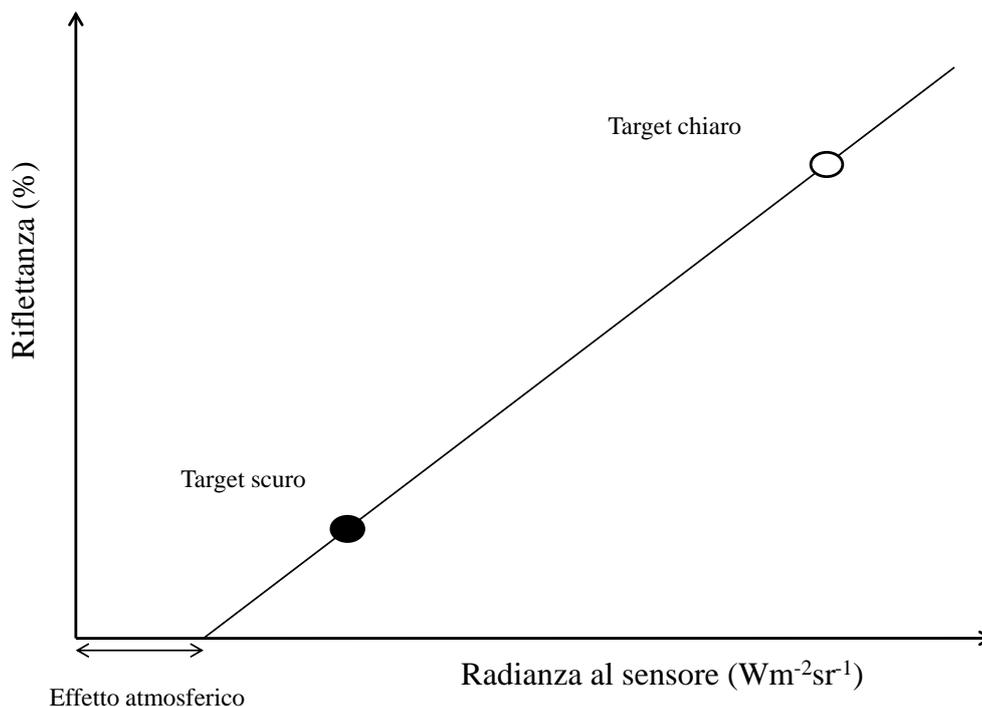


Figura 6.1-4: Relazione lineare durante l'applicazione della empirical line per un banda i considerando due punti.

Tenendo conto del contributo dell'effetto di adiacenza dei pixel [Leone et al. 1995], è stata posta particolare cura nell'effettuare le misurazioni su target collocati all'interno di siti geometricamente rilevanti al fine di ottenere firme spettrali statisticamente significative di aree riconoscibili sulle immagini. Inoltre i siti di misura sono stati selezionati ad adeguata distanza da alberi o palazzi per evitare gli effetti d'ombra che possono ridurre le dimensioni effettive della superficie "omogenea" riconoscibile sulle immagini. Sono stati selezionati siti con rivestimenti in asfalto il più possibile omogenei, con la minor presenza di alterazione e dissesto superficiale nonché di segnaletica orizzontale poiché tali elementi influenzano la risposta radiometrica delle superfici [Herold et al.2004].

Inoltre si è proceduto al calcolo del coefficiente di variazione (COV) per valutare l'invarianza spettrale nello spazio. Le superfici che presentano COV inferiori a 5 % (vedi Capitolo 5.1) sono state prese in considerazione per le fasi di calibrazione e validazione del processo di correzione atmosferica.

Nel corso delle campagne di misura sono stati registrati dati meteorologici al fine di poter poi prendere in considerazione, per questo lavoro, unicamente le misure radiometriche che possono essere considerate eseguite in condizioni meteo simili. Per ogni misura è stato inoltre calcolato l'angolo di elevazione solare il quale ha consentito di utilizzare proficuamente dati acquisiti in tempi e luoghi diversi.

Le immagini MIVIS, essendo generate da un sensore aviotrasportato, presentano distorsioni geometriche non trascurabili. La correzione geometrica dei dati telerilevati è un processo fondamentale per la loro elaborazione, in quanto permette di correggere un'immagine dalle deformazioni subite nella fase di ripresa e da quelle connesse con la strumentazione utilizzata. Il calcolo dei parametri dei modelli di correzione geometrica è basato sull'uso dei Ground Control Points (GCPs) e la verifica dei risultati è eseguita tramite il confronto con le coordinate di Check Points (CPs). Al momento sono due le strategie utilizzate nella correzione geometrica delle immagini telerilevate: quella basata su modelli non parametrici e quella basata su metodi rigorosi [Cheng and Toutin, 2001]. In assenza di un modello rigoroso per il sensore iperspettrale MIVIS, il modello delle funzioni razionali (RFM), proprio per la sua peculiarità di poter essere applicato ad un qualsiasi sensore trascurando il processo fisico geometrico di generazione dell'immagine, risulta il più adatto a correggere le immagini MIVIS (Fontinovo et al. 2012).

Con il modello delle funzioni razionali (RFM) la trasformazione tra coordinate immagine e coordinate terreno viene descritta tramite una relazione funzionale che non tiene conto del processo fisico-geometrico di generazione dell'immagine. Tali funzioni sono costituite dal rapporto di due polinomi che esprimono le relazioni tra le coordinate immagine (i, j) e le coordinate oggetto (X,Y,Z) in rapporto ad un numero variabile di coefficienti:

$$i = \frac{P_1(X,Y;Z)}{P_2(X,Y;Z)} \qquad j = \frac{P_3(X,Y;Z)}{P_4(X,Y;Z)}$$

Il numero di GCPs richiesto per il modello polinomiale è in funzione dell'ordine dei polinomi. Tale ordine deve essere inferiore o al massimo uguale a 3, dal momento che ordini superiori a 3 non migliorano in modo sostanziale i risultati e richiedono un numero piuttosto elevato di GCPs distribuiti regolarmente. I termini di primo ordine modellizzano la geometria della presa, quelli di secondo ordine tengono conto della curvatura terrestre, della diffrazione atmosferica e delle distorsioni delle lenti, mentre quelli del terzo ordine includono bias non modellizzati.

Dal punto di vista analitico la formula dei polinomi di terzo grado è espressa da una relazione del tipo:

$$P = \sum_{l=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} \sum_{k=0}^{m3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k = a_0 + a_1 Z + a_2 Y + a_3 X + a_4 ZY + a_5 ZX + a_6 YX + a_7 Z^2 + a_8 Y^2 + a_9 X^2 + a_{10} ZYX + a_{11} Z^2 Y + a_{12} Z^2 X + a_{13} Y^2 Z + a_{14} Y^2 X + a_{15} ZX^2 + a_{16} YX^2 + a_{17} Z^3 + a_{18} Y^3 + a_{19} X^3$$

I coefficienti  $a_{ijk}$  rappresentano i 20 coefficienti RPC (Rational Polynomial Coefficients) e della funzione polinomiale e X, Y, Z, rappresentano le coordinate a terra dei GCPs. Tali coefficienti possono essere stimati ai minimi quadrati tramite l'utilizzo di almeno 39 GCPs.

Una volta individuato un GCP sulla CTR, la condizione necessaria è che sia ben visibile sull'immagine MIVIS. La scelta dei GCPs prescinde dal tipo di modello di correzione geometrica che si andrà ad applicare ma, in ogni caso, la loro distribuzione dovrà essere uniforme e questo è ottenibile inserendoli all'interno delle stesse maglie usate per i CPs (un km<sup>2</sup>).

### ***Elaborazione spettrale***

Al fine di poter effettuare il computo spettrale per la realizzazione della mappa dell'ICE è stato innanzi tutto necessario estrarre il reticolo viario. A tale scopo è stato utilizzato l'algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) che rientra nella famiglia dei metodi di classificazione supervisionati. L'algoritmo SAM, implementato in ENVI, richiede come input un numero di *training areas* o spettri di riferimento derivanti da specifiche *Region Of Interest* (ROI) estratte dall'immagine o da banche dati spettrali.

La classificazione tramite SAM permette una rapida mappatura delle similarità degli spettri di immagine con gli spettri di riferimento [Boardman, 1994]. L'algoritmo si basa sul paragone tra il dato spettrale estratto dall'immagine e quello derivante dall'acquisizione di riferimento e mira ad accentuare le similarità spettrali e quindi le caratteristiche dei diversi target che sono stati individuati attraverso la definizione degli *endmembers* o sono estratti da librerie spettrali.

La similarità tra lo spettro di riferimento, ottenuto dalla media degli spettri forniti dai *training sites*, e quello relativo ad ogni pixel è espressa nello spazio  $n$ -dimensionale come distanza angolare  $\alpha$ , misurata in radianti e compresa tra 0 e  $\pi/2$ . La relazione riconosciuta tra le lunghezze d'onda a 460nm e 740nm mediante l'utilizzo dello scatter plot ha permesso di definire la macro-classe asfalti, secondo la relazione esposta nel Capitolo 5.1.2, attraverso la quale è possibile calcolare l'angolo della retta interpolante da utilizzare come valore di *threshold* da utilizzare all'interno dell'algoritmo (Mei et al. 2014).

La similarità di uno spettro non conosciuto  $t$  con uno spettro di riferimento  $r$ , è determinata attraverso la seguente equazione:

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left( \sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left( \sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

Dove  $\alpha$  è l'angolo tra i vettori e  $nb$  il numero di bande nell'immagine.

Le mappe dell'angolo spettrale derivate formano un nuovo cubo di dati con il numero di bande uguale a quello degli spettri di riferimento utilizzati per la mappatura.

La SAM è stata quindi utilizzata per individuare sulla scena tutti i pixel con caratteristiche spettrali simili a quelli riconosciuti come pavimentazione stradale composta da conglomerato bituminoso. Tale dato è stato successivamente utilizzato per mascherare l'immagine ed applicare l'indice spettrale individuato. Come si è potuto osservare nei Capitolo 5.1 l'applicazione di tecniche di *Digital Imaging Processing*, associata a dati spettrali ha permesso di ottenere un indice spettrale con cui risalire all'Indice dei Clasti Esposti. Si riporta di seguito la relazione dell'indice  $I_6$ :

$$I_6 = \frac{(\lambda_{740nm} * \lambda_{830nm})}{\sqrt{\left(\frac{\lambda_{740nm}}{\lambda_{460nm}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_{830nm}}{\lambda_{490nm}}\right)^2}}$$

e dell'Indice dei Clasti Esposti:

$$ICE = \frac{n_{pe}}{n_{pt}} \times 100$$

Dove  $n_{pe}$  è il numero di pixel corrispondenti agli inerti esposti in superficie che causa l'apparizione di *feature* spettrali degli inerti;  $n_{pt}$  rappresenta il numero totale di pixel nell'AOI.

Inoltre sono stati messi a confronto anche l'indice *VIS2dif* tratto da Herold et al.2008 calcolato come la differenza tra le lunghezze d'onda a  $\lambda=830nm$  e  $\lambda=490nm$  e la differenza spettrale tra le lunghezze d'onda a  $\lambda=740nm$  e  $\lambda=460nm$  (denominato qui per praticità  $I_{slope}$ ).

L'indice spettrale è stato applicato all'immagine MIVIS per la realizzazione della mappa dell'ICE. In figura 6.1-5 viene riportato il *workflow* del procedimento.

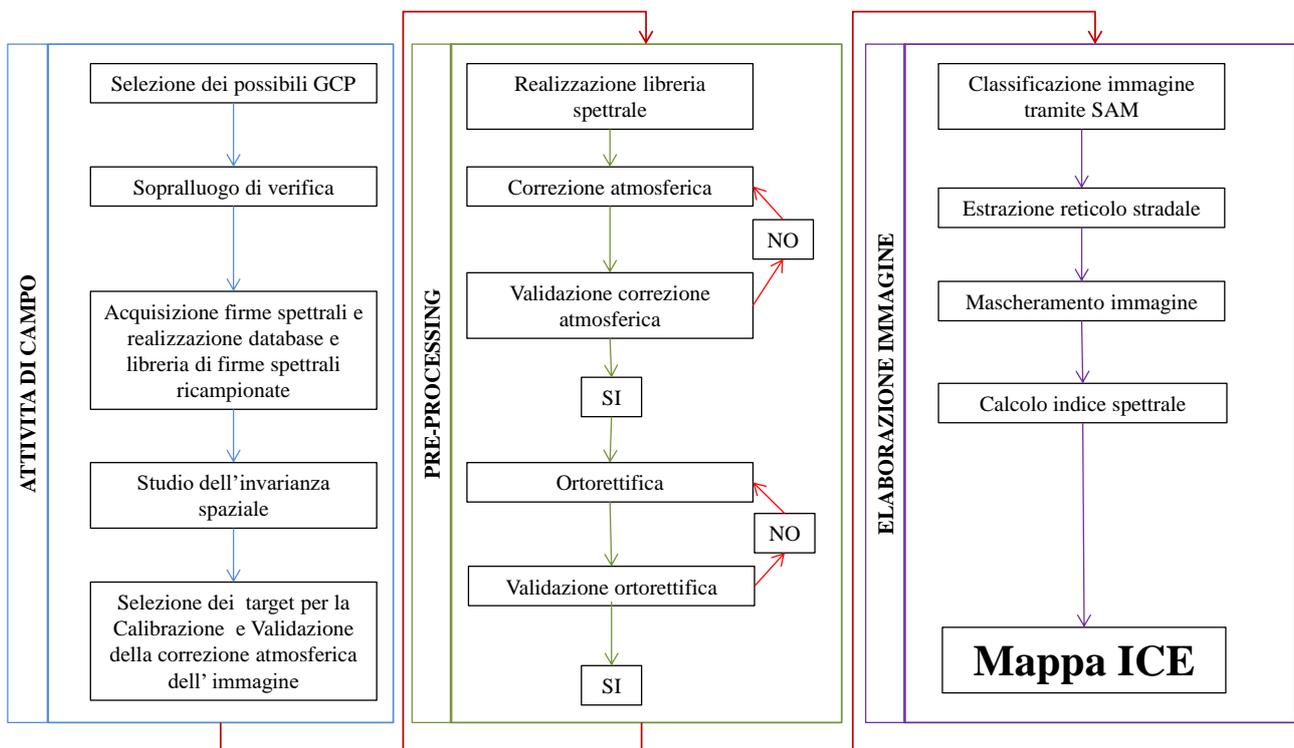


Figura 6.1-5: Workflow per mappatura ICE da immagine MIVIS

## 6.1.2 risultati e osservazioni

### Pre-processing

Al fine di calibrare l'immagine MIVIS in valori di riflettanza, è stato applicato il metodo dell'*empirical line*. Il risultato è stato quello di aver ottenuto un'immagine priva del contributo atmosferico in grado di condizionare le elaborazioni successive.

I risultati di tali elaborazioni sono esposti in figura 6.1-6 per le 9 bande prese a riferimento. In particolare vengono presentati, per le lunghezze d'onda a 460nm, 520nm, 660nm, 740nm, 820nm, 1320nm, 1430nm, 2130 nm e 2350nm, i valori di riflettanza di riferimento misurati in campo, quelli predetti dai modelli, le equazioni, i coefficienti di correlazione e i rispettivi RMSE.

Generalmente i valori di correlazione tendono a diminuire (al contrario gli RMSE aumentano) dal VIS al MIR ma indicano, comunque, che il processo di calibrazione è andato a buon fine.

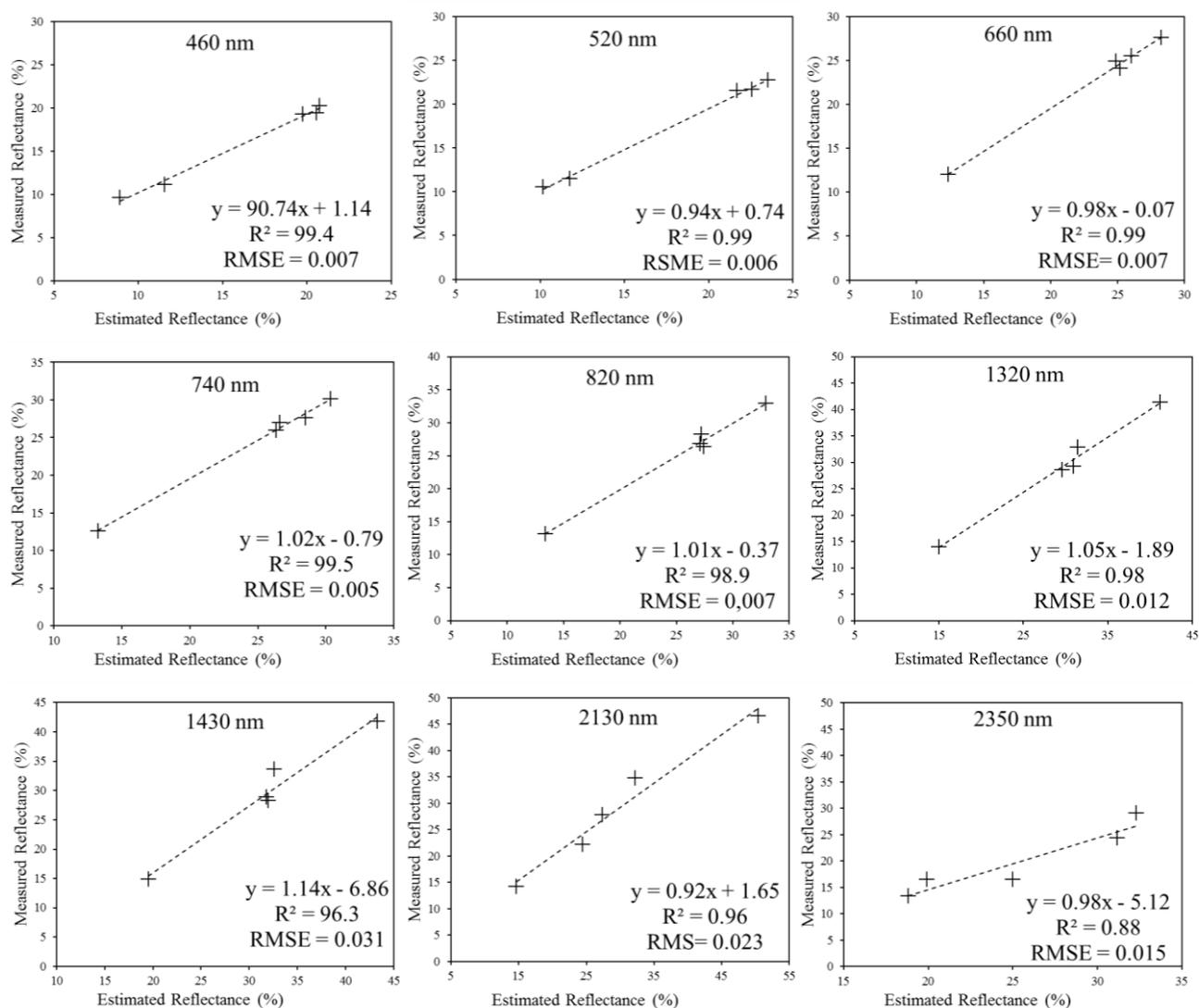


Figura 6.1-6: Validazione della correzione atmosferica tramite *empirical line* su dati MIVIS.

Come già accennato, in assenza di un modello rigoroso per il sensore iperspettrale MIVIS, il modello delle funzioni razionali (RFM) risulta il più adatto a correggere geometricamente le immagini MIVIS. Alle immagini MIVIS georiferite è stata quindi sovrapposta la Carta Tecnica Regionale (CTR) della Regione Campania alla scala nominale 1:5.000. La CTR è stata divisa in maglie di un km<sup>2</sup> ed, in ognuna di esse, sono stati inseriti due CPs opportunamente scelti in modo tale da poter essere collimati facilmente sull'immagine.

Le aeree MIVIS riprese sono state acquisite ad una quota di volo minima di 1500 metri, corrispondente ad una risoluzione spaziale a terra del pixel di 3x3 metri. Avendo a disposizione immagini MIVIS con una risoluzione del pixel a terra di 3x3 m, la creazione di un set di GCPs da collimare sull'immagine è stata generata partendo da una

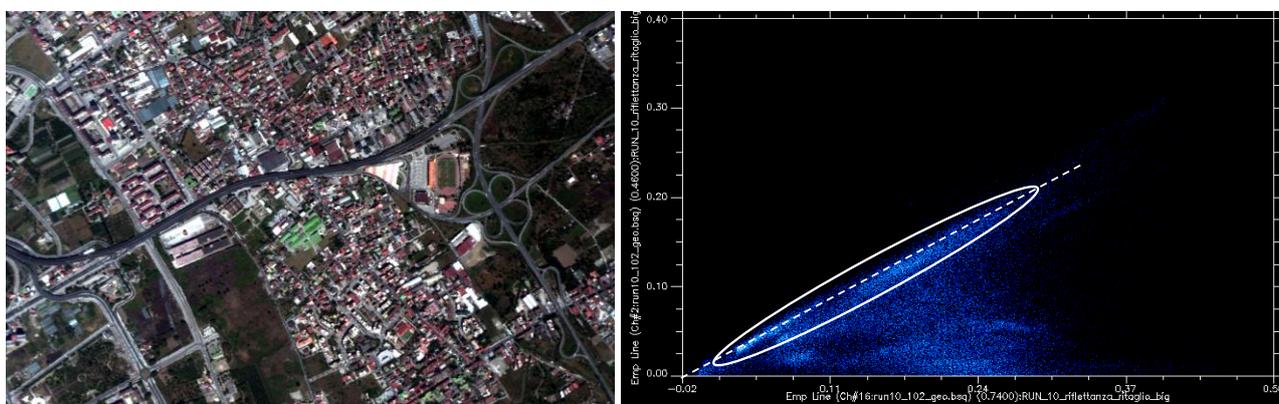
CTR di scala nominale 1:5.000, in quanto sia l'errore di graficismo che l'errore di massima tolleranza sono comunque inferiori alla risoluzione del pixel.

La procedura di creazione, distribuzione e collimazione di 395 GCP, associata alla disponibilità di un DEM con passo a 5 metri, ha portato alla produzione di ortofotocarte iperspettrali con un errore sui CP di 1,48 pixel (Ground RMS di 4.42metri) distribuito in maniera uniforme su tutta l'immagine, con una riduzione sostanziale dell'errore anche ai bordi dell'immagine stessa.

### **Elaborazione immagine**

Sulle prime 28 bande è stata applicata l'analisi in componenti principali (*routine MNF-Mimimun Noise Factor*) che ha permesso di ridurre la dimensionalità spettrale dell'immagine da classificare [Mack et al. 1964, Mei et al. 2012].

E' stata successivamente applicata la procedura Pixel Purity Index (PPI) che ha permesso di estrarre i pixel spettralmente più puri dalle ROI da utilizzare come dato di input nell'algoritmo SAM. Il computo del coefficiente angolare da adoperare nella SAM è stato invece estratto dall'angolo ottenuto dalla linea che interpola la clusterizzazione dei pixel relativi agli asfalti ("Retta degli Asfalti") (Mei et al. 2014) considerando le bande 2 ( $\lambda=460\text{nm}$ ) e 16 ( $\lambda=740\text{nm}$ ) del MIVIS (*figura 6.1-7*).



*Figura 6.1-7: Dettaglio dell'immagine MIVIS e relativo cluster con macro-classe "asfalti" selezionata e retta interpolante.*

L'applicazione della *Spectral Angle Mapper* ha permesso di classificare le diverse tipologie di pavimentazione sulla base della libreria di firme spettrali, precedentemente descritta. Le firme che compongono la libreria permettono di caratterizzare le diverse tipologie di conglomerati bituminosi presenti nella scena e le loro diverse condizioni, ma non quello di definire le diverse classi di ricoprimento degli aggregati da parte del bitume. Pertanto le classi ottenute hanno evidenziato unicamente le aree che nell'immagine sono rappresentate da conglomerati bituminosi e non da altre tipologie di coperture come la vegetazione, suolo o tetti. Le classi ottenute dall'applicazione della SAM (vedi figura 6.1-8a) sono state unite in una unica macro classe (vedi figura 6.1-8b) ed estratte come livello vettoriale. Tale livello è stato trasformato in una maschera (vedi figura 6.1-8c) ed applicata all'immagine (vedi figura 6.1-8d) in modo da includere, nel computo degli indici spettrali, solamente le superfici asfaltate.

A partire dall'immagine MIVIS corretta atmosfericamente e mascherata con il reticolo stradale, sono stati calcolati l'indice  $I_6$  nonché gli indici  $VIS2-diff$  e  $I_{slope}$ :

$$VIS2-diff = \lambda_{830\text{nm}} - \lambda_{490\text{nm}}$$

$$I_{slope} = \lambda_{740\text{nm}} - \lambda_{460\text{nm}}$$

Per la determinazione dell'esposizione degli aggregati sulle pavimentazioni da utilizzare come riferimento per la validazione di quanto calcolato da remoto è stata applicata la procedura di *Digital Imaging Processing* riportata nel capitolo 5.1 che ha portato al computo dell'Indice dei Clasti Esposti.

I risultati della validazione eseguita su 6 target, utilizzati unicamente per la validazione, indica l'indice  $I_6$  come quello che meglio restituisce il dato di ICE analogamente a quanto calcolato sulle fotografie digitali acquisite in campo. I risultati sono riportati in figura 6.1-9 e mostrano come sia netto il divario in termini di correlazione (0.97) e di RMSE (1.6%) se confrontati con gli altri due indici. In figura 6.1-10 viene invece riportata la mappa dell'Indice dei clasti esposti tramite il calcolo di tale indice.

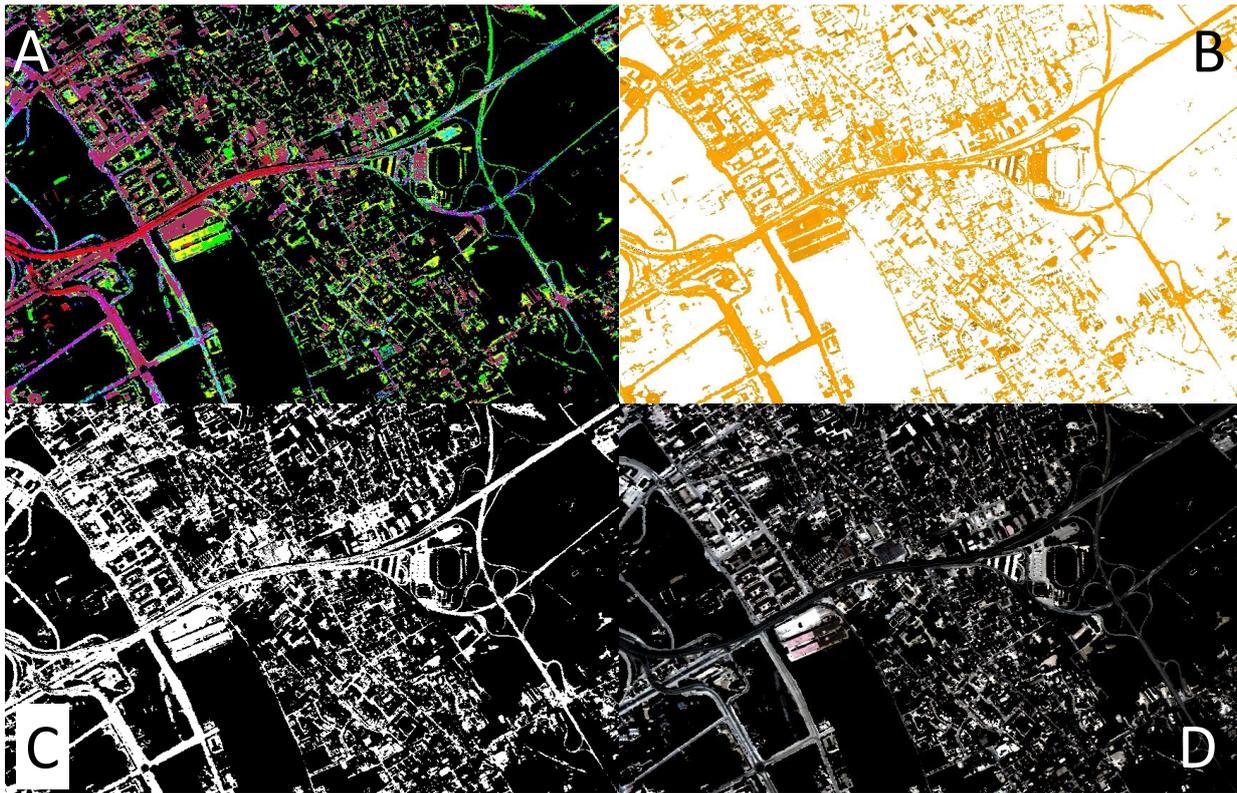


Figura 6.1-8: Risultato della classificazione mediante SAM in cui si evidenzia la differenza tra le diverse classi ottenute sulla base dei training dataset di input (A), fusione di tali classi in una unica macro classe (B), vettorializzazione della classe e creazione di una maschera "strade" (C) e applicazione della maschera strade sull'immagine MIVIS corretta atmosfericamente ed ortorettificata (D).

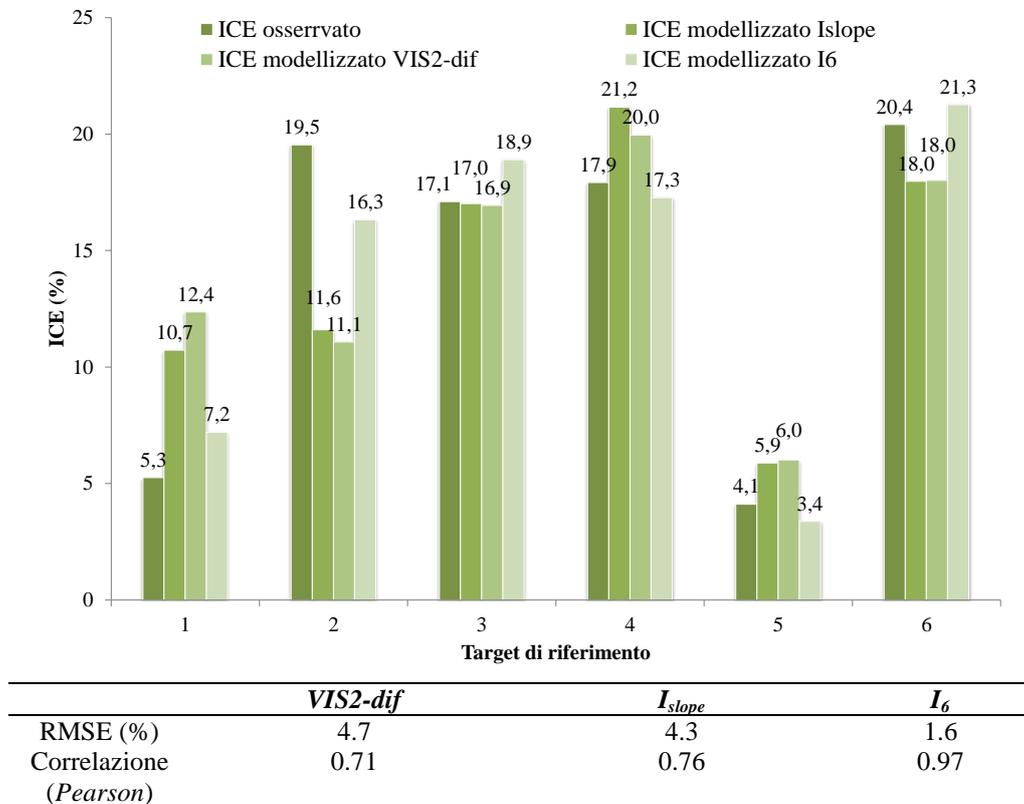


Figura 6.1-9: Confronto tra i valori di ICE modellati tramite i diversi indici utilizzati e quelli ottenuti tramite l'elaborazione di dati in campo e relativi valori di RMSE e coefficienti di correlazione.

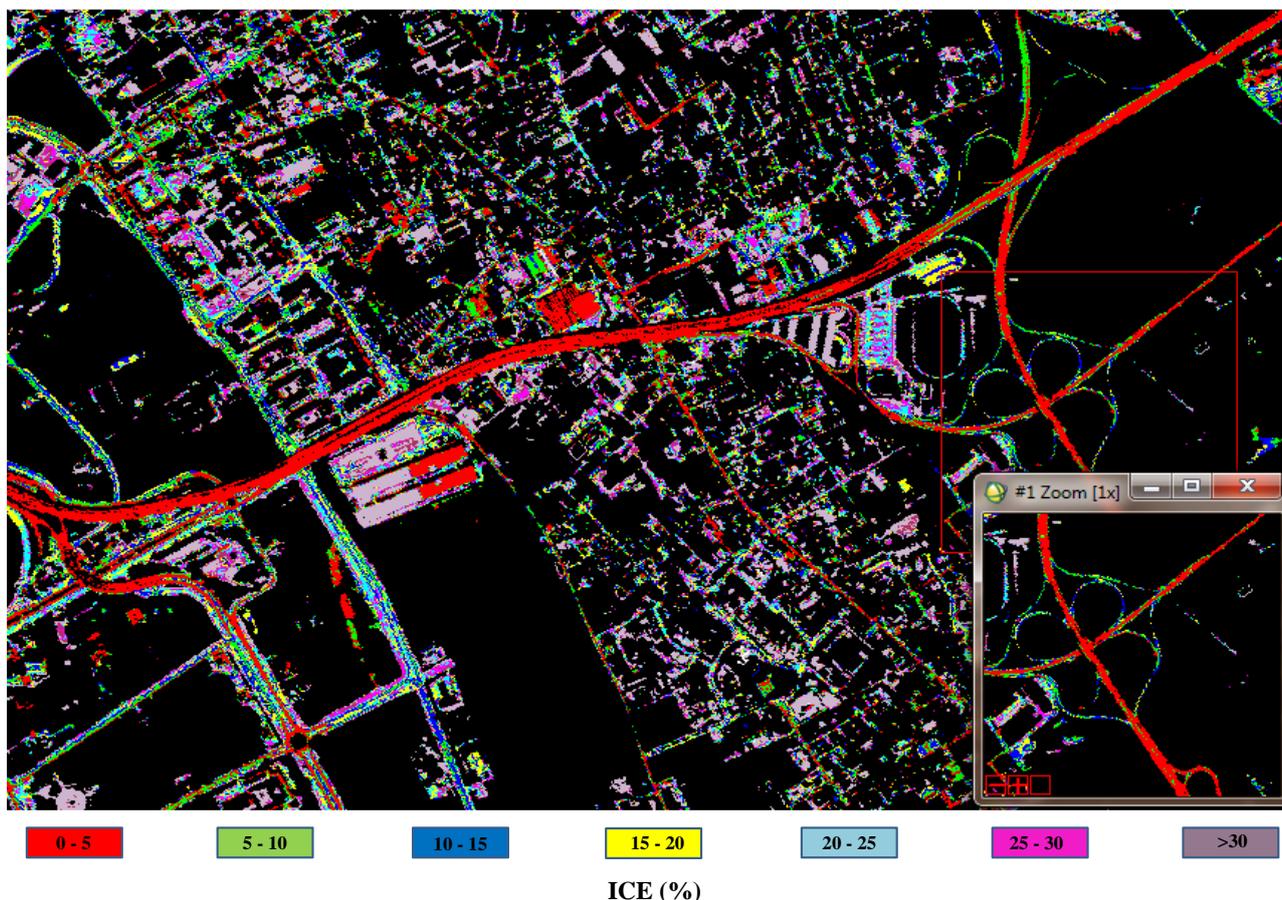


Figura 6.1-10: Mappa ICE ottenuta mediante il calcolo dell'indice  $I_c$ .

L'interesse crescente per il monitoraggio delle aree urbane tramite l'utilizzo di immagini riprese da sensori remoti ha sollecitato lo studio delle caratteristiche radiometriche delle superfici asfaltate in quanto queste rappresentano uno degli elementi di maggior interesse per la gestione e il monitoraggio della rete stradale. A causa della loro bassissima riflettività gli asfalti sono infatti facilmente individuabili sulle immagini ma, al tempo stesso, è difficile discriminarne la tipologia e di conseguenza lo stato di conservazione.

Riassumendo quanto esposto precedentemente si può asserire che a causa dei processi di deterioramento, i conglomerati bituminosi presentano una perdita del bitume in superficie. Analizzando le firme spettrali di tali superfici la riduzione del bitume superficiale, accompagnata dall'esposizione degli inerti, si manifesta in modo marcato alle lunghezze d'onda del visibile con un aumento di valori di riflettanza e con l'apparizione di picchi di assorbimento caratteristici degli inerti. Confrontando l'analisi di valori di RGB estratti da fotografie digitali acquisite in maniera standardizzata con i valori derivanti dalle elaborazione dei dati MIVIS, si è voluto ottenere una quantificazione dell'esposizione dei clasti producendo una mappa dell'Indice dei Clasti Esposti. Attraverso l'utilizzo delle immagini MIVIS è stato possibile verificare la possibilità di estendere su larga scala le elaborazioni effettuate sia in laboratorio che in campo per stimare la perdita di bitume superficiale delle pavimentazioni stradali costituite da conglomerati bituminosi. Nello svolgimento di questa procedura, la possibilità di disporre di un numero rilevante di misure radiometriche di campo, correlate con le osservazioni sulla composizione e sullo stato di conservazione delle superfici asfaltate, è stata fondamentale per definire diverse classi di asfalto da riconoscere sulle immagini.

Sebbene i risultati ottenuti possono essere ritenuti validi, è evidente di come la risoluzione delle immagini MIVIS utilizzate, possa non essere considerata ottimale per misurare nel dettaglio tali parametri, soprattutto in relazione alle dimensioni medie della rete viaria. In effetti, quest'ultimo fattore porta ad avere dei pixel misti all'interno dei quali vengono "miscelate" i contributi radiometrici di superfici diverse, come i bordi delle strade, alberi, autovetture ecc.. In aggiunta, le relazioni tra dato remoto e stato di ammaloramento delle pavimentazioni non sembra essere rilevabile con risoluzioni dell'ordine dei 3 o 4 metri/pixel. Tuttavia alcuni nuovi sensori satellitari possiedono caratteristiche interessanti dal punto di vista della risoluzione spaziale sebbene abbiano di contro una minore risoluzione spettrale e radiometrica.

## 6.2 VALUTAZIONE DELL'AMMALORAMENTO STRADALE TRAMITE DATI SATELLITARI AD ALTA RISOLUZIONE

Negli ultimi anni la comunità scientifica ha rivolto particolare interesse ai sensori ad altissima risoluzione. Le novità introdotte da questi strumenti risiedono principalmente nell'aver reso commerciali, quindi disponibili per uso civile, dati satellitari con capacità di osservazione inferiore al metro. A differenza di quanto previsto per altri satelliti e le foto aeree tradizionali, le immagini WORLDVIEW-3 coprono un intervallo spettrale che oltre al visibile include l'infrarosso vicino e medio garantendo maggiori potenzialità nell'identificazione di elementi territoriali. L'alta risoluzione dei dati satellitari di nuova generazione può inoltre garantire una continuità di analisi spaziale sia grazie ai tempi di rivisitazione generalmente bassi, nonché mediante l'utilizzo dei dati telerilevati storici come quelli ripresi con tecniche fotogrammetriche classiche.

### 6.2.1 Pre-processing radiometrico

Per questa sperimentazione è stata utilizzata un'immagine WORLDVIEW-3 ad alta risoluzione al fine di estrarre informazioni circa lo stato di ammaloramento delle pavimentazioni ubicate all'interno dell'area di studio situata nei pressi di Passo Corese (Provincia di Rieti) (vedi Capitolo 5.2).

Il sensore, lanciato in orbita nel 2014, che opera ad una altitudine di 617km, è in grado di avere dei tempi di rivisitazione dell'ordine di 1-2 giorni e di acquisire aree di 680.000 km<sup>2</sup> al giorno. Il sensore fornisce una risoluzione variabile in funzione del *range* spettrale considerato. Nel complesso le risoluzioni sono, al nadir, di 31cm nel pancromatico, 1.24m nel multispettrale, 3.7m nello SWIR e 30m nel CAVIS. Dato il tipo di applicazione, e quindi considerando l'elevata importanza della risoluzione spaziale del dato satellitare, è stata acquisita un'immagine composta della banda pancromantica, ad altissima risoluzione, e dalle 8 bande multispettrali.

Il dataset è composto quindi dalle immagini riportate nella tabella 6.2-1 che illustra le caratteristiche di ogni singola banda.

Tabella 6.2-1: Caratteristiche WORLDVIEW-3

Range spettrale	Numero banda	Nome banda	Intervallo spettrale (nm)	Centro banda	Risoluzione Nadir (m)	Risoluzione 20° off-Nadir (m)
Pancromatico	pan	pan	450-800		0.31	0.34
	1	Coastal	400-450	425		
	2	Blu	450-510	480		
VNIR	3	Verde	510-580	535	1.24	1.38
	4	Giallo	585-625	605		
	5	Rosso	630-690	660		
	6	Red-Edge	705-745	725		
	7	Near-IR1	770-895	832		
	8	Near-IR2	860-1040	950		

L'immagine, in formato GEO-TIFF è di dimensione 4097 colonne x 4554 righe, ed è stata georiferita nel sistema di riferimento WGS84-UTM, 33N. La data di acquisizione risale al 29/04/2016, e la copertura nuvolosa nella scena indagata è pari allo 0%.

Nel periodo immediatamente successivo alla data di acquisizione dell'immagine satellitare è stata effettuata una campagna di validazione del dato satellitare mediante l'acquisizione di dati sia spettrali che fotografici al fine di poterli confrontare con i dati satellitari. Successivamente, nei mesi di luglio, settembre ed ottobre, sono state effettuate nuove acquisizioni al terreno anche grazie all'ausilio del RAAS. I dati di campo acquisiti nell'area situata nei pressi di Passo Corese (Provincia di Rieti), illustrati nel Capitolo 5.2, sono stati organizzati in un geo-database comprendente dati fotografici, caratteristiche delle superfici e caratteristiche spettrali. E' stata quindi costruita una libreria di firme spettrali da 350nm a 2500nm mediando le firme spettrali di ogni tipologia di pavimentazione (figura 6.2-1). Tale libreria è stata successivamente ricampionata secondo le caratteristiche spettrali del sensore WORLDVIEW-3 utilizzato (figura 6.2-3).

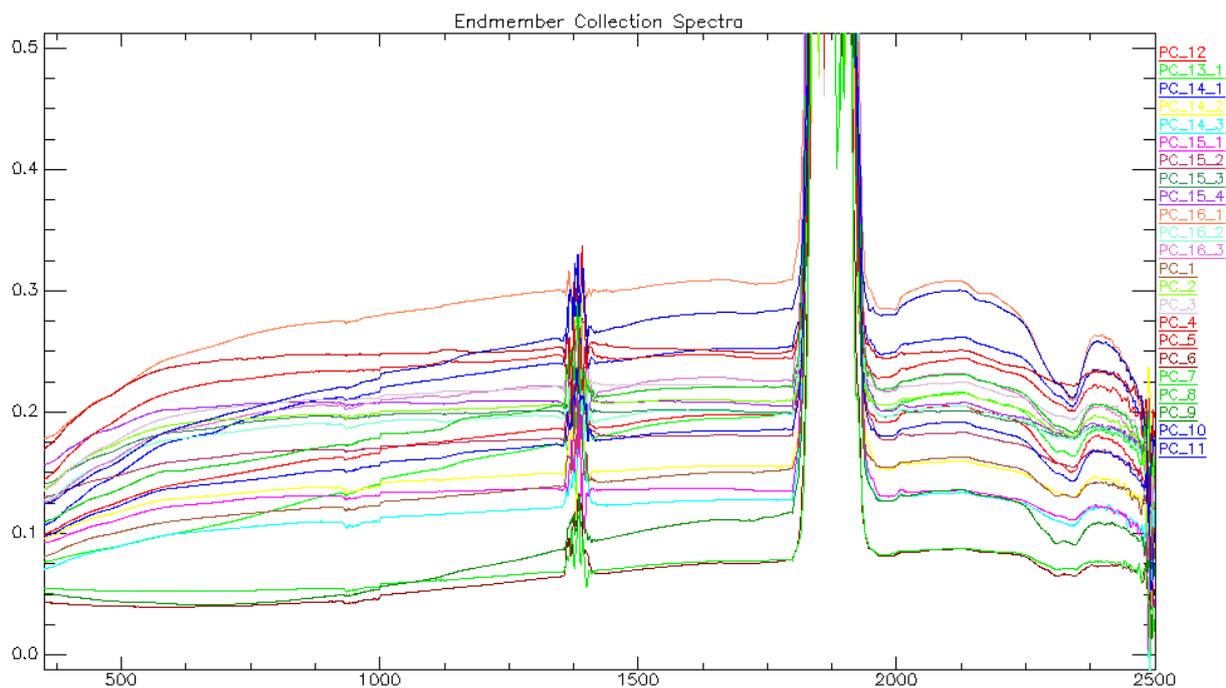


Figura 6.2-1: Libreria spettrale nel range 350nm-2500nm

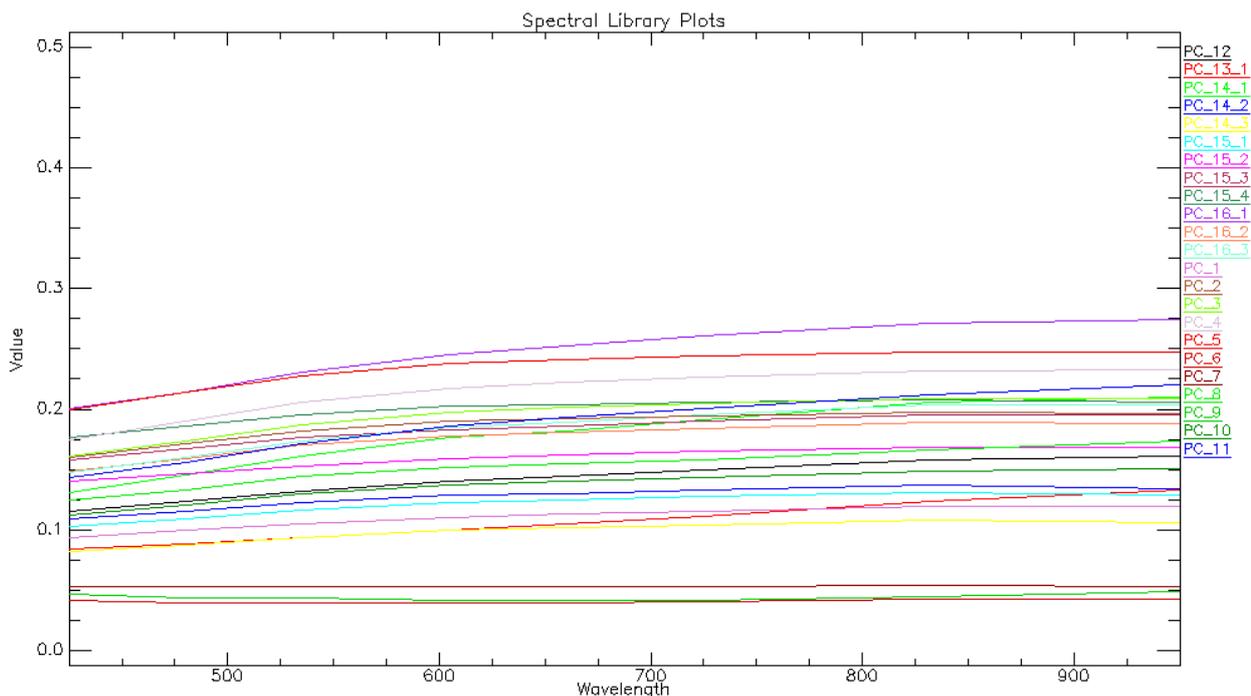


Figura 6.2-2: Libreria spettrale nel range 450nm-950nm

Come già visto nel Capitolo 6.1, per elaborare in modo corretto le immagini telerilevate è stata necessaria una fase di pre-elaborazione attraverso la correzione atmosferica. I diversi contributi radiometrici che vengono acquisiti dal sensore, suddivisi in una componente legata alla radianza riflessa dalla superficie terrestre e una legata alla radianza dall'atmosfera retro-diffusa, possono essere stimati mediante l'applicazione di modelli analitici di trasferimento radiativo che si basano principalmente sui processi di diffusione e di assorbimento dei gas atmosferici.

Prima di procedere alla correzione atmosferica, l'immagine è stata calibrata in valori di radianza al sensore espressi in  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{mm})$  utilizzando le *calibration utilities* presenti all'interno del software ENVI® 5.3. Per la correzione atmosferica dell'immagine in questo studio è stato utilizzato il codice di trasferimento radiativo MODTRAN (Berk et al., 1989, Adler-Golden, 1999), implementato sotto ENVI® nel plug-in FLAASH. Per l'applicazione della correzione atmosferica devono essere introdotti alcuni

parametri chiave acquisiti in campo quali l'umidità relativa, concentrazione di aerosol, temperatura, pressione. Non essendo stata eseguita una campagna ad *hoc* per il *retrieval* di tali parametri, per il processo di correzione atmosferica si è fatto uso di simulazione di modelli climatici in base a latitudine e stagione. Altri parametri fondamentali sono relativi alle caratteristiche del sensore, quota e data di acquisizione e angolo di osservazione.

Per l'applicazione del codice di correzione atmosferica sono stati impostati i valori di modello atmosferico come "Mid-Latitude Summer" (vapore acqueo =  $2.92 \text{ g/cm}^2$ ) in condizione di *weather conditon* "Clear Sky", mentre il modello di aerosol è stato impostato come "rurale" data la situazione prevalentemente di territorio ad uso agricolo. La quota media derivata dal DEM è stata imposta a 0.5km.



Figura 6.2-3 Immagine originale (sinistra) ed immagine corretta atmosfericamente (destra)

L'immagine è stata infine scalata in valori compresi tra 0 e 1 utilizzando in linguaggio IDL al fine di poter essere confrontati con i dati di campo ricampionati. L'immagine corretta è riportata in figura 6.2-3

dove a destra si può osservare l'immagine in valori di riflettanza con valori compresi tra 0 e 1 (reflectance\_wv3\_01) mentre a sinistra l'immagine di origine (16APR29103204-...).

La localizzazione dei punti acquisiti in campo è avvenuta tramite l'utilizzo combinato di un GPS GARMIN etrex e di un distanziometro laser DISTO A8 i quali, una volta localizzati sull'immagine, sono stati acquisiti al fine di estrarre una seconda libreria di firme spettrali. Le coordinate GPS hanno permesso una prima rapida localizzazione dei pixel da cui estrarre le firme spettrali all'interno della scena con una precisione di 5/10metri, mentre i rilievi mediante distanziometro hanno permesso il loro posizionamento con una precisione decimetrica e comunque al di sotto della risoluzione spaziale dei pixel dell'immagine pancromatica. Per il rilievo mediante distanziometro sono stati presi come riferimenti elementi fissi individuabili nell'immagine in modo tale da poter essere utilizzati nel posizionamento dei siti di indagine relativi alle firme di campo. I dati radiometrici sono stati confrontati con quelli di campo e hanno portato alla validazione della correzione atmosferica effettuata con un coefficiente di correlazione (Pearson) di 0.94 ed un RMSE di 0.013. L'immagine infine è stata ritagliata per alleggerire il dataset ai fini dell'elaborazione dell'indice spettrale.

### 6.2.2 Elaborazione dell'immagine

Al fine di valutare lo stato di ammaloramento delle pavimentazioni stradali presenti nell'area indagata, è stato utilizzato sia il dato multispettrale che il dato pancromatico WORLDVIEW-3. Nel Capitolo 5.1 l'applicazione di tecniche di *Digital Imaging Processing*, associata a dati spettrali ha prodotto un indice spettrale attraverso il quale è possibile risalire all'Indice dei Clasti Esposti. Si riporta di seguito la relazione dell'indice  $I_6$ :

$$I_6 = \frac{(\lambda_{740nm} * \lambda_{830nm})}{\sqrt{\left(\frac{\lambda_{740nm}}{\lambda_{460nm}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_{830nm}}{\lambda_{490nm}}\right)^2}}$$

L'equazione  $I_6$  è stata applicata nell'applicativo *band math* di ENVI per il computo dell'indice sul dato multispettrale. Come già accennato nel Capitolo 5.1 le bande della WORLVIEW-3 da associare sono: la banda b2 (blu) per  $\lambda = 460$  nm e  $\lambda = 490$  nm, la banda b6 (Red Edge) per  $\lambda = 740$  nm e la banda b7 (Near IR1) per  $\lambda = 830$  nm.

Nella figura 6.2-4a si riporta invece l'immagine in scala di grigi con sovrainposti i 5 transetti spettrali effettuati in corrispondenza dei dati acquisiti in campo, per confrontare per il loro effettivo stato di ammaloramento. I transetti sono così composti: il *Transetto a* comprende i siti PC\_14, PC\_15 e PC\_16, il *Transetto b* comprende i siti PC\_10 e PC\_11, il *Transetto c* comprende il sito PC\_13, il *Transetto d* comprende i siti PC\_1, PC\_2, PC\_3, PC\_4 e PC\_5 ed infine il *Transetto e* comprende il sito PC\_15. In figura 6.2-4b viene riportata la classificazione ottenuta con i dettagli di alcuni settori. In tabella 6.2-2 vengono riportati i transetti con le caratteristiche dei siti.

Tabella 6.2-2 Transetti e loro caratteristiche

<b>Transetto</b>	<b>Sito</b>	<b>Strato</b>	<b>Ammaloramento pavimentazione</b>
$T_a$	PC_14	Usura	Nessuna - vecchia
	PC_15	Usura	15_4: Fessurazione
	PC_16	Usura	16_1:Fessurazione, 16_2:Toppe, 16_3: Buche profonde
$T_b$	PC_10	Usura	Nessuna - vecchia
	PC_11	Binder	-
$T_c$	PC_13_1	Usura	Nessuna - recente
	PC_13_2	Usura	Sgranamento - recente
$T_d$	PC_1	Usura	Nessuna - nuova
	PC_2	Usura	Arrotondamento aggregati
	PC_3	Usura	Fessurazione ramificata
	PC_4	Usura	Sgranamento lieve
$T_e$	PC_15	Usura	15_1:Fessurazione ramificata profonda, 15_2: Sgranamento lieve, e 15_3: Nessuna,

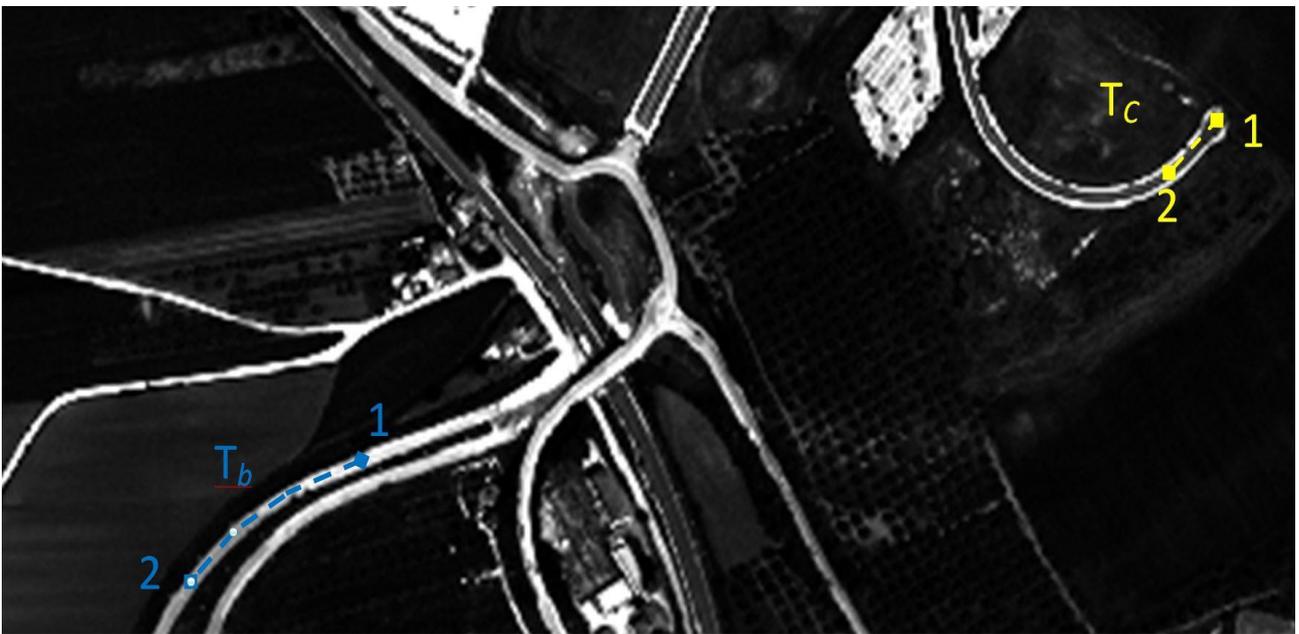
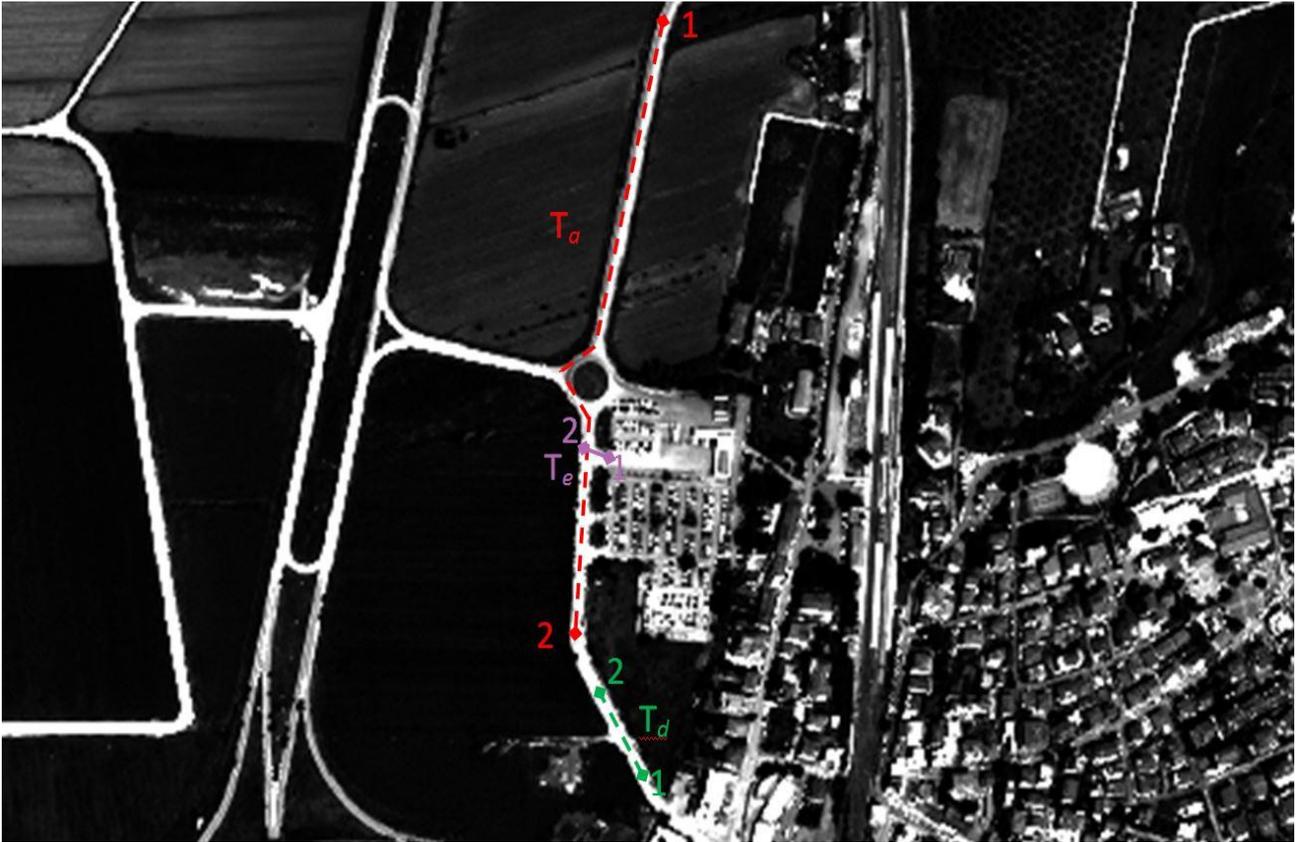


Figura 6.2-4a: Localizzazione dei transetti sull'immagine in scala di grigi

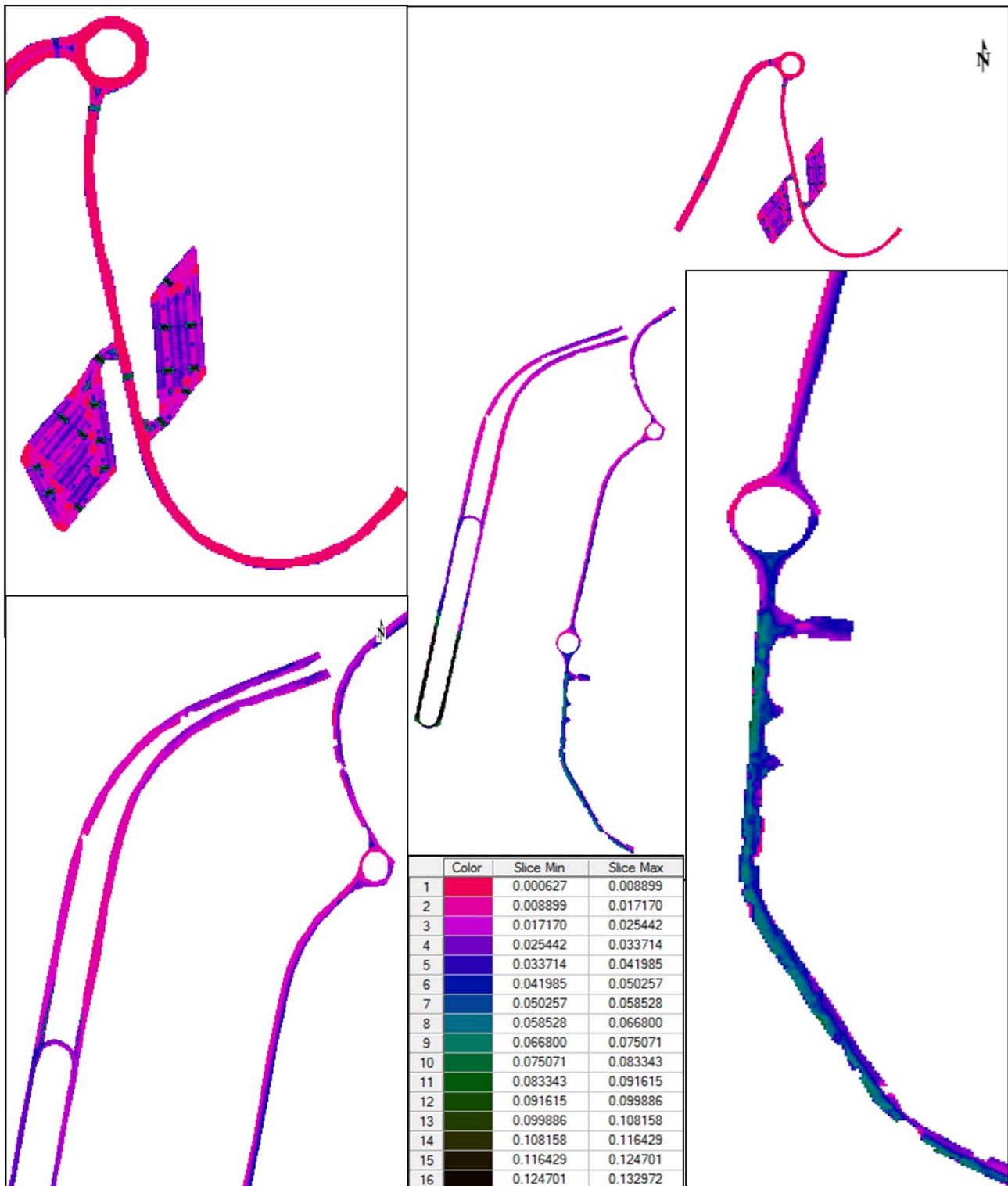


Figura 6.2-4b: Estrazione del reticolo stradale dalla classificazione dell'immagine multispettrale mediante indice  $I_6$ .

I transetti sono stati ubicati in funzione delle peculiarità riscontrate durante i rilievi di campo in modo da avere una casistica più ampia possibile. Tali sezioni riprendono in parte o totalmente, i transetti eseguiti con il rover; in alcuni casi sono stati effettuati confronti tra le immagini e i dati ottenuti con il rover.

Nelle seguenti figure vengono riportati i transetti sopra indicati dove nell'asse delle ordinate è rappresentato l'indice  $I_6$  mentre nelle ascisse i metri. I transetto è di distanza diversa e comunque compresa da un minimo di 5m per il transetto  $T_d$  ad un massimo di 450m per il transetto  $T_a$ . Tali curve sono state trattate con un processo di *smoothing* per facilitarne la lettura, anche se il dato grezzo descrive anche le piccole e differenze, soprattutto quelle locali.

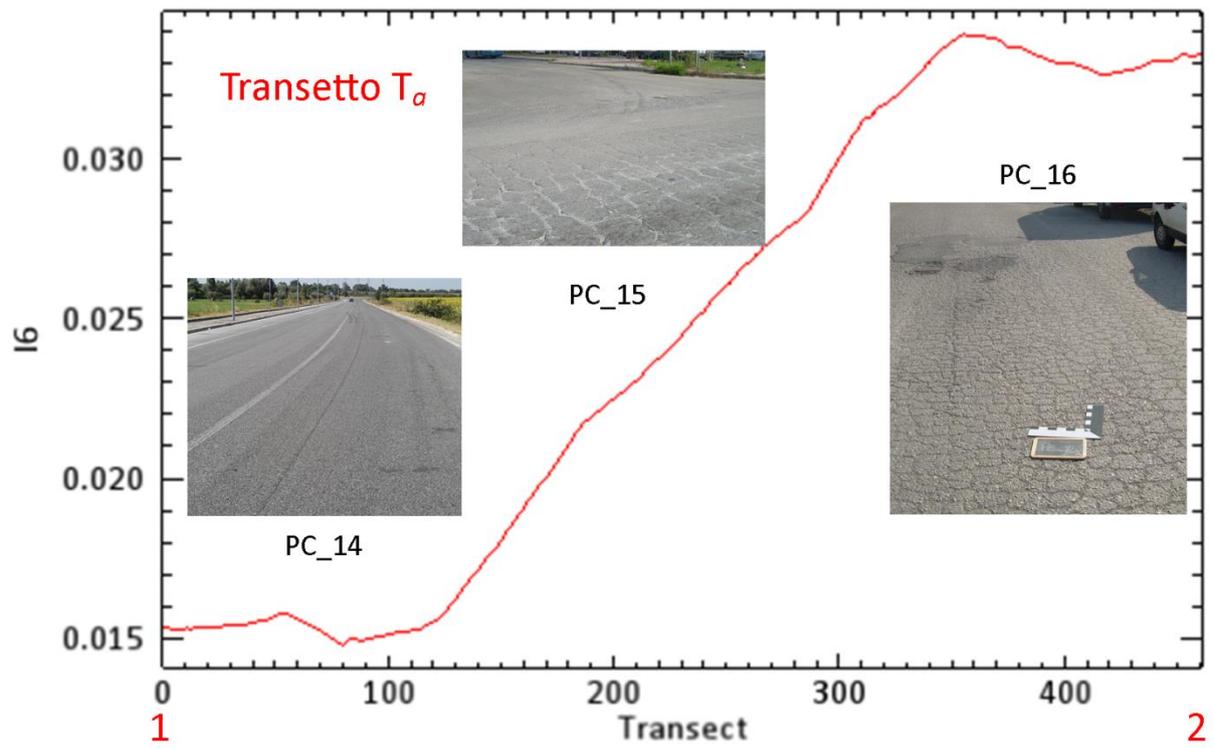


Figura 6.2-5 Transetto T<sub>a</sub>

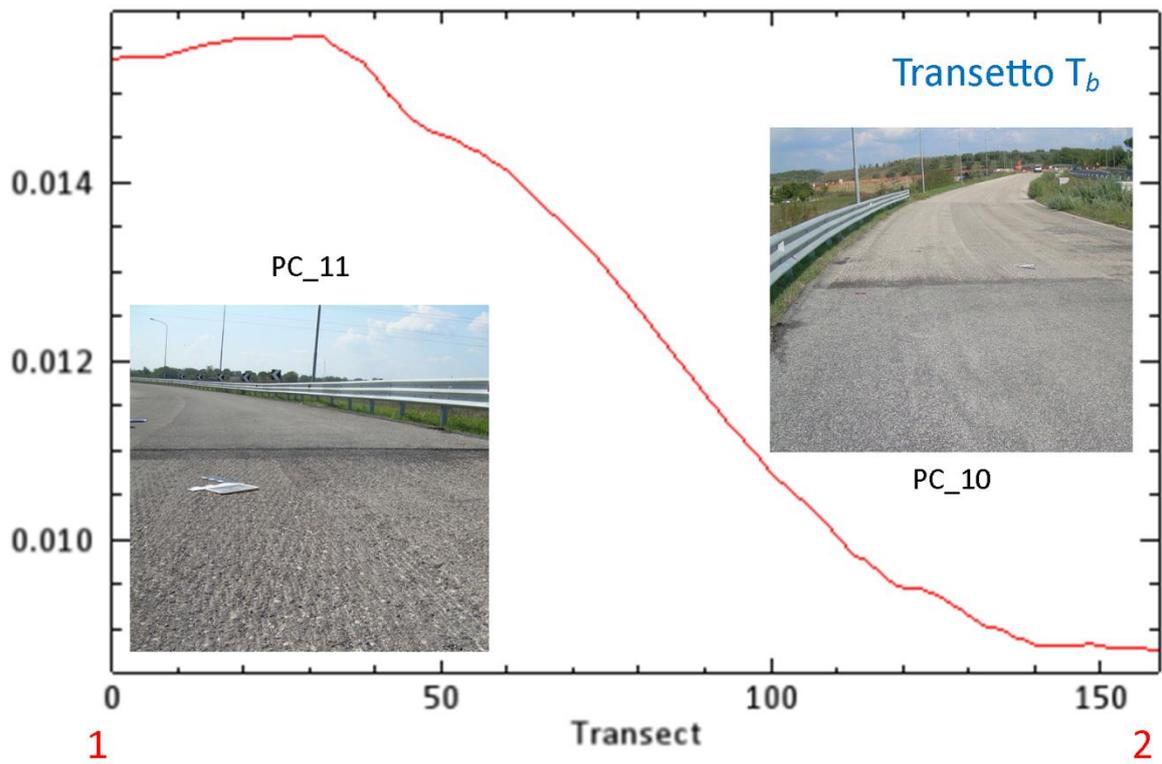


Figura 6.2-6 Transetto T<sub>b</sub>

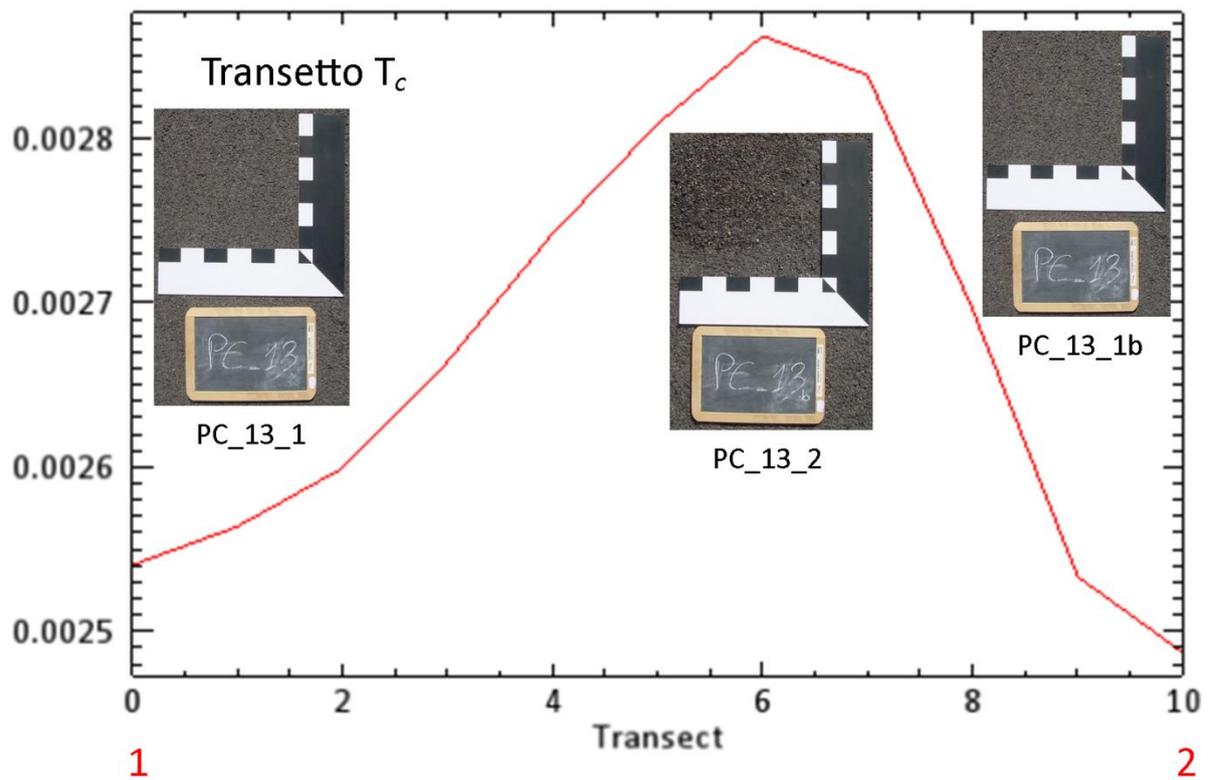


Figura 6.2-7 Transetto  $T_c$

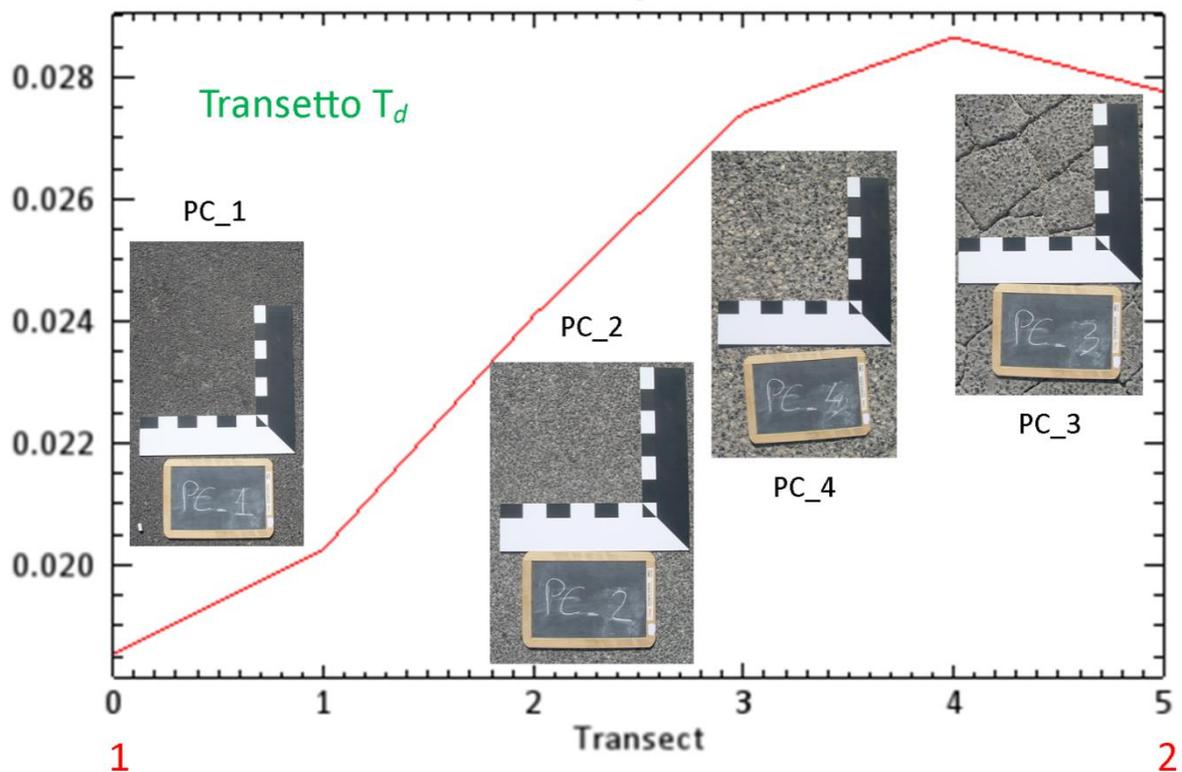


Figura 6.2-8 Transetto  $T_d$

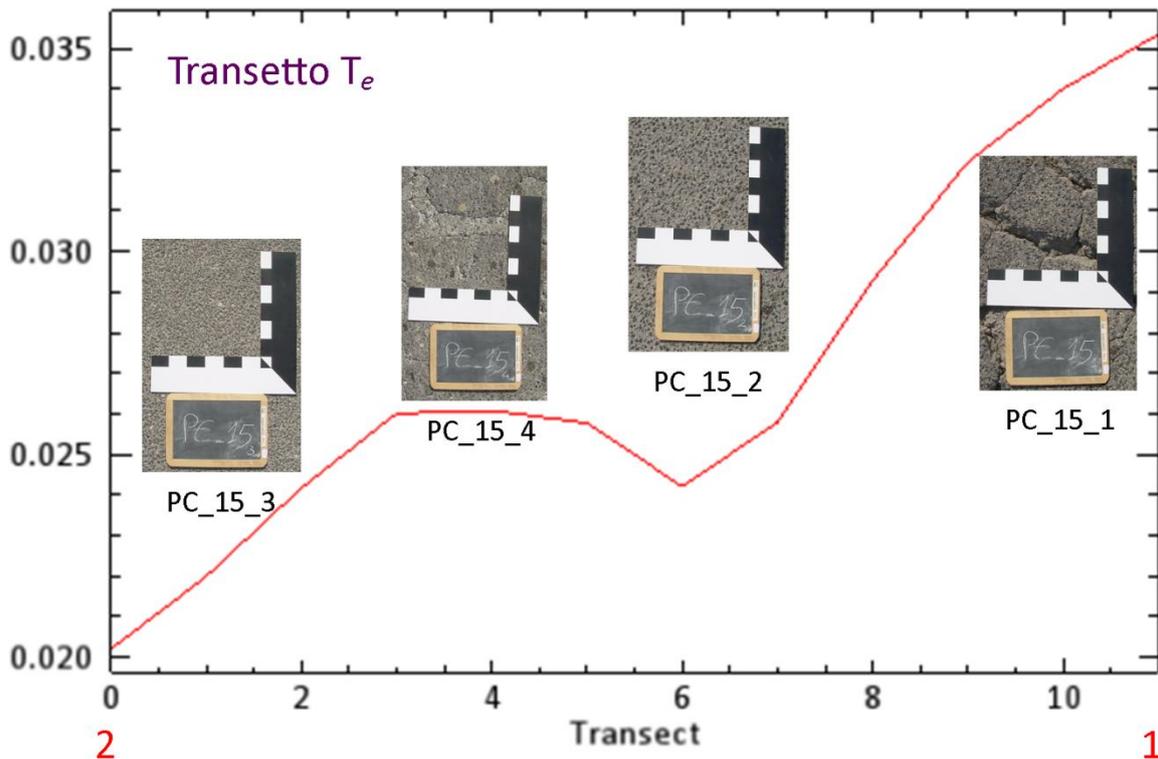


Figura 6.2-9 Transetto T<sub>e</sub>

In tutti i transetti è evidente come l'andamento dell'indice calcolato partendo dai dati telerilevati seguano l'evoluzione dello stato di ammaloramento delle pavimentazioni indagate. In particolare nel transetto T<sub>a</sub> i valori partono da 0.015 per pavimentazioni in ottimo stato e prive di ammaloramenti per salire a valori maggiori di 0.030 per pavimentazioni molto usurate con presenza di buche. Notare il brusco stacco che si incontra al contatto tra pavimentazione non usurata e pavimentazione poco usurata nei pressi del centodecimo metro. Nel transetto T<sub>b</sub> invece è possibile notare lo stacco netto al metro 35 dovuto al passaggio da una pavimentazione costituita da binder ad uno strato di usura non ammalorato. Nel transetto T<sub>c</sub> invece è interessante osservare come, per una pavimentazione di recentissima stesa ed ancora non aperta al traffico, il passaggio del transetto in un'area che è stata soggetta a sgranamento locale, sia ben identificata con un picco ad 0.0029 circa rispetto ai 0.0025 delle corrispettive pavimentazioni sane. Nel transetto T<sub>d</sub> è ben osservabile, sebbene la limitata estensione del transetto, il passaggio da una pavimentazione nuova (ma non recente) ad una intensamente fessurata.

Infine nel transetto T<sub>e</sub> il passaggio su una pavimentazione fessurata ma risaldata con asfalto è ben individuata tra i 3 e i 5 metri del transetto. I valori di I<sub>6</sub> salgono poi rapidamente fino a superare i 0.035 per le pavimentazioni fortemente fessurate con fratture "beanti".

Dopo aver confrontato i dati di campo acquisiti con il RAAS con i valori dell'indice estratti dall'immagine in corrispondenza dei siti selezionati, è stato possibile effettuare una valutazione numerica della bontà del sistema di classificazione. La validazione ha portato all'ottenimento di valori di correlazione pari a 0.97 e di un RMSE pari a 0.005. I risultati ottenuti mostrano una elevata correlazione sia in termini di tipologie di ammaloramenti osservati che in termini di correlazione tra indice spettrale calcolato con dati di campo ed indice calcolato con dati remoti satellitari. In figura 6.2-10 viene riportata la retta di regressione lineare che modella tale correlazione.

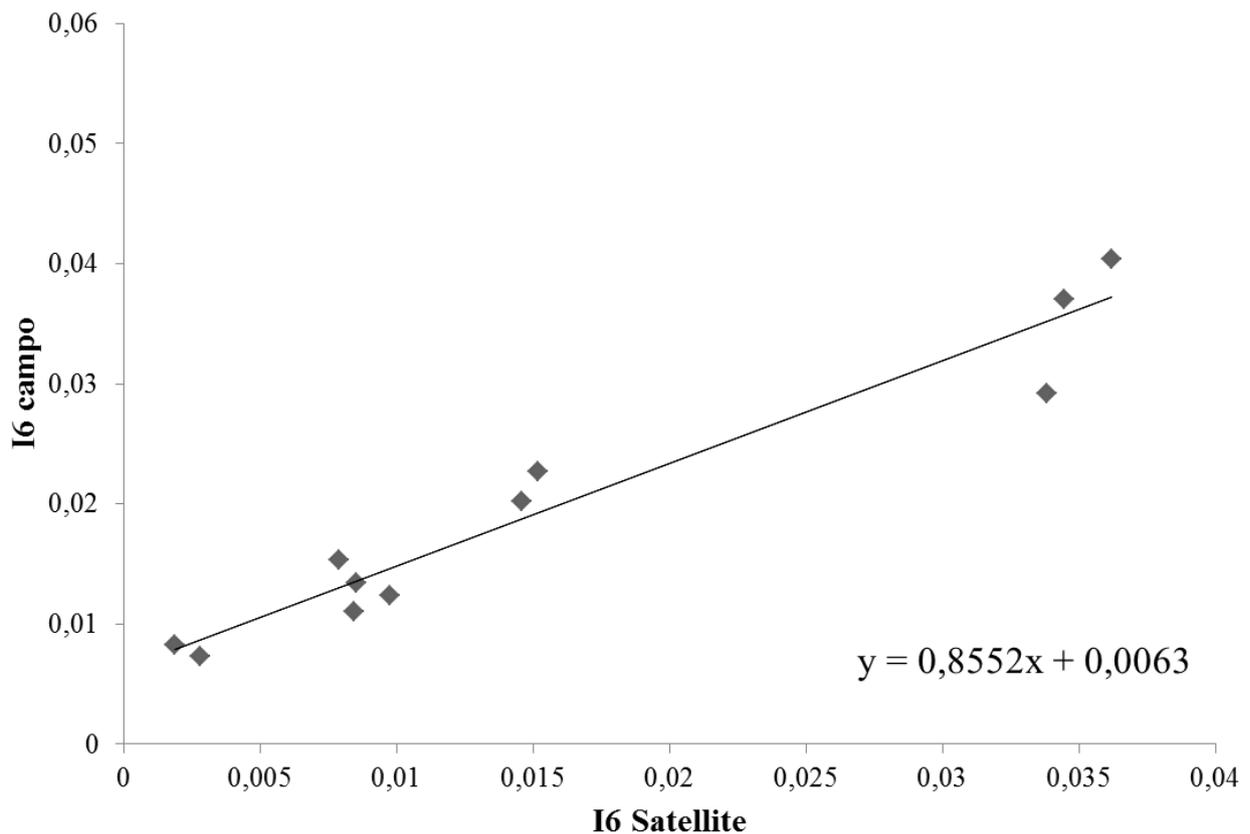


Figura 6.2-10: Correlazione tra indice I6 calcolato a partire dati da satellite e da dati di campo

E' stato infine utilizzato il dato pancromatico ad altissima risoluzione spaziale per la valutare l'identificazione di aree ammalorate. Per fare ciò si è proceduto innanzi tutto alla digitalizzazione del reticolo stradale (figura 6.2-11a) partendo dall'immagine pancromatica. E' stato poi realizzato un grigliato di dimensioni di 1m x 1m su tutta la scena (figura 6.2-11b) affinché all'interno potessero ricadere mediamente una decina di pixel dell'immagine. Il dato vettoriale stradale è stato utilizzato per il ritaglio del grigliato e per il mascheramento dell'immagine (figura 6.2-11c e d). Per fare ciò è stato utilizzato il software open source Quantum GIS. Il grigliato è stato poi ripulito di tutti gli elementi che avessero dimensioni inferiori a 0.1m e ad ogni maglia della griglia sono stati associati dei valori statistici di riferimento tra cui: il valore medio, la deviazione standard dei pixel, il valore massimo e minimo e la varianza.

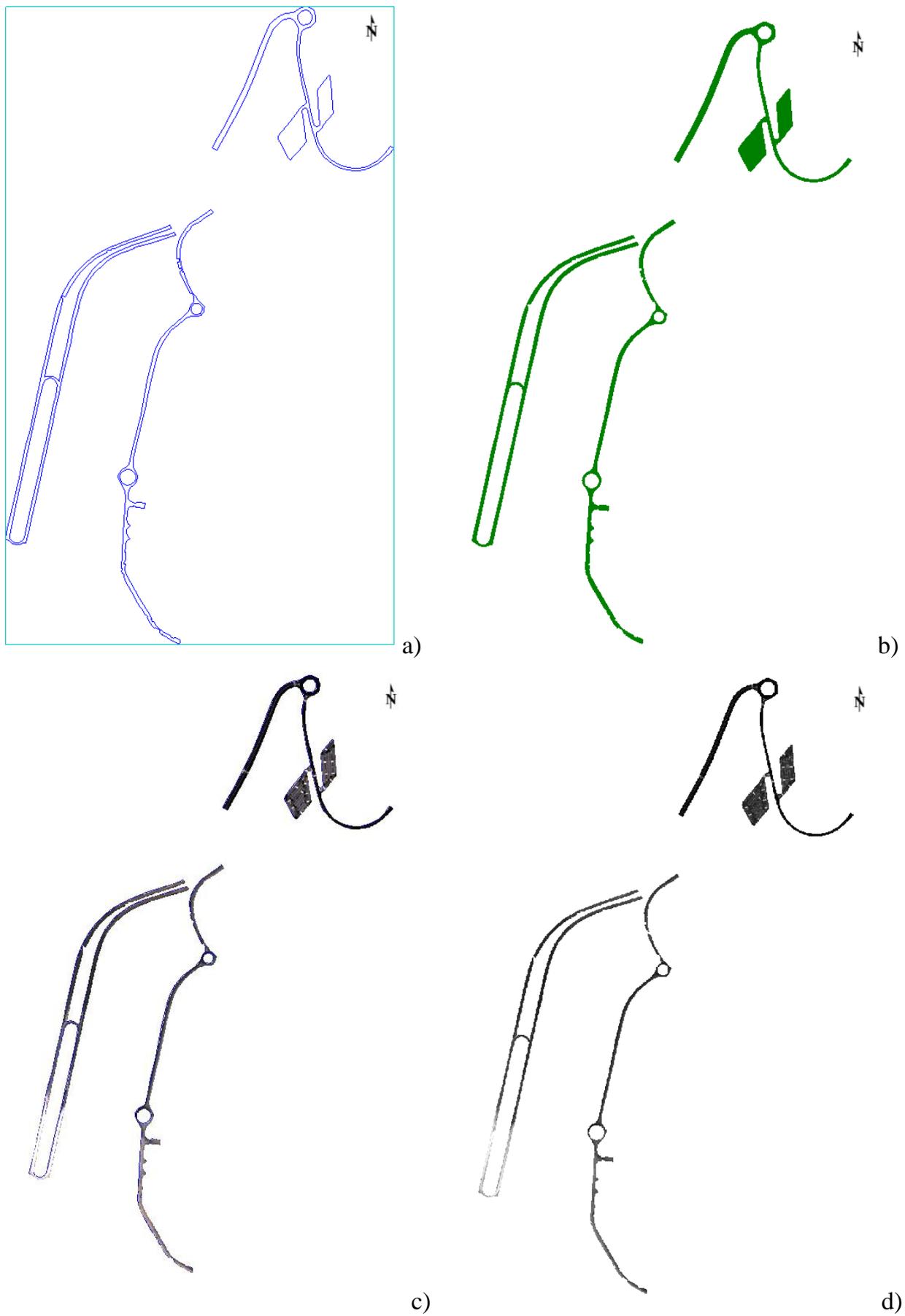


Figura 6.2-11: Shape file del tratto stradale indagato (a), ritaglio griglia in base al dato stradale vettoriale (b), mascheramento dato multispettrale (c) e mascheramento dato pancromatico (d).

In figura 6.2-12 vengono invece riportati alcuni dettagli di quanto esposto. In particolare nella figura 6.2-12a la sovrapposizione del grigliato sul ritaglio dell'immagine pancromatica e in figura 6.2-12b il dettaglio di un tratto di asse stradale affetto da diversi tipi di ammaloramenti e da una zona non ammalorata. In figura 6.2-12c e d vengono invece proposti rispettivamente un tratto di strada gravemente affetto da varie tipologie di ammaloramenti (PC\_15, PC\_16) e un tratto invece non ammalorato (PC\_14). In quest'ultimo si riesce a notare una tonalità più chiara legata al maggiore transito nella carreggiata di destra rispetto a quella di sinistra inducendo una maggiore rimozione di bitume superficiale e quindi ad una maggiore esposizione degli aggregati costituenti la miscela di conglomerato bituminoso.

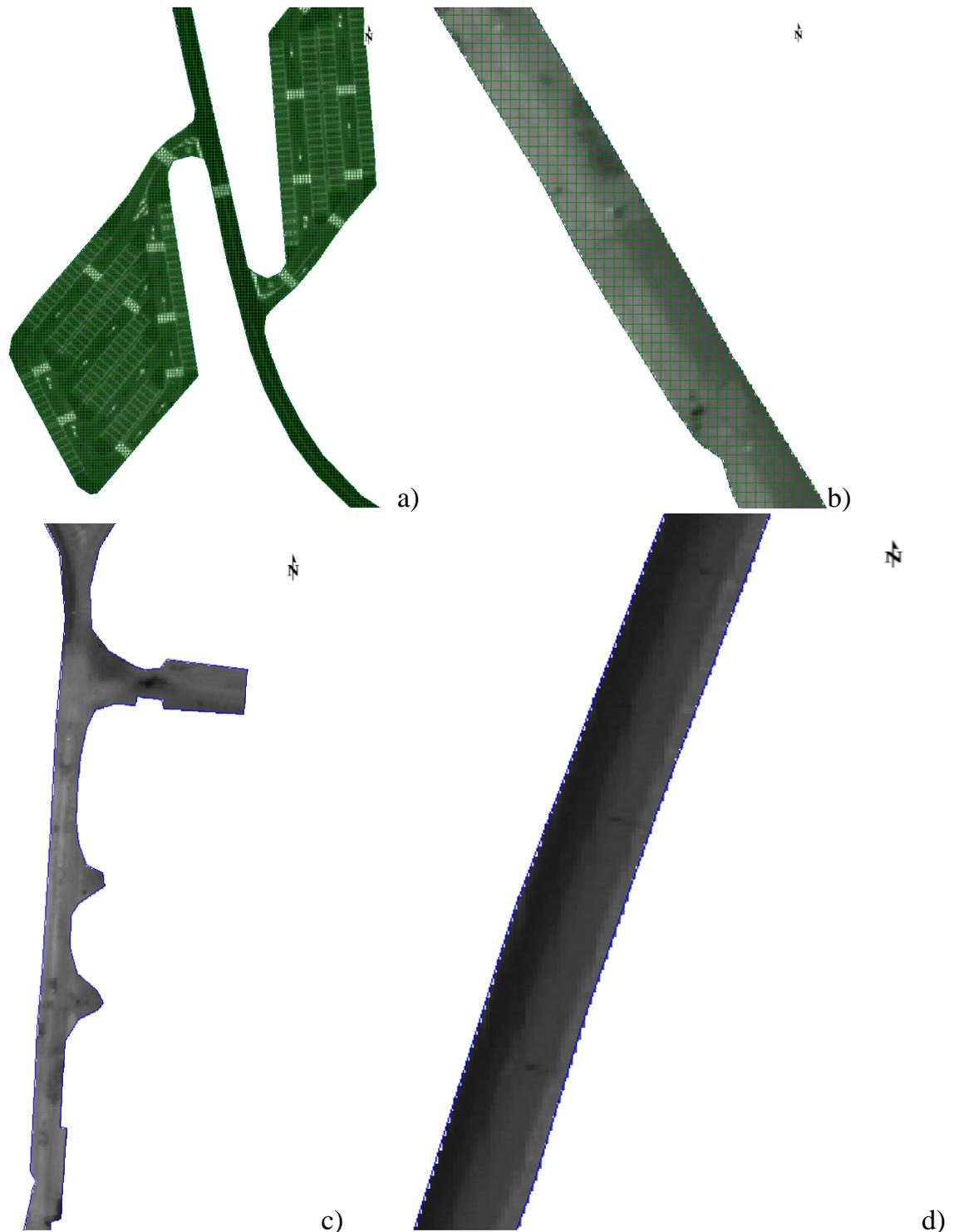


Figura 6.2-12: Sovrapposizione del grigliato all'immagine pancromatica (a) e dettaglio di tratto stradale molto ammalorato (b), esempio di tratto molto ammalorato senza grigliato (c) e non ammalorato (d).

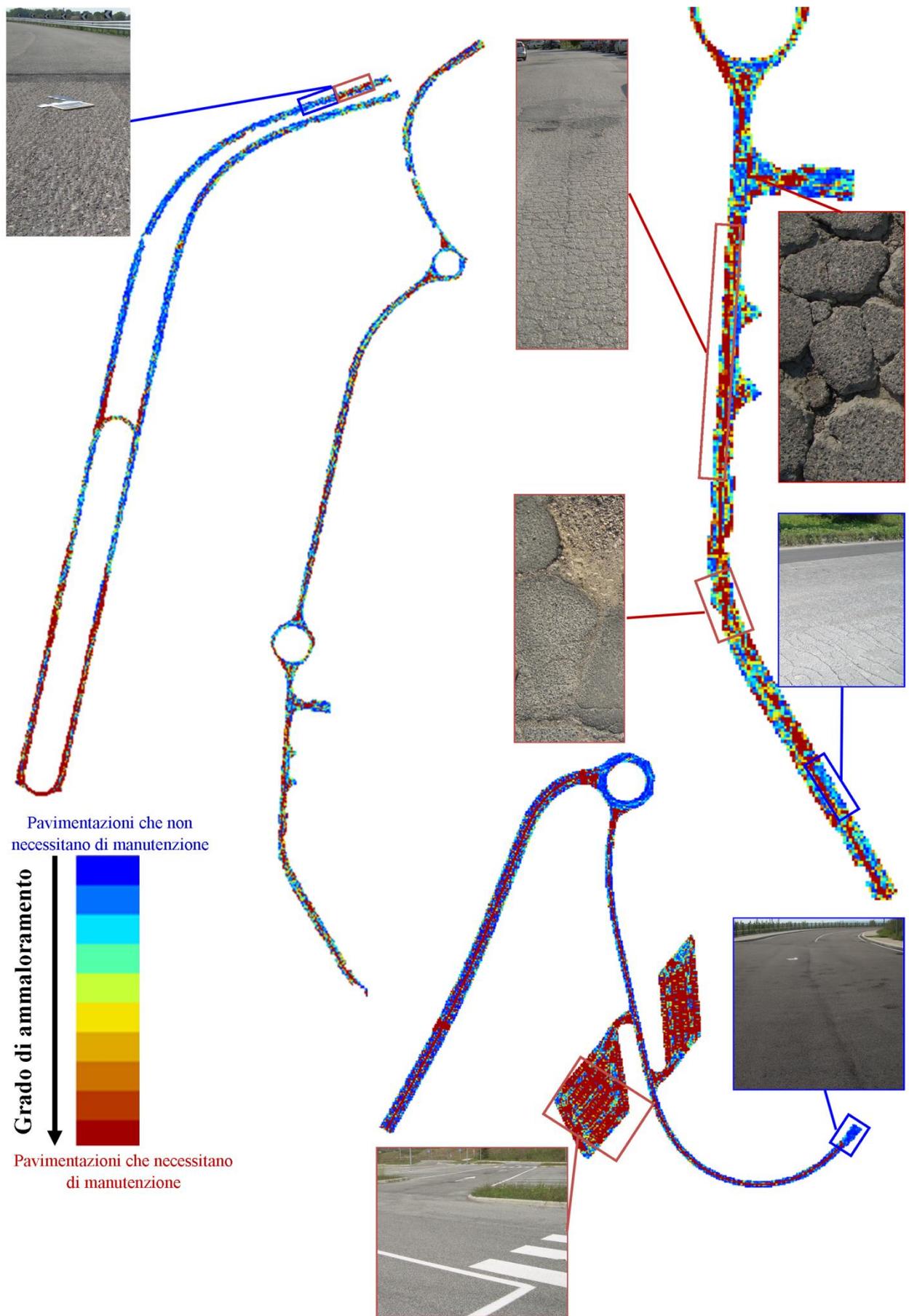


Figura 6.2-13: Mappa della varianza dei dati relative al pancromatico

Nella figura 6.2-13 viene riportata la mappa delle varianze dei valori mediati per ogni cella al fine di poter meglio evidenziare il passaggio tra i diversi pixel di 1 metro per 1 metro. Come è possibile osservare le aree con pavimentazioni nuove o vecchie ma non ammalorate, riportate in tonalità del blu, sono principalmente ubicate nell'area industriale a nord della scena (pavimentata da poco e ancora non soggetta a traffico locale) e lungo i due assi principali stradali ad ovest (tratto di strada chiuso al traffico) mentre le aree maggiormente dissestate sono riferibili al settore sud dove si evidenzia una maggiore presenza delle tonalità del rosso. Da sottolineare che, nel computo dell'eterogeneità delle superfici, rientrano in questa categoria anche le aree di parcheggio a nord della scena e allo svincolo a sud-ovest in quanto influiscono rispettivamente la componente relativa alle strisce orizzontali e la presenza di una patina biancastra lasciata dal traffico di camion che escono da una cava di inerti. Da notare come sia molto evidente, nel tratto a nord, la linea di mezzeria e le linee di sorpasso di entrambe le carreggiate evidenziate in rosso (alta varianza) rispetto alle pavimentazioni senza segnaletica che costituiscono le carreggiate con asfalto in ottima condizione (blu). Tale problematica può essere agevolmente risolta applicando delle maschere selettive già a partire dall'analisi degli *scatter plot*.

Data l'elevata risoluzione spaziale del dato pancromatico è quindi possibile ottenere per ogni maglia della griglia un valore di deviazione standard e di varianza in grado di evidenziare la propria omogeneità spettrale. In tal modo è possibile valutare il passaggio tra maglie appartenenti a classi diverse. Tale dato riesce quindi a identificare le aree ammalorate, che avrebbero necessità di un intervento, da quelle sane.

Al fine di validare questa elaborazione è stato effettuato un processo di *pan-sharpening* tra dato pancromatico ad altissima risoluzione spaziale e il dato multispettrale a risoluzione spaziale ridotta. Questo ha permesso di ottenere una immagine a colori reali alla risoluzione spaziale sub-metrica. Tale immagine è stata analizzata da un punto foto-interpretativo, anche con l'ausilio degli innumerevoli dati di campo, al fine di creare un file vettoriale comprendente le diverse classi di ammaloramento. Tale dato è stato infine sovrapposto alla mappa elaborata da satellite e i risultati sono stati confrontati. Così facendo si è potuto quantificare la bontà del sistema adottato che ha portato all'ottenimento di un coefficiente di correlazione dello 0.98.

L'integrazione tra le mappe di varianza dei valori radiometrici estratti dal dato pancromatico, il dato classificato mediante l'indice  $I_6$ , unito alla creazione di una mappa di *pan-sharpening* tra dato pancromatico e multispettrale sembra poter individuare con esattezza le aree ammalorate ma anche definirne il tipo di ammaloramento qualora presente. L'utilizzo del sensore WORLDVIEW-3 sembra pertanto essere adatto a tale scopo.

## CONCLUSIONI

Le superfici asfaltate costituiscono una porzione importante delle aree urbanizzate e grazie alle loro caratteristiche radiometriche e alle loro peculiarità geometriche sono facilmente riconoscibili dalle immagini telerilevate. L'interesse crescente per il monitoraggio delle infrastrutture tramite l'utilizzo di sistemi di telerilevamento ha dato spunto per lo studio delle caratteristiche radiometriche dei conglomerati bituminosi a scale differenti che è stato oggetto di questa Tesi. La possibilità di caratterizzare tali superfici in funzione della loro composizione chimico-fisica e delle loro condizioni di usura rappresenta, tutt'ora, un obiettivo da raggiungere. Tra i principali obiettivi delle amministrazioni locali in materia di gestione delle infrastrutture viarie vi è quello di istituire e tenere aggiornata una cartografia stradale al fine di garantire gli standard di sicurezza. Attualmente il monitoraggio dell'intera rete stradale è desumibile da rilievi a terra, indispensabili per valutare il livello di degrado e definire un coefficiente di priorità di intervento. In questo ambito l'utilizzo di sistemi di telerilevamento, come l'adozione di immagini satellitari, può costituire una alternativa e/o una valida integrazione a tali studi, poiché utilizzando tali dati vi è la concreta possibilità di estrapolare in tempi brevi informazioni circa il deterioramento del manto stradale.

L'applicazione dei sistemi di telerilevamento alle problematiche relative alle infrastrutture viarie è un ambito di studio relativamente giovane ma che in pochi anni ha rapidamente guadagnato un sempre maggiore interesse a livello internazionale. Nell'ambito del *Transportation Equity Act for the 21st Century*, lo *U.S. Department of Transportation* ha stabilito dei programmi di studio (vedi il *Commercial Remote Sensing & Spatial Information Technologies*) per valutare l'utilizzo commerciale dei prodotti del telerilevamento e delle *spatial information technologies* al monitoraggio e costruzione delle infrastrutture nazionali in cooperazione con la NASA ed un consorzio di centri universitari di ricerca.

In tale contesto questo progetto di ricerca si è posto l'obiettivo di studiare le relazioni che intercorrono tra i dati radiometrici e le caratteristiche fisico-chimiche dei materiali costituenti i conglomerati bituminosi, anche in riferimento alle loro alterazioni. Per raggiungere tali risultati si è fatto uso di diversi sistemi di telerilevamento tra cui spettroradiometri puntuali, camere per imaging multispettrali ed iperspettrali, camere ottiche digitali RGB ad altissima risoluzione e di sensori remoti sia multispettrali che iperspettrali, satellitari ed aviotrasportati. I diversi sistemi sono stati utilizzati, ognuno in funzione delle proprie caratteristiche, a diverse scale di osservazione partendo da analisi di laboratorio, di campo e finendo con analisi spaziali a scala locale e regionale. Le indagini di campo hanno previsto anche l'utilizzo di un drone terrestre, appositamente adattato allo studio degli asfalti. L'elaborazione di immagini satellitari ha permesso di applicare le conoscenze acquisite tramite le sperimentazioni effettuate sia in laboratorio che in campo al fine di riconoscere le diverse tipologie di conglomerati bituminosi su una vasta area.

Questo tipo di approccio è in accordo con il crescente interesse della comunità scientifica nello studiare le proprietà ottiche dei conglomerati bituminosi mediante l'utilizzo di sistemi alternativi. In ambito internazionale, l'applicazione di sistemi ottici avanzati alle problematiche descritte è di interesse in molte realtà sia scientifiche che commerciali. Tra queste realtà, il *National Consortium on Remote Sensing in Transportation (University of California, Santa Barbara, USA)*, il *Department of Geography (FSU Jena, Germany)*, il *Center for Transportation Research and Education (Iowa State University, USA)*, il *Laboratory of Remote Sensing, School of Rural and Surveying Engineering (National Technical University of Athens, Greece)*, il *Department of Geomatics, Computer Science and Mathematics (University of Applied Sciences Stuttgart, Germany)* e il *Center for Urban and Environmental Change (Department of Earth and Environmental Systems, Indiana State University, USA)* rappresentano solo alcune delle realtà che hanno negli ultimi anni dedicato l'attenzione, o in alcuni casi fondato la propria linea di ricerca, su tale tematica.

In tale ambito il progetto di ricerca svolto nell'ambito delle attività di dottorato risulta avere una forte valenza innovativa nel campo dell'ingegneria stradale, contribuendo all'avanzamento tecnologico in ambito ingegneristico.

Al fine di provare le potenzialità analitiche dei sistemi di telerilevamento sono state effettuate indagini sugli aggregati e provini di conglomerati bituminosi nonché su campioni relativi a prove di adesione del bitume; tale approccio si è rivelato potenzialmente molto utile, soprattutto considerando che le analisi sulle proprietà dei conglomerati bituminosi vengono eseguite mediante l'utilizzo di tecniche che spesso comportano lunghe tempistiche. Le metodologie di analisi proposte con questo lavoro di ricerca hanno quindi lo scopo di creare delle procedure standardizzate utili ad una razionalizzazione dei tempi di prova e, in alcuni casi, ad un miglioramento del computo analitico.

A partire dall'analisi delle firme spettrali ottenute dai campioni analizzati in laboratorio, è stata messa in evidenza la potenzialità dello spettroradiometro come strumento analitico innovativo e non distruttivo

nell'ambito di indagini in ingegneria stradale di laboratorio. Questa prima parte di studio ha mostrato come sia possibile applicare il rilievo radiometrico allo studio degli aggregati per valutare alcune caratteristiche fisiche come litologia, porosità e condizioni di contenuto d'acqua degli inerti. Inoltre i risultati confermano che i rilievi radiometrici possono essere utilizzati con successo nella verifica della composizione dei conglomerati bituminosi; l'analisi delle firme spettrali consente infatti di distinguere i conglomerati bituminosi utilizzati per l'usura da quelli per il binder, di distinguere il tipo di aggregato utilizzato e di osservare una evidente clusterizzazione dei dati spettrali se si analizza la riflettanza alle lunghezze d'onda 460nm e 740nm. Infine, mediante l'utilizzo del rapporto delle riflettanze relative a queste due lunghezze d'onda, è stato possibile stimare la percentuale di bitume impiegata per variazioni superiori all'1%.

Sulla base di queste considerazioni l'indagine radiometrica può essere considerata un efficace strumento di verifica speditivo già in ambiente di cantiere. In quest'ottica la realizzazione di librerie spettrali ad hoc, da utilizzare come dato di partenza per la calibrazione di spettri incogniti, costituirebbe un utilissimo strumento anche a fronte di analisi chemiometriche in grado di discriminare e quantificare, secondo algoritmi statistici, le singoli componenti. Le firme spettrali ottenute in laboratorio su campioni a caratteristiche note possono essere inoltre di supporto nella parametrizzazione delle proprietà dei conglomerati bituminosi al fine di effettuare delle prime valutazioni circa il rispetto dei requisiti imposti dai capitolati di appalto.

Per valutare la possibilità di quantificare la presenza di bitume che ricopre gli inerti, si è provveduto ad individuare delle relazioni circa l'affinità del bitume a legarsi con gli inerti attraverso l'adozione di una piattaforma multisensore di tipo ottico. A tale scopo è stato definito un indice, l'Indice dei Clasti Esposti (ICE), che è stato analizzato e paragonato con i risultati classici derivanti dalla prova di "Determinazione dell'affinità tra aggregato e bitume" relativo alla Norma UNI EN 12697-11" Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo – Parte 11". I risultati ottenuti, hanno messo alla luce la possibilità di implementare la metodologia di analisi normata mediante il confronto di diversi classificatori che sono stati in grado di determinare i clasti esposti presenti in ogni fotogramma, o immagine, al fine di ottenere una quantificazione oggettiva del bitume rimosso attraverso la prova di adesione. L'ICE, calcolato attraverso due tipologie di classificazioni (supervisionata e non supervisionata) si dimostra efficace nel quantificare la perdita del bitume superficiale causato dalla differenti tempistiche della prova. L'applicazione di tale metodica di analisi rappresenta quindi una efficace opportunità di migliorare la qualità del dato che altrimenti sarebbe legato, come da norma, alla soggettività degli operatori che effettuano le valutazioni.

A partire da dati acquisiti in campo, l'integrazione delle tecniche di *Digital Imaging Processing* con le analisi radiometriche standard, ha consentito di fornire una quantificazione dei clasti esposti su un' area nota. Si è pertanto realizzata una catena di elaborazione in grado di co-registrare, calibrare e quindi classificare delle immagini RGB acquisite in maniera sistematica al fine di calcolare l'Indice dei Clasti Esposti. I risultati ottenuti sottolineano come gli indici spettrali analizzati siano in buona correlazione con l'ICE e come questi possano essere applicati anche alle immagini multi ed iperspettrali acquisite sia da sensori aviotrasportati che satellitari ad alta risoluzione.

Si è convenuto che la distinzione tra pavimentazioni con e senza ammaloramenti è possibile solo parzialmente e con un certo grado di incertezza. Tuttavia, la differenziazione tra le diverse pavimentazioni può essere espressa anche in termini di omogeneità spettrale attraverso la statistica relativa alle deviazioni standard e ai coefficienti di variazione ottenuti a partire delle firme spettrali acquisite. La suddivisione delle pavimentazioni in funzione del tipo e grado di ammaloramento ha permesso infatti di migliorare l'interpretazione di tali dati. Si è potuto osservare come un generale aumento delle deviazioni standard e del coefficiente di variazione (COV) sia attribuibile al passaggio da pavimentazioni in buono stato a pavimentazioni ammalorate. Tali risultati sono congruenti con quelli ottenuti in precedenza dove è evidente una marcata variazione tra queste due tipologie di pavimentazioni.

La problematica della differenziazione delle diverse tipologie di ammaloramenti stradali è stata in seguito affrontata mediante lo studio della variazione di omogeneità spaziale per sito di campionamento quantificando l'invarianza (o la varianza) spettrale delle pavimentazioni sane omogenee rispetto a quelle eterogenee. L'accento è stato pertanto dato al passaggio tra superficie omogenea a non omogenea calcolando le differenze in termini di COV e di deviazione standard. Queste differenze sono risultate essere tanto più marcate quanto più marcata è la differenza tra le due pavimentazioni. La "risposta spettrale di transizione" può essere quindi un parametro in grado di segnalare che in un dato luogo vi è una disomogeneità spettrale, probabilmente correlabile al grado di ammaloramento del manto stradale.

Tale analisi è stata implementata mediante l'utilizzo di una piattaforma multisensore montata su drone terrestre, denominato RAAS (*Rover for Asphalt Anomalies Survey*). Sul rover è stato applicato un sistema di acquisizione dati "ad immagini" multispettrale a 3 bande ed una fotocamera digitale ad alta risoluzione.

I risultati delle elaborazioni partendo dall'analisi del trend evolutivo delle deviazioni standard calcolate a partire dalle bande del NIR, RED, GREEN e l'indice  $I_5$  è stato possibile riconoscere, mediante processi computazionali non complessi, le pavimentazioni non usurate da quelle con diversi gradi di ammaloramento. L'effetto della non-omogeneità delle pavimentazioni ammalorate si riflette sia sui valori di deviazione standard che sulla variazione degli autovalori nonché, in termini geostatistici, sul trend evolutivo delle distanze di autocorrelazione dei pixel che avviene prima in quelle sane che in quelle ammalorate.

L'utilizzo di sensori aviotrasportati ad alta risoluzione radiometrica e spettrale offre la possibilità di estrarre informazioni utili al monitoraggio delle condizioni delle strade. Gli aggregati, una volta esposti all'atmosfera, risultano influire maggiormente sull'andamento della risposta spettrale rispetto a quella bituminosa. Il grado di ammaloramento del manto stradale può quindi influenzare il contributo in termini radiometrici. Essendo l'area superficiale dei clasti esposti il fattore che maggiormente influenza tale contributo, si è applicato l'Indice dei Clasti Esposti (ICE) al fine di quantificare da remoto dell'interfaccia clasto-atmosfera.

Il confronto tra le elaborazioni effettuate a partire da immagini iperspettrali MIVIS con l'analisi di fotografie digitali acquisite in campo ha permesso di ottenere mappe dell'Indice dei Clasti Esposti e pertanto di quantificare la percentuale di esposizione dei clasti all'atmosfera. Risulta tuttavia evidente come la risoluzione delle immagini aeree non sia del tutto ottimale per una analisi dettagliata dello stato delle pavimentazioni. Questo è da imputare principalmente alle risoluzioni dell'ordine dei 3 o 4 metri/pixel, non sufficientemente elevata rispetto alla larghezza media di una strada. Effettivamente i pixel di bordo carreggiata, tendono ad avere firme spettrali miscelate con altre tipologie di copertura di suolo come alberi, marciapiedi, autovetture, ecc.. A tal proposito l'adozione della tecnologia iperspettrale sembra essere più adatta ad assi autostradali con più corsie, sebbene rimanga sempre un punto critico il costo elevato di tali rilievi. In aggiunta, come già evidenziato da studi precedenti (ad es. Herold et al. 2008) lo stato di ammaloramento delle pavimentazioni non sembra essere rilevabile a pieno con tali dati.

In considerazione dell'importanza della risoluzione spaziale che il target "strada" necessita per una accurata classificazione, i sensori aviotrasportati potrebbero quindi non avere risoluzione spaziale sufficiente. Di contro l'impiego del dato satellitare ad alta risoluzione sub-metrico nel pancromatico e comunque inferiore ai 3 metri nel multispettrale, permettere una migliore distinzione e categorizzazione di tali superfici. La difficoltà, ciò nonostante, sta nell'attribuire i valori radiometrici necessari al computo di indice spettrali alle bande disponibili su tali sensori; non sempre infatti si hanno a disposizione le bande "corrette" per il calcolo di tali indici. Risulta pertanto evidente come, se dal punto di vista di risoluzione radiometrica e spettrale i sensori iperspettrali aviotrasportati siano quelli più adatti dal punto di vista della risoluzione spaziale possano essere carenti rispetto ai sensori satellitari.

Alcuni nuovi sensori satellitari possiedono caratteristiche interessanti dal punto di vista della elevata risoluzione spaziale sia nel range pancromatico che in quello multispettrale. Tra questi sensori il WORLDVIEW-3 è stato preso in considerazione al fine di valutarne le potenzialità nella definizione del grado di ammaloramento delle pavimentazioni stradali. In questo caso il computo dell'indice  $I_6$  nelle bande multispettrali ha permesso di mappare le anomalie legate al passaggio tra le pavimentazioni sane a quelle ammalorate. La realizzazione di alcuni transetti e il loro confronto con i dati derivanti dalla strumentazione ottica posizionata sul RAAS ha mostrato ottime correlazioni. È risultata efficace la mappatura ottenuta tramite lo studio delle varianze spettrali che ben si confronta con i dati visivi di campo. Tuttavia, sulla base della corrente tecnologia disponibile in commercio i dati remoti satellitari non riescono ad individuare gli ammaloramenti più piccoli con diametro, ad esempio, inferiore ai 0.10m. È evidente quindi che il rilevamento di fessurazioni anche molto piccole non è possibile a causa delle loro ridottissime dimensioni (a volte anche dell'ordine dei 0.05m). I dati di campo acquisiti con il RAAS mostrano come si può mettere in evidenza l'effetto cumulato di variazioni spaziali di parametri radiometrici, siano essi semplicemente afferenti a valori medi ottenuti da una singola banda, da indici di bande o da analisi geostatistiche.

In conclusione lo svolgimento di questa tesi ha permesso di definire degli approcci metodologici innovativi per lo studio dei conglomerati bituminosi a diverse scale. In particolare i dati ottenuti durante le prove di laboratorio hanno permesso di definire un approccio innovativo per quanto riguarda la valutazione dell'affinità del bitume ad aderire agli aggregati fornendo potenzialmente un importante aiuto alle attività tecniche di laboratorio. La simulazione tramite RAAS ha permesso invece di simulare un sistema innovativo per valutare, in piccolo, la presenza di ammaloramenti. Un tale sistema combinato di camere, opportunamente predisposto su mezzi tecnici comunemente utilizzati per monitorare il manto stradale (es. mezzi ANAS o autostradali) potrebbe fornire una grande quantità di dati di usura durante ogni spostamento. Infine, l'elaborazione di dati satellitari ad altissima risoluzione spaziale ha dimostrato come sia in effetti

possibile applicare con successo tali sensori al monitoraggio periodico di assi stradali principali, molto estesi quali le autostrade, ma anche ad assi viari secondari.

Pertanto il progetto di ricerca svolto può essere ritenuto innovativo nel campo stradale e in accordo con il crescente interesse che la comunità scientifica a rivolto negli anni a tale tematica. L'utilizzo di tecniche di telerilevamento consente inoltre di facilitare sia processi decisionali che di elaborazione di grandi quantità di dati in tempi ristretti e con costi contenuti. Tali tecniche, infine, possono supportare con efficacia le fasi di *planning*, di *building* e di *maintenance* con evidenti ricadute commerciali nel settore mediante lo sviluppo di nuove tecnologie hardware e software dedicate a diversi tipi di *end-user*.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Adler-Golden S. M., Matthew M. W., Bernstein L. S., Levine R. Y., Berk A., Richtsmeier S. C., Acharya P. K., Anderson G. P., Felde G., Gardner J., Hoke M., Jeong L. S., Pukall B., Ratkowski A., Burke H.-H. (1999). *Atmospheric Correction for Short-wave Spectral Imagery Based on MODTRAN4*. SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry, Vol. 3753, pp. 61-69.
- Andreou C.; Karathanassi V.; Kolokoussis P. (2011). *Investigation of hyperspectral remote sensing for mapping asphalt road conditions*. International Journal of Remote Sensing, 32(21), 6315-6333.
- Asphalt Pavement Guide (2008). Washington Asphalt Pavement Association.
- Norma tecnica UNI EN 13043 “Attestazione di conformità degli aggregati”
- Bassi P. (1993). *Chimica applicata ai materiali da costruzione*. SEI Eds.
- Bell C.A. (1989). *Summary report on the aging of asphalt-aggregate systems*. Strategic Highway Research Program (SHRP). PublicationsSHRP-A-305, 100.
- Ben-Dor E., Kindel B., Goetz A.F.H. (2004). *Quality assessment of several methods to recover surface reflectance using synthetic imaging spectroscopy data*. Remote Sensing of Environment. 90, 389–404.
- Berk A., Bernstein L. S., Anderson G. P., Acharya P. K., Robertson D. C., Chetwynd J.H., Adler-Golden S. M. (1998). *MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS*. Remote Sensing of the Environment, Vol. 65, pp. 367-375.
- Bessa I. S., Castelo Branco V.T.F., Soares J.B. (1994). *Evaluation of different digital image processing software for aggregates and hot mix asphalt characterizations*. Construction and Building Materials 2012, 37, pp. 370–378.
- Bitelli G.; Simone A., Girardi F.; Lantieri C. (2012). *Laser Scanning on Road Pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture*. Sensors, 12, 9110-9128.
- Bruno L.; Parla G.; Celauro C. (2012). *Image analysis for detecting aggregate gradation in asphalt mixture from planar images*. Construction and Building Materials, 28, pp. 21–30.
- Digital Image Processing. Cement and Concrete Research, 35, 1613-1619.
- Cheng P., Toutin T. (2001). *Orthorectification and DEM Generation from High Resolution Satellite Data*. Asian Conference on Remote Sensing, Singapore, 5-9 November 2001
- Chiles J.P , Delfiner (1999). *Geostatistics. Modeling spatial certainty*. Wiley series in probability and statistics USA, 695 pp.
- Claine P. J. (1984). *Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability*. 1<sup>st</sup> ed., U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, National Technical Information Service, in Washington, D.C., Springfield, Va..
- Clark R.N (1999). *Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy*. Manual of Remote Sensing. Volume 3: Remote Sensing for the Earth Sciences, Rencz A.N. Eds.; John Wiley & Sons Inc.; pp 3-58.
- Clark B., Suomalainen J., Pellikka P. (2011). *The selection of appropriate spectrally bright pseudo-invariant ground targets for use in empirical line calibration of SPOT satellite imagery*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 66 (2011) 429–445
- Clark, R. N., & Englert, P. A. (1993). Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. Journal of Geophysical Research, 89(B7), 6329–6340.
- Clark R.N., Swayze G.A., Livo K.E., Kokaly R.F., King T.V.V., Dalton J.B., Vance,J.S., Rockwell B.W., Hoefen T., Mcdougal R.R. (2002). *Surface reflectance calibration of terrestrial imaging spectroscopy data: a tutorial using AVIRIS*. Proceedings of the 10th Airborne Earth Science Workshop, R. O. Green (Ed.), JPL Publication 02-1, 2002 (Pasadena, CA: Jet Propulsion laboratory).
- Cloutis A. E. (1989). *Spectral reflectance properties of hydrocarbons: remote-sensing implications*. Science, 4914, 165–168.

- Conel J. E., Green R. O., Vane G., Bruegge C. J., Alley R. E. (1987). *Airborne Imaging Spectrometer-2: Radiometry and a comparison of methods for the recovery of ground reflectance*. Proceedings, Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, Jet Propulsion Laboratory 87-30, Pasadena, California, 18-47.
- Davis J.C. (1986). *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York: John Wiley and Sons.
- Di Mascio Paola, Miseri Fabio, Moretti Laura (2010). *Pavimentazioni stradali approfondimenti sulle pavimentazioni in calcestruzzo: un modello per confrontare i costi di primo impianto e manutenzione*. FEDERBETON.
- Draper N., Smith H. (1981). *Applied Regression Analysis*. 2<sup>nd</sup> edition, Wiley-Interscience, 709.
- European Asphalt Pavement Association EAPA; <http://www.eapa.org/>.
- Note tecniche FHWA (1996). Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Projects (FP-96)
- Fontinovo G., Allegrini A., Atturo C., Salvatori, R. (2012). *Speedy methodology for geometric correction of MIVIS data*. European Journal of Remote Sensing. 45, 19-25
- Gao B.C.; Montes M. J.; Davis C. O.; Goetz A. F.H. (2009). *Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean*. Remote Sensing of Environment, 113, 17-24.
- Gomasasca M. (2004). *Elementi di Geomatica*. AIT, Firenze
- Gomez R. B. (2002). *Hyperspectral imaging: a useful technology for transportation analysis*. Optical Engineering, 41 (9), 2137-2143.
- Herold M. (2007). *Spectral Characteristics of Asphalt Road Surfaces*. In Weng, Q. (Ed.). Remote sensing of impervious surfaces. CRC Press. pp. 237-248.
- Herold M., & Roberts D. A. (2005) - Spectral characteristics of asphalt road aging and deterioration: Implications for remote-sensing applications. Applied Optics, 44(20), 4327–4334.
- Herold M.; Roberts D. A.; Gardner M. E.; Dennison P. E. (2004). *Spectrometry for urban area remote sensing - Development and analysis of a spectral library from 350 to 2400 nm*. Remote Sensing of Environment, 91, 304–319.
- Herold M.; Roberts D.; Noronha V.; Smadi O. (2008). *Imaging spectrometry and asphalt road surveys*. Transportation Research, Part C: Emerging Technologies, 16, 153–166.
- Hinkley E. D. (1976). *Laser spectroscopic instrumentation and techniques: long-path monitoring by resonance absorption*. Optical and Quantum Electronics, 8(2), 155-167.
- Hoerig B., Kuehn F., Oschuetz F., Lehmann F. (2001). *Hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons*, International Journal of Remote Sensing, 22, 1413–1422.
- Jia J. (1993). *Seed maize quality inspection with machine vision*. Proc SPIE.
- Karpouzli E.; Malthus T. (2003). *The empirical line method for the atmospheric correction of IKONOS imagery*. International Journal of remote sensing, 24 (5), 1143-1150.
- Kuehn F., Oppermann K., Hoerig B. (2004). *Hydrocarbon index—an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons*. International Journal of Remote Sensing, 25, 12, 2467–2473.
- Lamperti R., Lantieri C., Sangiorgi C., Bitelli G., Simone A. (2016). *Semi-automatic evaluation of the degree of bitumen coverage on bitumen-coated aggregates*. In 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials (pp. 15-24). Springer Netherlands.
- Lau I.C. (2004). *Application Of Atmospheric Correction To Hyperspectral Data: Comparisons Of Different Techniques On Hymap Data*. Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference (12th: 2004: Fremantle, Western Australia)
- Leone A., Perona G.(1995). *Scattering atmosferico e variazioni delle componenti spaziali nelle immagini tele rilevate*. 1o corso avanzato AIT-CSEA "Telerilevamento delle risorse terrestri".

- Levinson R., Berdahla P., Akbaria H., Millerb W., Joedickec I., Reillyd J., Suzukie Y., Vondranf M. (2007). *Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials*. Solar Energy Materials & Solar Cells 91 304–314.
- Liang S. (2004). *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. Book. John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- Lin X.; Liu Z.; Zhang J.; Shen J. (2009). Combining Multiple Algorithms for Road Network Tracking from Multiple Source Remotely Sensed Imagery: a Practical System and Performance Evaluation. *Sensors*, 9, 1237-1258.
- Mack C. (1964). *Physical Chemistry, Bituminous Materials Asphalts, Tars and Pitches*. A.J. Hoiberg (Ed.) Interscience New York, 1, 25-123.
- Marinoni N., Pavese A., Foi M., Trombino L. (2005). *Characterization of Mortar Morphology in Thin Sections by digital image processing*. Cement and Concrete Research,35(8), 1613-1619.
- Potuckova M., Kupkova L., Kolankiewiczova S. (2010). *Road Classification from VHR Imagery*.network,5, 6.
- Mei A., Bassani C., Fontinovo G., Salvatori R., Allegrini A. (2016). *The use of suitable pseudo-invariant targets for MIVIS data calibration by the empirical line method*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114, 102-114.
- Mei A., Fiore N., Salvatori R., D’Andrea A., Fontana M. (2012). *Spectroradiometric laboratory measures on asphalt concrete: Preliminary results*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 53, 514-523.
- Mei A.; Salvatori R.; Allegrini A. (2011). *Analysis of paved areas with field data and MIVIS hyperspectral images*. Italian Journal of Remote Sensing, 43, 147–159.
- Mei A.; Salvatori R.; Fiore N.; Allegrini A., D’Andrea A. (2014). *Integration of Field and Laboratory Spectral Data with Multi-Resolution Remote Sensed Imagery For Asphalt Surface Differentiation*. Remote sensing, 2014, 6, 2765-2781.
- Miller J. S., W. Y. Bellinger (2003). *Asphalt Pavement Guide*. Washington Asphalt Pavement Association's.
- Moroni M., Mei A., Leonardi A., Lupo E., Marca F. L. (2015). *PET and PVC Separation with Hyperspectral Imagery*. Sensors, 15(1), 2205-2227.
- Ferrari P., Giannini F. (1996). *Corpo stradale e pavimentazioni*. vol.2 ISEDI/UTET,1996
- Moroni M.; Lupo E.; Cenedese A. (2013). *Hyperspectral proximal sensing of salix alba trees in the sacco river valley (Latium, Italy)*. Sensors, 13, 14633–14649.
- Munsell A. H. (1907). *A Color Notation: A Measured Color System, Based on the Three Qualities, Hue, Value, and Chroma, with Illustrative Models, Charts, and a Course of Study Arranged for Teachers*. Book. GH Ellis 1907.
- Norma tecnica Bollettino Ufficiale n° 125/88 Consiglio Nazionale delle Ricerche “*Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale*”.
- Norma tecnica UNI EN 12597 “*Bitumen and bituminous binders*”
- Norma UNI 9910 “*Manutenzione stradale*”
- Norma UNI EN 12697-11”*Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo – Parte 11*”
- Noronha V., Herold. M., Gardner M., Roberts D.A. (2002). *Spectrometry and imaging spectrometry for road centerline extraction and evaluation of pavement condition*. Proceedings of the Pecora Conference, Denver, CO.
- Note tecniche ANAS S.p.A. (2009) - Capitolato Speciale D’appalto It.Cdgt.C.05.16-Rev.0-24/04/2009.
- Note tecniche ANAS S.p.A. (2008). *Gestione delle Pavimentazioni Stradali*, Linee guida di progetto e norme tecniche prestazionali ANAS”, Centro Sperimentale, Stradale, Aprile 2008-10-08

- Prearo G., Righetti G. (2005). *Procedure di integrazione di dati Laser scanning ed iperspettrali per l'estrazione automatica della geometria stradale*. Atti 9 conferenza ASITA, vol2.
- Rencz A. N., (1999). *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*. Volume 3 (No. Ed. 3). John Wiley & Sons, Inc.
- Report FHWARD-03 (2003). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program* (Fourth Revised Edition) Federal Highway Administration.
- Robl T. L., Milburn D., Thomas G., O'Hara K., Haak A. (1991). *The SHRP Materials Reference Library Aggregates: Chemical, Mineralogical, and Sorption Analyses*. Strategic Highway Research Program (SHRP) Publications SHRP-A/UIR-91-509, 88 pp..
- Salvatori R, Mei A., Salzano R. (2009). *Caratterizzazione spettrale di superfici asfaltate e realizzazione di una libreria di firme spettrali*. Atti 13a conferenza nazionale ASITA.
- Salvatori R., Plini P., Giusto M., Valt M., Salzano R., Montagnoli M., ... & Sigismondi D. (2011). *Snow cover monitoring with images from digital camera systems*. Ital. J. Remote Sens, 43, 137-145.
- Schott J.R. (1997). *Remote sensing: The image chain approach*. Book. Oxford: Oxford University Press.
- Shvetsov M. (1954). *Concerning some additional aids in studying sedimentary formations*. In Bull. Moscow Soc. Naturalists, Pub. Moscow Univ., Geol. Sect.; 29: pp. 61-66.
- SITEB (1996). *Manutenzione delle Pavimentazioni Stradali*, Editore SITEBSI,
- Smith G.M., Milton E.J. (1999). *The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance*. International Journal of Remote Sensing. 20, 2653–2662.
- Terry R.D., G.V. Chilingar (1955). *Summary of "Concerning some additional aids in studying sedimentary formations" by M.S. Shvetsov*. Journal of Sedimentary Petrography 25:229–234.
- UNI EN 933-1. *“Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati – Determinazione della distribuzione granulometrica – Analisi granulometrica per staccatura”*.
- Usher J., Truax D. (2001). *Exploration of remote sensing applicability within transportation*. Remote Sensing Technologies Center, final projects rep.(Remote Sensing Technologies Center, Mississippi State University, 2001).
- Wentworth C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments, J. Geology,30, 377-392.
- Zhou J., Wang J., Li J., Hu D. (2011). *Atmospheric correction of PROBA/CHRIS data in an urban environment*. International journal of remote sensing. 32(9), 2591-2604.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia per lo svolgimento di questa Tesi di Dottorato:

*Dott. Ing. Antonio D'Andrea*, Preside della facoltà di Ingegneria Civile e Industriale della Sapienza di Roma, per aver sostenuto la collaborazione già in essere da qualche anno ed il progetto di ricerca durante il triennio della Tesi.

*Dott.ssa Rosamaria Salvatori*, Primo Ricercatore e Responsabile dell'Area Tematica di Sviluppo di Dispositivi e Metodologie di Osservazione della Terra presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto sull'Inquinamento Atmosferico per i suoi consigli, per il suo supporto nello svolgimento del progetto di ricerca e per l'utilizzo delle apparecchiature.

*Dott. Ing. Nicola Fiore*, Responsabile del Laboratorio Materiali Stradali presso il DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università La Sapienza – Roma per il suo supporto nelle attività di campo e nell'organizzazione delle attività di laboratorio.

*Sig. Armando Di Curzio*, Tecnico afferente al Laboratorio di Strade presso il DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università La Sapienza – Roma per il supporto nelle attività di laboratorio che hanno riguardato la preparativa dei campioni e le analisi tramite metodologie classiche.

*Dott. Ing. Giuliano Fontinovo*: Tecnico afferente al Laboratorio di Sviluppo di Dispositivi e Metodologie di Osservazione della Terra presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, per aver contribuito attivamente alle campagne di acquisizione dati e per il supporto geomatico.

*Dott. Ing. Monica Moroni*: Tecnico presso il Laboratorio di Idraulica presso il DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università La Sapienza – Roma, per aver dato il supporto durante l'acquisizione dei dati iperspettrali da banco e per la disponibilità nell'utilizzo dello spettroradiometro.

*Dott. Ing. Emiliano Zampetti e il Dott. Paolo Papa*, Ricercatori afferenti al Laboratorio di Sensori e Sistemi Sensoristici ad Elevate Prestazioni per il Monitoraggio della Qualità dell'Aria e dell'Ambiente presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, per il supporto tecnologico relativo alla predisposizione del rover RAAS.

*Dott.ssa Alessia Allegrini*, Tecnologo Responsabile del Laboratorio Aereo di Riprese Ambientali presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, per la disponibilità dell'utilizzo di dati MIVIS.

*...Ringrazio infine e soprattutto mia  
figlia Sofia, Elena e la mia famiglia  
per il sostegno pratico e morale.*