



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di laurea triennale in **Ingegneria Meccanica**

**Sviluppo di un sistema di illuminazione per l'acquisizione di  
immagini iperspettrali per il riconoscimento di tracce  
biologiche per rilievi della polizia scientifica**

Lighting system development to acquire hyperspectral images to  
recognize biological tracks for scientific police investigations

**Relatore:**

*Prof. Paolo Castellini*

**Tesi di Laurea di:**

*Emily Carbonari*

Anno Accademico 2020/2021



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

---

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (D.I.I.S.M.)

Corso di laurea triennale in *Ingegneria Meccanica*

**Sviluppo di un sistema di illuminazione per l'acquisizione di  
immagini iperspettrali per il riconoscimento di tracce  
biologiche per rilievi della polizia scientifica**

Lighting system development to acquire hyperspectral images to  
recognize biological tracks for scientific police investigations

**Relatore:**

*Prof. Paolo Castellini*

**Tesi di Laurea di:**

*Emily Carbonari*

# INDICE

1. INTRODUZIONE .....	1
1.1 L'ILLUMINAZIONE - OTTIMIZZAZIONE ILLUMINAZIONE IPERSPETTRALE .	1
1.2 HINALEA .....	3
2. STATO DELL'ARTE .....	4
3. LE INDAGINI SCIENTIFICHE SULLA SCENA DEL CRIMINE .....	7
4. SISTEMI MULTISPETTRALI ED IPERSPETTRALI .....	8
5. TELECAMERA IPERSPETTRALE .....	9
5.1 HYPERSPECTRAL IMAGING .....	10
5.2 GLARE OTTICO NELLE IMMAGINI IPERSPETTRALI .....	12
5.3 CHEMICAL COLOUR IMAGING .....	12
6. LA LUCE IN FOTOGRAFIA .....	13
6.1 TIPOLOGIE DI LUCE IN FOTOGRAFIA .....	14
6.2 LA QUALITA' DELLA LUCE IN FOTOGRAFIA .....	14
6.3 LA DIREZIONE DELLA LUCE .....	15
6.4 LE PROPRIETÀ DELLA LUCE .....	15
6.5 LAMPADE .....	15
6.6 SPETTRI DI LUCE .....	15
7. LENTI E SPECCHI .....	17
8. CALIBRAZIONE RADIOMETRICA .....	17
9. RIFLETTANZA .....	19
10. IRRAGGIAMENTO .....	20
11. PROPRIETÀ OTTICHE DEI TESSUTI .....	21
11.1 PROPRIETÀ OTTICHE DEL SANGUE .....	21
12. CARATTERIZZAZIONE ILLUMINAZIONE .....	23
13. CONCLUSIONI .....	27
14. OSSERVAZIONI .....	29
15. SUGGERIMENTI .....	30
16. RINGRAZIAMENTI .....	30
17. SITOGRAFIA .....	31
18. BIBLIOGRAFIA .....	32

# 1. INTRODUZIONE

Una nuova tecnologia di acquisizione d'immagini è data dall'utilizzo delle telecamere iperspettrali, invece delle tradizionali macchine fotografiche, che si basano sulla tecnologia RGB, acronimo che indica i tre colori primari: red, green e blue. Le telecamere a pixel, infatti, catturano i singoli pigmenti di ogni immagine che le arrivano e, per ottenere immagini a colori, mischiano i tre colori primari. Le telecamere iperspettrali, invece, lavorano sulle lunghezze d'onda. Queste, hanno uno spessore piccolo, di circa 1 micron, il che permette di determinare con un'elevata precisione la lunghezza d'onda di ogni singolo pixel dell'immagine di riferimento. Per poter studiare tutta un'immagine, quindi, la tecnologia delle telecamere iperspettrali è più lenta, ma il risultato è molto più preciso e dettagliato.

Le telecamere iperspettrali, però, necessitano di condizioni di lavoro particolari, quali, per esempio, un'elevata illuminazione e, quindi, è da evitare di acquisire il campione in esame se ha parti in ombra, dato che, queste, causerebbero errori.

Se, quindi, l'illuminazione è su tutta la superficie, senza la presenza di ombre, l'obiettivo della telecamera è di tipo direzionale, sennò, se si lavora su tutte le lunghezze d'onda, l'obiettivo è di tipo spettrale.

L'obiettivo del lavoro svolto è stato quello di determinare la più corretta illuminazione attraverso diverse analisi su varie superfici, così da poter studiare delle tracce biologiche. Si è lavorato principalmente con il sangue e, si sono svolte varie prove di cambio d'illuminazione in modo da determinare quella che meglio risaltava le proprietà ematiche.

Le fasi d'acquisizione di un'immagine da una telecamera iperspettrale sono tre: inizialmente arriva l'immagine, che passa attraverso una lente e, poi, con la telecamera iperspettrale si analizza meglio la lunghezza d'onda dell'immagine in ingresso.

Si può utilizzare la telecamera iperspettrale in vari campi, come negli studi degli oculisti o, come in questo caso, per analizzare le varie tracce di un delitto, come sangue; saliva; urina, ecc. Ogni mattina si sono analizzate anche, varie tracce di sangue, su varie superfici, così da studiarne l'invecchiamento e, così da verificare come il suolo influisce con esso e con le sue proprietà.

Si hanno due tipologie differenti di telecamera: multispettrale ed iperspettrale. Le telecamere multispettrali, lavorano su lunghezze d'onda precise, quindi, su un numero minore rispetto quelle iperspettrali, che sono più dettagliate, dato che coprono un campo di lunghezza d'onda maggiore; arrivando fino circa 1000nm. Il rischio, però, è che con le telecamere iperspettrali si prenda anche lo sfondo, o oggetti che non si vogliono analizzare. Si potrebbe utilizzare, perciò, la telecamera iperspettrale per identificare la lunghezza d'onda d'interesse e poi utilizzare la telecamera multispettrale, essendo più specifica, per studiare quella determinata lunghezza d'onda. In questo modo si avrebbero vantaggi sia dal punto di vista temporale, sia a livello economico.

In questo lavoro si è caratterizzata l'illuminazione della telecamera iperspettrale HinaLea definendo, inizialmente, la geometria ottimale per una corretta illuminazione e, successivamente, tramite diverse prove si sono definiti i parametri ottimali di lavoro della telecamera al fine di analizzare tracce ematiche su diverse superfici.

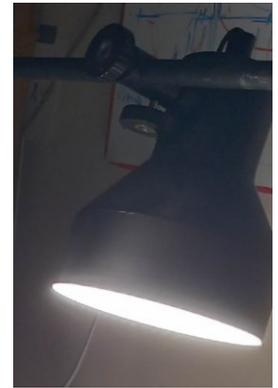
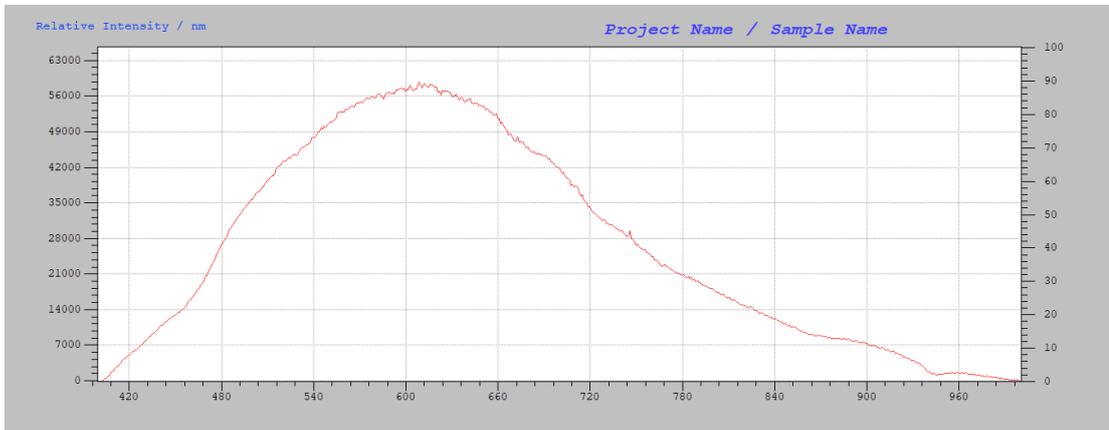
## 1.1 L'ILLUMINAZIONE - OTTIMIZZAZIONE ILLUMINAZIONE IPERSPETTRALE

Al fine di ottenere una buona immagine iperspettrale, fondamentale è l'utilizzo di una corretta illuminazione; quindi, per prima cosa, lo strumento va tarato correttamente così da evitare, per esempio, che una parete bianca la si veda verde, a causa di averla illuminata con una luce verde. Si tara, quindi, lo strumento con una superficie bianca, così da avere un riferimento per poi poter analizzare varie caratteristiche dei campioni in esame. Per scegliere la corretta illuminazione da utilizzare in ingresso, si caratterizza la luce con lo spettrometro, che è uno strumento composto da un cavo ottico che rileva l'intensità di illuminazione, nelle ordinate, in relazione alla lunghezza d'onda [nm], nelle ascisse.

Dato che la macchina HinaLea lavora sul range di lunghezze d'onda 400-1000nm, si analizza lo spettro della luce in ingresso in questo intervallo.

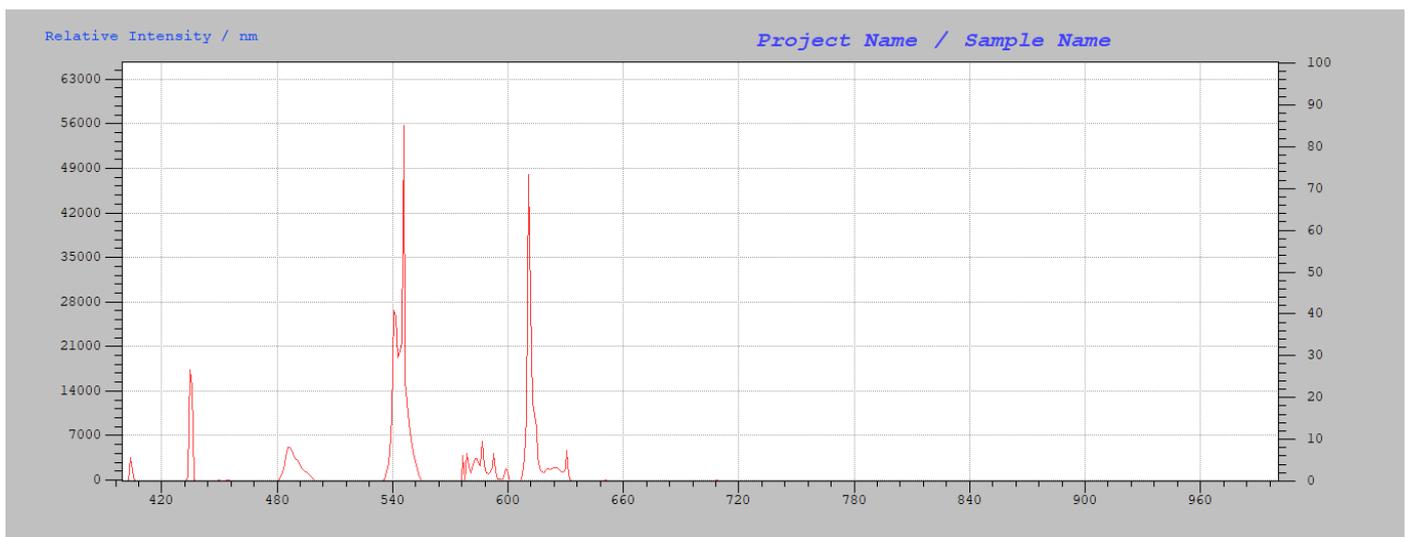
La corretta illuminazione è quella caratterizzata da uno spettro d'intensità continuo, senza picchi e con un buon contributo.

Le lampade alogene sono le migliori, perché hanno uno spettro continuo, senza picchi, che va a scendere alle alte lunghezze d'onda. Un tentativo, quindi, è stato quello di analizzare lo spettro di una lampada ad infrarossi al fine di alzare la curva discendente delle lampade alogene. Le lampade ad infrarossi, però, scaldano molto e, nonostante, il loro spettro copra una lunghezza d'onda maggiore rispetto quelle alogene, esso è sempre discendente, quindi non conviene utilizzarle. La lampada dell'Ikea e quella a fluorescenza, invece, hanno picchi nello spettro che, quindi, non è continuo, ma pulsa. Dato che le lampade alogene emanano calore, invece di utilizzarne 4, se ne utilizzano 2.

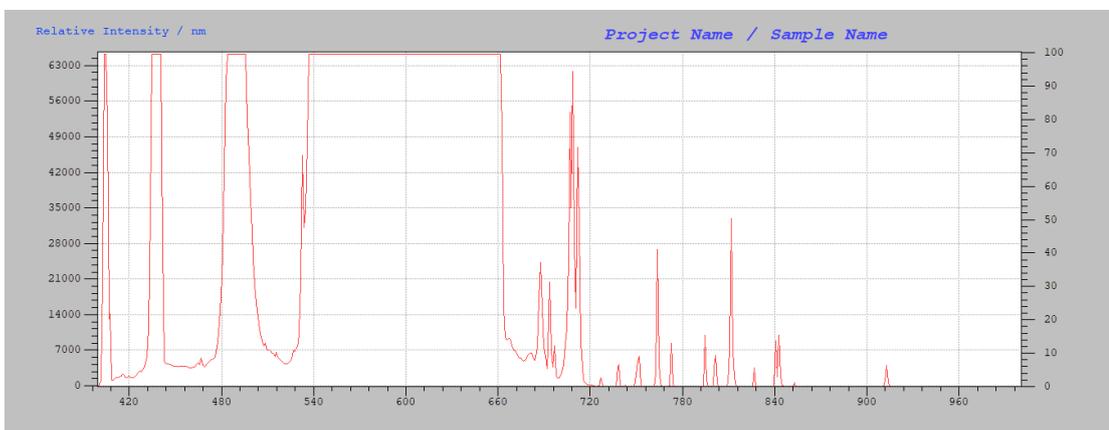


Img. 1 Spettro d'intensità di una lampada alogena -Spettrometro-

Img. 1.1 Lampada Alogena



Img. 2 Spettro d'intensità dei neon -Spettrometro-



Img. 3 Spettro d'intensità lampada Ikea



Img. 3.1 Lampada Ikea

Aggiungendo una terza fonte di illuminazione alogena alle altre due lampade alogene, con contributo d'illuminazione nel range di circa 410-700nm, quindi presente a lunghezze d'onda minori rispetto lo spettro delle due lampade in Img. 1.1, è risultato che il contributo delle due lampade alogene sopra i 700nm scompare, perché l'esposizione risultante dall'unione delle tre lampade, per le due lampade alogene iniziali è troppo bassa. Ciò è dovuto dalla presenza della terza lampada aggiunta, che ha una potenza di illuminazione molto maggiore rispetto le altre due e, quindi, l'esposizione della telecamera si riduce di molto rispetto l'illuminazione con le sole due alogene. Diminuisce, così, il tempo di acquisizione dell'immagine, ma, come già detto, si perde il contributo delle lampade alogene alle lunghezze d'onda d'estremità. Un vantaggio sull'utilizzo della terza lampada è che, non avendo contributo vicino l'infrarosso, non scalda.



Img. 4 Terza fonte d'illuminazione alogena

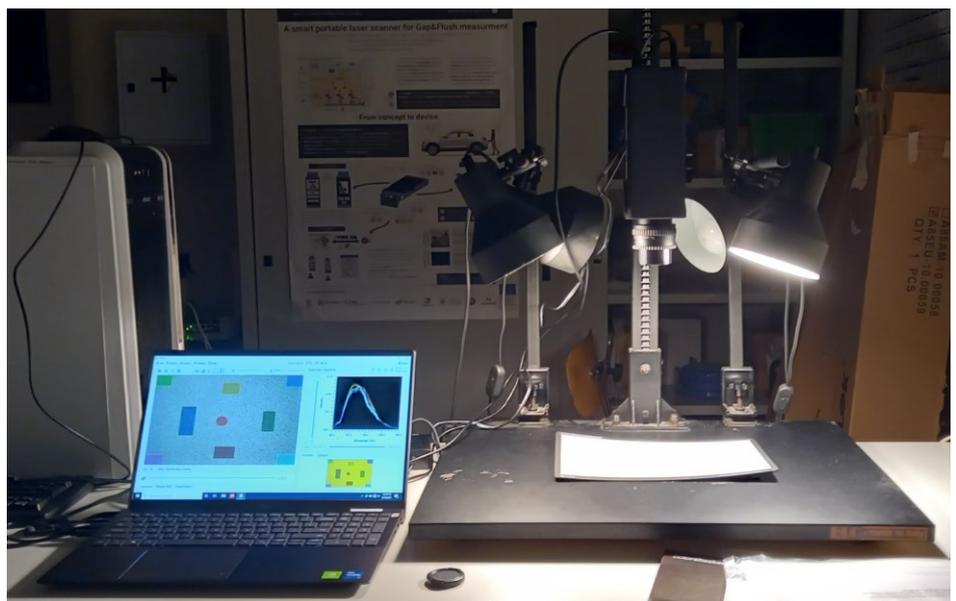
L'utilizzo concomitante delle tre lampade mostra, inoltre, delle evidenti zone circolari. Ciò può essere dovuto al fatto che i contributi delle due illuminazioni sono diversi alle varie lunghezze d'onda. Perciò, se si ha un picco in entrambe le illuminazioni, il contributo totale aumenta, ma se si ha un picco ed una valle, allora quel contributo si perde. Ciò dovrebbe essere evidente se all'aumentare della lunghezza d'onda, l'intensità del numero delle zone circolari aumenta.

Un'ulteriore causa della presenza delle zone circolari può essere dovuta al fatto che, allo stesso istante che la telecamera cattura l'immagine, la pulsazione della lampada varia, dato che essa lavora ad intermittenza in tempi infinitesimi.

Il piano di lavoro, per la definizione della miglior geometria di illuminazione, quindi, è caratterizzato da:

- N° 1 telecamera iperspettrale HinaLea fissata sull'apposito supporto tramite una vite
- N° 2 lampade alogene
- N° 2 bracci di sospensione regolabili per agganciare le lampade e le relative viti
- Superficie d'appoggio

La telecamera è collegata al software mediante il quale si lavora.



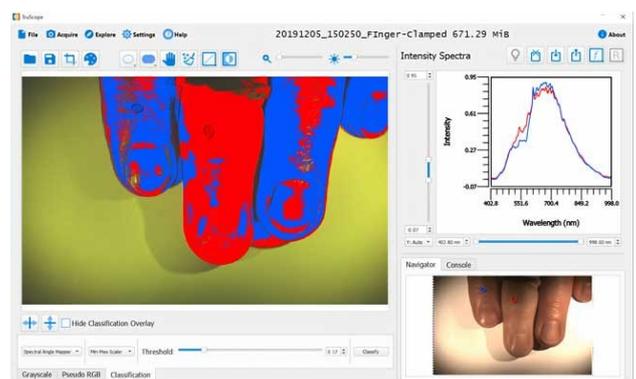
Img. 5 Piano di lavoro

## 1.2 HINALEA

La telecamera iperspettrale Hinalea necessita di una buona illuminazione per lavorare bene e, deve essere posizionata ad una distanza di almeno 20 cm dall'oggetto da analizzare.

Per prima cosa si deve tarare la macchina eseguendo un'auto esposizione per settare come colori di riferimento il bianco, che riflette tutte le lunghezze d'onda ed il nero, che le assorbe tutte. Importante è mettere a fuoco l'immagine prima di catturarla.

Analizzando lo spettro del bianco, è stato notato che la luce del neon altera l'acquisizione dell'immagine, dato che con i



Img. 6 analisi HinaLea

neon accesi, la riflettanza ha dei picchi evidenti, mentre, a neon spenti, oscilla di poco attorno ad 1. Per questo motivo si lavora a neon spenti, utilizzando la sola illuminazione delle lampade alogene fissate simmetricamente sul piano di lavoro.

La telecamera iperspettrale HinaLea presenta immagini ricche di informazioni, generate dalla combinazione di un'alta risoluzione spettrale. I dati spaziali sono analizzati dal software presente nell'applicazione. HinaLea è veloce, infatti, legge i risultati in tempo reale con informazioni mostrate sul dispositivo tramite un processo di Imaging. **Questa telecamera è utile per analizzare le proprietà ed i cambiamenti non visibili all'occhio umano, di vari fenomeni, tramite innovazioni meccaniche ed ottiche, che portano ad ottenere immagini iperspettrali affidabili, cioè che presentano uno spettro, una risoluzione spaziale ed un'alta qualità d'immagine.**

HinaLea offre soluzioni che combinano dati spettrali e spaziali. La piattaforma di HinaLea unifica il potere dell'immagine iperspettrale e digitale per generare immagini ricche d'informazioni, che rivelano i dettagli di un prodotto.

## 2. STATO DELL'ARTE

Come primo approccio nell'eseguire questo lavoro sono state effettuate delle ricerche per ottenere dei parametri da analizzare con la telecamera iperspettrale e per cercare una fonte di illuminazione adatta, cioè ad ampio spettro, che coprisse con un buon contributo uniforme una lunghezza d'onda dai 400 ai 1000nm. Si è ottenuto così un metodo di analisi per caratterizzare i parametri ottimali con cui utilizzare la telecamera iperspettrale HinaLea.

La caratteristica delle telecamere iperspettrali di analizzare le proprietà dei tessuti, così da distinguerne i vari stati, è stata confermata in diversi campi di applicazioni.

Studi su ferite ustionate svolti in una stanza oscurata, in un ambiente standardizzato a temperatura controllata con il campione di ferita posto ad una distanza di 50cm dalla telecamera, le cui aree sono state mirate ortogonalmente; hanno mostrato informazioni sulla costituzione dei tessuti. Il calore sviluppato dall'illuminazione alogena può aver influenzato la microcircolazione, quindi i valori dell'analisi della ferita. A causa delle proprietà ottiche dei componenti tissutali, la luce assorbita è stata dispersa e rimessa in 128° diversi, in base all'entità del danno tissutale. L'affidabilità della scansione ottenuta è del 87%. I parametri clinici per ustioni superficiali parziali di spessore erano caratterizzati da un aspetto rosa, dalla capacità della ferita di sbiancare alla pressione e dalla presenza di dolore. Le ustioni profonde a spessore parziale sono state riconosciute da un aspetto screziato: dal marrone chiaro al rosa. Una ferita bianca, coriacea e secca senza riempimento capillare è stata definita come un'ustione a tutto spessore.

Un altro risultato è stato ottenuto dallo studio dell'ablazione termica del fegato, analizzato da una telecamera iperspettrale in un intervallo di 400-1000nm, illuminato da una sorgente di luce policromatica, la Derungs, 20 P SX-20W. Questa illuminazione ha una gamma spettrale omogenea nell'intervallo 400-950nm. L'immagine spettrale ottenuta nella lunghezza d'onda ottimale di 720nm è utile per distinguere se il fegato è normale, ablatato o termico. Se si usano 2 telecamere iperspettrali che coprono l'intervallo spettrale di 400-1700nm, il sistema è in grado di distinguere in meno di un minuto tra tessuto normale e maligno. I dati sono stati elaborati svolgendo la deviazione standard del grafico spettrale e la derivata prima per migliorare e elaborare le regioni tumorali. Criteri di discriminazione tra regione normale e tumorale sono derivati tra 1226-1251nm e 1288-1370nm.

Il sistema di telecamere iperspettrali fornisce l'immagine spettrale, attraverso lo spettro elettromagnetico, mentre raccoglie informazioni spaziali e spettrali del campione in esame.

Spettri ottici di tessuti biologici dai 400 ai 1000nm coprono la regione del visibile e gli infrarossi e, si possono scomporre a livello molecolare. Ciò contribuisce a livelli di riflettanza diffusa in certi intervalli secondo stati ossigenati e deossigenati dell'emoglobina. Diversi meccanismi dovuti all'interazione luce-tessuto dipendono dalle proprietà ottiche del tessuto, come il tipo, la densità, la dimensione, la forma, il colore e l'indice di rifrazione.

Il cambiamento delle proprietà ottiche del campione di tessuto epatico fornisce il sistema ottico per il monitoraggio della caratterizzazione del tessuto termico.

Cercando le proprietà del sangue sono stati presi in esame studi svolti su vasi sanguigni e su tracce di sangue. Il sistema di telecamere iperspettrale, infatti, rileva l'ossigenazione dei tessuti. La saturazione di ossigeno nel sangue,  $SpO_2$ , infatti, dà dati importanti, dato che il grado di livello di ossigeno nel sangue viene sfruttato come parametro di osservazione per varie malattie del sistema cardiaco, respiratorio e per valutare malattie vascolari.

Si è valutato il livello di ossigeno nel sangue in vari pazienti tra i 20 ed i 38 anni sottoposti a flebotomia. L'avambraccio è stato illuminato con una sorgente di luce policromatica di gamma spettrale 400-980nm. E' stato preso come dato di riferimento la lunghezza d'onda di **460nm, che corrisponde alla zona in cui le arterie ossigenate hanno segnale più forte delle vene deossigenate; quindi è la lunghezza d'onda ideale per rilevare le vene ossigenate e, la lunghezza d'onda di 750nm, in cui le vene deossigenate hanno segnale più forte delle vene ossigenate; quindi è la lunghezza d'onda ideale per rilevare le vene deossigenate.**

Il grado di ossigenazione del corpo dipende dall' emostasi polmonare, dalla circolazione sanguigna locale e sistemica.

$HbO_2$  è la configurazione del sangue ossigenato, che consente il passaggio di più luce infrarossa e ne assorbe di più. Hb, cioè il sangue deossigenato, invece, consente il passaggio di più luce infrarossa e assorbe più luce rossa.

Hb e  $HbO_2$  comportano un diverso assorbimento elettromagnetico, quindi una diversa emissione di luce.

L'ossimetro convenzionale usa 2 LED diversi: rosso a 660 nm e NIR a 940nm, ma l'assorbimento della luce a queste lunghezze d'onda fluttua molto tra sangue carico e privo di ossigeno. Ci sono, quindi, due lunghezze d'onda selezionabili nel visibile: rosso, 650-700nm, dove Hb è più assorbito e, la gamma delle lunghezze d'onda NIR 900-1000nm, dove l'assorbimento di  $HbO_2$  è maggiore.

La pulsossimetria a contatto usa LED a doppia lunghezza d'onda a 660nm e 940nm come sorgente luminosa e un fotodiodo come rilevatore di luce.

Eventuali dati falsi sono dovuti ad un falso assorbimento di COHb e MetHB. La precisione del dispositivo oscilla di 2%-3% nell'intervallo di saturazione di  $O_2$  del 70%-100%.

Questa analisi è stata effettuata con una telecamera iperspettrale nel range di 400-1000nm a una distanza dei campioni dal punto focale della telecamera di 20cm; illuminato da una sorgente di luce policromatica con contributo spettrale nel range di 348-950nm.

Le arterie ossigenate hanno un'ampiezza maggiore di quelle deossigenate a 460nm, viceversa a 750nm.

I vantaggi dell'utilizzo della telecamera iperspettrale è dovuta alla capacità di identificare vasi sanguigni ossigenati e deossigenati senza contatto; è affidabile clinicamente anche a basse pulsazioni arteriose periferiche, come l'ipotermia e, il tempo di risposta, di circa 13-16s è ragionevolmente breve.

L' età delle macchie di sangue è deducibile dalla composizione chimica. La telecamera iperspettrale è usata per dedurre la presenza e le proprietà dei componenti del sangue, particolarmente dei derivati dall'emoglobina, e, consente l'identificazione di informazioni sul DNA, preservandone le informazioni.

I globuli rossi, infatti, sono composti principalmente da emoglobina. **L' ossiHb ha cali negli spettri di riflettanza a 414nm, chiamata banda di Soret e, nelle bande a e b, corrispondenti rispettivamente a 542nm e 576nm. La degradazione è indotta dal tempo alla metHb negli spettri del visibile a quelle lunghezze d'onda. La degradazione nel tempo dell'ossiHb, non è uniforme, ma ha una natura bifasica.**

Fattori influenzanti i risultati sono la miscelazione spettrale tra la macchia di sangue e la superficie su cui è disposta; l'invecchiamento; la discrepanza tra il riferimento e gli spettri target; l'illuminazione e la differente attrezzatura d'acquisizione.

Le scene sono state riprese ripetutamente, per diversi giorni, per catturare il cambiamento nel tempo degli spettri del sangue. Il sistema di telecamere iperspettrali utilizza la tecnica di imaging che combina le proprietà dell'immagine digitale, cattura l'immagine 2D con lo spettroscopio, registrando la luce incidente come numero elevato di risposte consecutive di lunghezze d'onda a banda stretta; quindi combina informazioni spaziali e spettrali.

Questo studio è stato svolto in una stanza senza finestre, con umidità stabile e temperatura di circa 15°C. La telecamera e la luce sono state regolate durante le acquisizioni e i campioni non sono stati spostati. E' stato utilizzato un Surface Optics SO710, nel range di 377-1046nm e 4 lampade alogene, regolate in modo da evitare la saturazione dell'immagine.

Le distorsioni degli spettri sono correlate alle posizioni orizzontali dei pixel e derivano da errori d'apparecchiatura e introducono artefatti di forma costante, di ampiezza dipendente dalla luminosità dei pixel e dalla posizione spettrale dipendente dalla coordinata orizzontale dei pixel. Per correggere le distorsioni si paragonano con il pannello grigio di riferimento.

La degradazione dell'oxyHb-metHb-HC comporta cambiamenti visibili degli spettri nel tempo.

**Durante il primo giorno gli spettri cambiano perché l'emoglobina si ossida, infatti, è la fase più dinamica; nei giorni successivi invece i cambiamenti sono minori. Rilevare il sangue fresco è, quindi, più complesso, perché si deve tenere in considerazione un'ulteriore variabilità degli spettri.**

L'influenza dello sfondo è significativa, dato che il cambiamento dello sfondo determina l'ottenimento di diversi spettri. I cubi iperspettrali sono stati normalizzati dividendo ogni pixel per la sua mediana, così da compensare l'illuminazione non uniforme. I pixel non rilevati si trovano spesso nelle aree meno illuminate o nelle zone scure.

Le aree rosse, cioè i rilevamenti corretti sono principalmente sui bordi degli schizzi di sangue.

Se si ha una bassa penetrabilità della luce, come nelle vernici, le immagini sono più facili da ottenere, dato che non si mescolano con lo sfondo.

Le telecamere iperspettrali sono molto utilizzate anche nel campo agricolo; infatti, usando due telecamere di linea che osservano la radiazione riflessa nell'intervallo spettrale 400-2500nm si sono studiati i diversi fenotipi di piante.

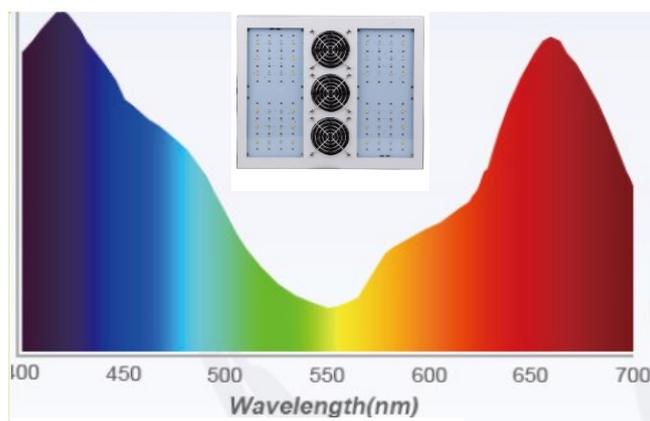
I fattori influenzanti l'acquisizione sono l'illuminazione, la geometria della superficie, l'angolo di osservazione e le condizioni di illuminazione. Le informazioni dipendono dalla geometria della pianta per più del 60%.

Si è utilizzata una telecamera VISINIR che copre il range del visibile e vicino l'infrarosso, cioè da 400 a 1000nm e, una telecamera SWIR che copre il range 970-2500nm. L'illuminazione utilizzata è stata mediante 6 ASD-PRO-LAMPS, con un orientamento verticale di 45°. La telecamera più accurata è la SWIR, che ha pixel 4 volte più grandi della VISINIR.

Da questi dati raccolti si è capito che l'ottima illuminazione dovrebbe avere uno spettro continuo ad alto contributo nel range dei 400nm-800nm, dato che, in questo caso, si utilizza la telecamera iperspettrale per analizzare le tracce di sangue, le cui zone da analizzare sono i 460nm e i 750nm, che indicano rispettivamente la percentuale di sangue ossigenato e deossigenato; mentre a 414nm, 542nm e 576nm la riflettanza dell'ossiemoglobina ha cali nello spettro. E' necessario un buon contributo di illuminazione in queste lunghezze d'onda, così da mettere in evidenza l'effettivo stato del sangue in analisi.

Alcune lampade che possono essere utilizzate sono:

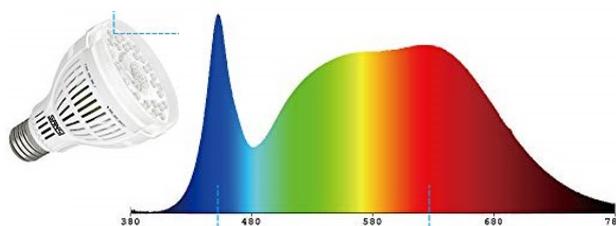
- Le LED SUMMERGROW SGS400W-300W, mostrate in Img. 7, che offrono uno spettro continuo dai 400nm ai 700nm e hanno un ottimo contributo nelle code. Questa illuminazione, però, non è ottimale, perché lo spettro cade ai 700nm e intorno i 550nm il contributo d'illuminazione scende rispetto alle code.



Img. 7 Led Summergrow e spettro

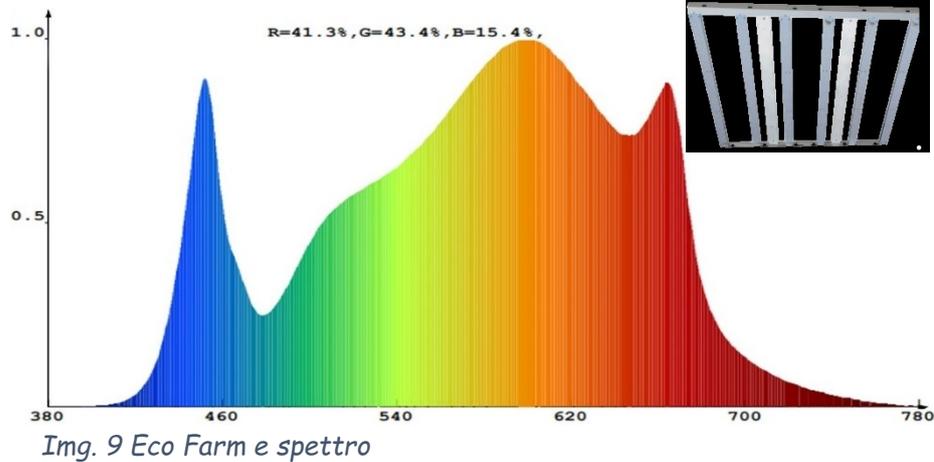
- Le SANSI 15W lampade LED, mostrate in Img. 8, che hanno uno spettro continuo dai 380nm ai 780nm. Il contributo ottimale è dato alle lunghezze d'onda tra i 410nm ed i 700nm, con un calo ai 480nm.

UV(380-399nm)	Blue (400-499nm)	Green (500-599nm)	Red (600-699nm)	FR (700-780nm)
0.05%	19.41%	37.7%	36.23%	6.61%



Img. 8 SANSI 15W e spettro

- L'Eco Farm barra quantica 600W, che ha uno spettro continuo tra i 400nm ed i 780nm. Il contributo d'illuminazione ottimale, però lo ha tra i 430nm e i 680nm.



### 3. LE INDAGINI SCIENTIFICHE SULLA SCENA DEL CRIMINE

Nel corso degli ultimi anni, grazie allo sviluppo tecnologico e al lavoro della comunità scientifica di settore, le modalità di approccio e di lavoro sulla scena del crimine sono cambiate.

L'esperimento delle attività di indagine scientifica partono dalla scena del crimine, cioè il luogo in cui si è verificato un reato. La prima fase critica di tali attività è la documentazione e la cristallizzazione della scena del crimine, in modo tale che si parta da elementi oggettivi ed utilizzabili in contesto forense; la seconda è la repertazione, ovvero l'acquisizione materiale di uno o più oggetti, cioè i reperti, ritenuti d'interesse investigativo-forense per le successive analisi di laboratorio.

La Polizia Giudiziaria, poi, documenta in modo dettagliato lo stato del luogo, servendosi di verbali e producendo foto e video, cioè documentazione, che a volte, però, è approssimativa, ovvero carente in alcuni aspetti, tale che è impossibile avere la visione d'insieme dello stato iniziale del luogo del delitto. Ciò avviene per questioni legate ai mezzi tecnici a disposizione.

In tal contesto giova lo sviluppo di nuove tecnologie, che sono volte a documentare, in modo sempre più preciso e tal che non generi contaminazione, che è il principale rischio quando si opera su scene del crimine.

Attualmente, in America è a disposizione, anche se ancora parte del progetto è in fase sperimentale, una nuova tecnologia legata ad un laser scanner. La peculiarità di tale tecnologia risiede nel fatto che l'uso di tale laser scanner consente di acquisire, tramite un apposito software, immagini e dati del luogo iniziale della scena del crimine senza che gli operatori, materialmente, entrino in contatto con questa. Inoltre, il sistema ingegneristico collegato a questo laser scanner assicura l'acquisizione delle immagini catturate in altissima definizione.

Tali immagini sono catturate in una prospettiva di 360 gradi e sono in 3D. La tridimensionalità assicura che le immagini catturate, nel software, vadano a ricreare l'ambiente esaminato.

Così facendo si è in grado, non solo di acquisire dati tecnico-scientifici in modo sicuro e completo, quindi senza rischi di contaminazione o alterazione, cioè immagini a 360°, in 3D ed in alta risoluzione, ma si è in grado di poter riprodurre ex-post i dati che i laser scanner hanno catturato.

Tale caratteristica è davvero peculiare, specie per l'applicazione di questa tecnologia in contesto forense.

Infatti, la possibilità di poter rigenerare, dai dati acquisiti, lo stato iniziale del luogo del reato è di ottima applicazione nel contesto forense, perché assicura caratteristiche quali riproducibilità e ripetibilità. Infatti, a mezzo di tale tecnologia, la scena del crimine e i reperti su di essa, potrebbero essere rianalizzati anche in momenti successivi.

La fotografia forense ha fatto della ricerca e della documentazione della verità la sua ragione d'esistere. Il termine "fotografia" deriva dall'unione di due parole greche: "phos", cioè luce e "graphis", ovvero scrivere e, letteralmente significa "scrivere con la luce" e, tende a sottolineare la sua dipendenza da essa.

La fotografia, infatti, è quell'arte e tecnologia, resa possibile dallo strumento denominato macchina fotografica o fotocamera, in cui si ottiene un'immagine statica tramite un processo di registrazione permanente delle interazioni tra luce e materia, selezionate e proiettate attraverso un sistema ottico su una superficie fotosensibile. Per la fotografia nell'infrarosso, la pellicola è sostituita da una memoria magnetica.

La fotografia è opera della luce e nasce, infatti, da un principio fisico chiamato diffrazione, che è una sua proprietà caratteristica. Gli apparecchi fotografici vengono chiamati camere, perché le prime camere oscure erano vere e proprie stanze in cui gli artisti lavoravano.

L'obiettivo è l'elemento essenziale in fotografia. Esso si occupa di definire l'immagine nel sensore facendo convergere la luce attraverso le lenti. Viene montato sulla parte anteriore della fotocamera per consentire la formazione di un'immagine per poi proiettarla sull'elemento sensibile, ovvero il sensore. La qualità della fotografia dipende molto dall'obiettivo: il numero di lenti, il vetro utilizzato e la struttura meccanica influiscono sui risultati ottenuti. La funzione di un obiettivo è principalmente quella di gestire il flusso della luce.

La potenza è quella dell'immagine, più d'impatto e più convincente di quanto possono esserlo parole o cifre. Il limite è quello della tecnica, che spesso smentisce l'idea secondo cui l'obiettivo del fotografo non è altro che un occhio infallibile, che tutto coglie e tutto registra, capace di catturare l'attimo e di fermare in questo modo il tempo. La verità, quindi, non viene solo ricostruita, ma viene a tutti gli effetti costruita e poi difesa tramite la raccolta di prove, tra cui le immagini sono regine indiscusse.

Le lenti fotografiche sono state chiamate "obiettivi", nella speranza che potessero salvare dall'imprecisione e dai dubbi che si accompagnano alla soggettività.

Uno scanner laser collegato a un sistema ingegneristico è una tecnologia in grado di cambiare radicalmente l'approccio alla documentazione dello stato iniziale della scena di un crimine, spesso non sufficientemente accurata o incompleta.

Il fotografo forense, quindi, deve avere una buona conoscenza delle sue attrezzature. Potrebbe essere necessaria un'illuminazione speciale per fornire immagini chiare agli investigatori. Il fotografo deve anche essere informato sulla scala, quindi le dimensioni dell'oggetto possono essere rappresentate accuratamente nelle immagini fotografiche. Non tutte le immagini che il fotografo forense è invitato a catturare, però, coinvolgono situazioni statiche. Il fotografo deve essere, quindi, in grado di catturare le immagini di cui si ha bisogno come prova e, per agevolare lo studio della scena del crimine, si è sviluppata una nuova tecnologia basata sull'utilizzo di telecamere iperspettrali, che sono in grado di analizzare le proprietà intrinseche degli oggetti acquisiti, così da dare più informazioni sullo stato della scena del crimine.

## **4. SISTEMI MULTISPETTRALI ED IPERSPETTRALI**

Quando si guarda un film o lo schermo del PC, gli occhi vedono l'energia emessa dagli schermi e, generalmente, si tratta di tre canali: rosso, verde e blu. I pesci rossi e i calabroni, invece, vedrebbero la luce in modo diverso, dato che, a differenza dell'occhio umano, i pesci rossi possono vedere la radiazione infrarossa, e, i calabroni, invece, possono vedere la luce ultravioletta.

Le telecamere multispettrali ed iperspettrali, consentono di vedere il mondo con gli occhi di un umano, di un pesce rosso e di un calabrone insieme.

I sensori multispettrali ed iperspettrali si differenziano nel numero di bande di acquisizione e nella loro ampiezza. I primi assumono informazioni generalmente in un numero di bande elettromagnetiche variabile tra tre e dieci, mentre i secondi sono in grado di catturare immagini anche in un centinaio di bande spettrali.

I sensori multispettrali presentano quasi sempre le tre bande del visibile, corrispondenti al rosso, verde, e blu, a cui possono eventualmente aggiungere bande dell'ultravioletto, UV, da 200 a 400nm o dell'infrarosso vicino, NIR, da 700 a 1000nm; tali bande presentano allora ampiezze di un centinaio di nanometri.

Le bande dei sensori iperspettrali invece, essendo più numerose, risultano molto più sottili, con ampiezze dell'ordine di qualche decina di nanometri.

L'informazione ottenuta dal sensore iperspettrale assume un comportamento assimilabile al continuo e, perciò, permette la generazione di una vera e propria firma spettrale, differente dal sensore multispettrale, che è discreto e meno adeguato alla generazione di una curva.

Un sensore multispettrale è uno strumento in grado di registrare la radiazione naturale rilasciata o riflessa dagli oggetti della superficie terrestre nelle diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, generalmente nel visibile e nell'infrarosso. Il sensore multispettrale restituisce quindi un'immagine multibanda e consente, attraverso l'analisi della risposta spettrale nelle diverse bande acquisite, di estrarre informazione territoriale e di produrre accurate mappe tematiche con l'utilizzo dei classificatori.

Il sensore multispettrale, quindi, è lo strumento in grado di acquisire l'energia riflessa da ogni tipo di superficie e permette di vedere in modo approfondito lo stato di ogni singolo oggetto. Grazie alle immagini multispettrali, si può vedere oltre il visibile.

Le telecamere multispettrali matriciali e lineari usano diverse tecnologie per acquisire le immagini.

Le camere lineari sfruttano due tecnologie per acquisire i dati multispettrali: la prima utilizza un prisma posto immediatamente dopo l'ottica per separare le componenti di lunghezza d'onda differente ed indirizzarle verso sensori lineari indipendenti; la seconda tecnologia utilizza, invece, sensori multilinea, in cui ognuno di essi è ricoperto da un filtro passa banda, che permette di raccogliere solo le informazioni relative a determinate bande spettrali ben definite.

Nelle telecamere multispettrali matriciali si utilizzano, invece, tecnologie basate su prisma per separare lo spettro del visibile da quello, per esempio, dell'infrarosso per indirizzarli verso due sensori matriciali sensibili a quelle lunghezze d'onda o per separare diverse lunghezze d'onda ed indirizzarne ciascuna su un singolo sensore.

Il prisma può essere o a mosaico o a piastrelle. La tecnologia detta a mosaico acquisisce più lunghezze d'onda per ogni pixel che comporrà l'immagine attraverso sensori particolari con filtri a mosaico 4x4 disposti su tutto il sensore stesso. Nella tecnologia a piastrelle, il sensore è suddiviso in tante regioni affiancate come piastrelle che ricoprono un pavimento ed ogni regione acquisisce dati riferiti ad una determinata lunghezza d'onda.

Le telecamere iperspettrali, invece, funzionano come telecamere lineari per quanto riguarda la modalità di osservazione degli oggetti inquadrati, ma ritornano per ogni singola linea scansionata un'immagine matriciale in cui sono presenti tutti i valori dello spettro. Per ottenere ciò, si utilizzano elementi interni tra ottica e sensore che permettono di convogliare la luce proiettata dall'oggetto acquisito verso un elemento che diffonde lo spettro di luce sul sensore matriciale.

## 5. TELECAMERA IPERSPETTRALE

Una telecamera iperspettrale è in grado di acquisire un'immagine e, per ciascun pixel, lo spettro relativo simultaneamente, generando quello che comunemente viene chiamato "cubo di dati", combinando dunque Imaging e Spettroscopia. Il "cubo di dati" è costituito da una serie di fotogrammi, ognuno dei quali è una linea immagine che viene dispersa in lunghezza d'onda e acquisita dal sensore. Il sensore acquisisce, quindi, le informazioni spettrali linea per linea, mentre le informazioni spaziali vengono ricostruite via software a partire da quelle spettrali. I dati forniti dall'immagine iperspettrale, infatti, sono chiamati data cube perché sono tridimensionali. Le telecamere iperspettrali, nonostante utilizzino sensori matriciali, sono a tutti gli effetti dei Linescan e, quindi, necessitano della scansione per acquisire un'intera scena.

Alla base dei sistemi di telerilevamento iperspettrale vi è la proprietà fisica degli oggetti di emettere o riflettere radiazione su varie bande, oltre a quella visibile, con intensità variabile in funzione delle proprie caratteristiche chimico-fisiche. I sistemi di ripresa e analisi iperspettrali rappresentano una tecnica dalle grandi potenzialità, dato che il poter ottenere lo spettro completo in ogni punto dell'immagine acquisita, significa avere una grande quantità di informazioni accurate.

I radiometri iperspettrali misurano la radiazione riflessa in molte bande strette e contigue, ovvero per ogni banda di misura è acquisita una immagine, per ciascuna delle quali un pixel rappresenta la riflettanza, cioè il rapporto tra l'intensità del flusso radiante riflesso e l'intensità del flusso radiante incidente, ad una precisa lunghezza d'onda, della regione di un oggetto vista da quel pixel.

Dall'analisi dei dati raccolti dal sensore iperspettrale, anche mediante la combinazione dei dati acquisiti su diversi canali, si possono elaborare immagini in falsi colori rappresentative delle caratteristiche delle superfici indagate.

Ogni pixel dell'immagine spettroscopica contiene uno spettro composto da un elevato numero di bande, in radianza o riflettanza, che può essere utilizzato per caratterizzare gli oggetti nella scena con grande precisione e di dettaglio.

Queste immagini permettono di studiare l'interazione della luce con i materiali e di riconoscerli in base alle loro firme spettrali.

I sistemi iperspettrali, generalmente, sono realizzati seguendo uno schema piuttosto semplice, associando ad una camera digitale con un detector bidimensionale uno spettrografo ad immagine, proponendo così uno strumento in grado di caratterizzare sia la distribuzione spettrale sia quella spaziale della radiazione proveniente dalla superficie osservata. La configurazione prevede un'ottica rifrattiva standard per focalizzare l'immagine della scena osservata e, in corrispondenza del piano focale di tale ottica, la sezione di ingresso dello spettrografo, costituita da una stretta fenditura. Lo spettrografo, quindi, scompone la radiazione focalizzata sulla fenditura nelle sue componenti spettrali, disperdendo quelle nella banda di interesse secondo la direzione ortogonale a quella di sviluppo della fenditura. L'immagine formata sul detector, posto all'uscita dello spettrografo, è rappresentativa della distribuzione di radianza, che descrive la quantità di radiazione elettromagnetica riflessa o trasmessa da una superficie di area unitaria, e diretta verso un angolo solido unitario in una direzione indicata, lungo la direzione di sviluppo della fenditura e della relativa composizione spettrale nella direzione perpendicolare. L'allineamento del detector, ovvero della camera, con lo spettrografo, richiede un'attenta calibrazione delle due parti e, consente, quindi, di associare a righe e colonne delle immagini acquisite il significato di asse di risoluzione spaziale e spettrale dello strumento.

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 di riflettanza.

L'imaging iperspettrale, quindi, aumenta notevolmente la capacità di classificare gli oggetti nella scena in base alle loro proprietà spettrali. Una singola immagine iperspettrale può essere rappresentata come un cubo di dati in cui le informazioni spaziali sono raccolte sul piano X-Y e le informazioni spettrali sono rappresentate lungo l'asse Z. Un cubo iperspettrale è costituito da un insieme di immagini a strati uno sopra l'altro. Ogni immagine rappresenta una particolare banda di lunghezze d'onda e in un'immagine iperspettrale, ogni pixel è costituito da uno spettro su una regione spettrale appropriata. Ogni oggetto ha una caratteristica unica tra le diverse bande di lunghezza d'onda. Questa caratteristica unica è la sua firma spettrale. Per esempio, confrontando la firma spettrale di "oggetti target" sconosciuti con quella di sostanze note, la composizione chimica dell'"oggetto target" può essere identificata. La tecnica dell'imaging iperspettrale consente non solo l'identificazione di oggetti, ma anche la loro classificazione e quantificazione con elevato grado di precisione.

Esistono diversi sensori iperspettrali, diversificati in base alle lunghezze d'onda che ricoprono:

- VNIR: Luce visibile + infrarosso (400-1000  $\mu\text{m}$ )
- NIR: Infrarosso vicino (900-1 700  $\mu\text{m}$ )
- SWIR: Infrarosso a lunghezza d'onda corta (1 000 - 2 500  $\mu\text{m}$ )
- MWIR: Infrarosso a media lunghezza d'onda (2,7 - 5,3  $\mu\text{m}$ )
- LWIR: Infrarosso a lunghezza d'onda lunga (1 000 - 2 500  $\mu\text{m}$ )

I sensori iperspettrali rappresentano un vantaggio rispetto ai sensori multispettrali nella loro capacità di identificare e quantificare l'assorbimento molecolare. L'elevata risoluzione spettrale di un riproduttore d'immagini iperspettrale consente di rilevare, identificare e quantificare i materiali di superficie, nonché di dedurre processi biologici e chimici.

## 5.1 HYPERSPECTRAL IMAGING

Le tecniche di monitoraggio e controllo basate sull'analisi d'immagine hanno ottenuto un grande successo nel campo della ricerca, in quanto sono in grado di caratterizzare morfologia e morfometria di campioni eterogenei. Un sistema di imaging classico si basa su immagini RGB. Una immagine RGB, che è formata da un certo numero di elementi chiamati pixel, è definita dalla combinazione di tre colori che miscelati tra di loro forniscono quasi tutto lo spettro dei colori del visibile: rosso, tra 622nm e 780nm, verde, tra 492nm e 577nm e blu, tra 455nm e 492nm. Per alcune applicazioni, però, sono necessarie informazioni che vanno oltre il campo del visibile. Laddove è

necessario analizzare anche l'aspetto chimico-fisico di un campione si può ricorrere all'utilizzo di sistemi di imaging iperspettrale. L'HyperSpectral Imaging, HSI, combina l'analisi di immagine digitale con la spettroscopia convenzionale, consentendo l'acquisizione simultanea di informazioni spettrali e spaziali. Mentre un sistema di imaging RGB restituisce i valori di intensità dei tre canali R, G e B per ciascun pixel di un'immagine, i sistemi HSI consentono l'acquisizione di più immagini, attraverso la campionatura di più canali a differenti lunghezze d'onda. Con le tecniche di spettroscopia convenzionale si può misurare un solo spettro su una superficie, nel caso in cui il contributo di un determinato composto analizzato sia trascurabile; mentre con tecniche di imaging iperspettrale, non solo si può rilevare la presenza del campione in analisi, ma lo si può anche localizzare spazialmente.

L'applicazione di tecniche HSI, infatti, comporta l'utilizzo di computer con elevata capacità di calcolo e di archiviazione, dato che un'immagine iperspettrale essendo molto informativa, solitamente contiene molti spettri e, quindi può arrivare a pesare gigabytes. L'acquisizione di un'immagine iperspettrale, inoltre, richiede molto più tempo all'acquisizione di un'immagine digitale con una normale fotocamera. In genere, per specifiche applicazioni vengono selezionate solamente le bande maggiormente informative, velocizzando così il sistema e rendendolo efficiente. In questo contesto, la chemiometria gioca un ruolo di fondamentale importanza per risolvere problemi concernenti la selezione delle bande spettrali più significative e per lo sviluppo di sistemi efficienti per la visualizzazione dei dati acquisiti.

In base alla modalità di acquisizione delle immagini iperspettrali, i sistemi HSI possono essere suddivisi in 3 categorie differenti: whiskerbroom, pushbroom e staredown. Nella configurazione whiskerbroom, detta anche configurazione point mapping, il campione viene posto su uno stage e viene spostato in posizioni predefinite, acquisendo uno singolo spettro in corrispondenza di ciascuna posizione. La configurazione pushbroom, invece, detta anche line imaging, consente di acquisire l'ipercubo di dati in maniera più veloce rispetto alla configurazione whiskerbroom. La configurazione pushbroom consente di acquisire tutti i dati spettrali di tutti i pixel, ad una determinata posizione. I dati 2D, dimensione spaziale e dimensione spettrale, acquisiti per ciascuna linea, spostando il campione, vengono concatenati insieme per formare l'ipercubo.

In questa tecnica, la firma spettrale di un pixel per le molte migliaia di pixel in una linea spaziale, detta swath, attraverso l'area target, viene registrata al momento. La seconda dimensione spaziale è costruita nel tempo registrando un passaggio dopo l'altro. La tecnica "push-broom" permette l'acquisizione simultanea di tutte le bande spettrali. Le tre componenti principali di una camera iperspettrale "push-broom" sono un sensore 2D, detector array, uno spettrografo per imaging, un obiettivo e, si ha che l'ottica anteriore cattura l'immagine della luce riflessa da un segmento di linea del campione target sulla fenditura d'ingresso dello spettrografo, questa luce viene dispersa in diverse lunghezze d'onda dai reticoli all'interno dello spettrografo e la luce dispersa è catturata dal sensore come immagine bidimensionale  $[X, \lambda]$ . Per catturare l'intera immagine, occorre effettuare istantanee di ogni linea in tutta l'"area target". Sincronizzando il movimento tra la camera, l'oggetto target e l'acquisizione, si possono catturare diverse linee dell'oggetto e quindi generare l'ipercubo  $[X, Y, \lambda]$  dove  $Y$  rappresenta la seconda dimensione spaziale. Tra i vantaggi della tecnica "push-broom" c'è quello di ridurre il carico di illuminazione, infatti ogni linea dell'area target deve essere illuminata una per volta. Ciò riduce moltissimo il carico termico sul campione rispetto ad altre tecniche di imaging. I sistemi HSI push-broom sono ideali per misure online con oggetti in movimento.

Nella configurazione staredown, infine, l'ipercubo viene generato concatenando le immagini 2D acquisite per ciascuna lunghezza d'onda. Nella configurazione staredown, a differenza delle altre due, il campo di vista viene mantenuto fisso e non sono previste parti in movimento. Lo scopo principale dell'analisi d'immagine iperspettrale è di solito quella di ridurre le dimensioni mantenendo al contempo informazioni sufficienti per classificare e/o quantificare dal punto di vista chimico-fisico le aree di un campione. L'analisi di dati iperspettrali si basa su tecniche che combinano il signal processing, l'imaging processing e la spettroscopia.

Per analizzare un'immagine iperspettrale si parte dai dati grezzi dell'ipercubo, dai quali è necessaria una fase di preelaborazione dati per rimuovere variazioni non desiderate dalle informazioni spettrali e per preparare i dati per ulteriori elaborazioni. Alcuni detector iperspettrali, infatti, tendono ad avere problemi di pixel morti o spikes. Questi artefatti devono essere individuati ed esclusi dalle successive analisi.

Per calibrare un modello, si possono utilizzare delle determinate porzioni dell'immagini, quindi dei sottoinsiemi di spettri, detti ROI, Region of Interest. In alternativa possono essere utilizzati algoritmi che scelgono gli spettri all'interno dell'intero dominio spaziale in maniera casuale, ad esempio, utilizzando l'algoritmo di Kennard e Stone. In questo caso, sarà necessario far attenzione ad aver rimosso eventuali outliers.

Nelle applicazioni spettroscopiche, le differenze in scala sono dovute prevalentemente ad effetti di scattering, cioè a variazioni ambientali che influenzano la fonte illuminante e/o interferiscono con il detector. I metodi di normalizzazione del campione tentano di correggere questi tipi di effetti, identificando alcuni aspetti di ciascun campione che dovrebbero essere essenzialmente costanti da un campione all'altro e correggendo il ridimensionamento di tutte le variabili in base a questa caratteristica. Il pre-processing Normalize, cioè la pre-elaborazione dei dati, è una tecnica di data mining, che consiste nella manipolazione di dati grezzi in un nuovo formato maggiormente comprensibile. Si utilizzano differenti metodi di calcolo, come ad esempio il 1-Norm, in cui si normalizza, quindi si divide ciascuna variabile per la somma del valore assoluto di tutte le variabili del campione ed, il 2-Norm in cui si normalizza per la radice quadrata della somma dei valori al quadrato di tutte le variabili di un dato campione.

## 5.2 GLARE OTTICO NELLE IMMAGINI IPERSPETTRALI

Il glare è un fenomeno di trasporto della luce che si verifica a causa della riflessione e dello scattering della luce nelle componenti ottiche e nella struttura dei sensori dei sistemi di acquisizione. Questo fenomeno porta alla diminuzione delle prestazioni in termini di range dinamico del sensore stesso ed, a una perdita di contrasto nelle immagini acquisite. Quando si verifica il fenomeno di glare, il segnale luminoso acquisito in un punto a fuoco, invece di limitarsi al punto, si diffonde in una regione più ampia, aumentando l'intensità del segnale dei pixel vicini con una intensità che diminuisce con la distanza dal punto considerato. A seguito di questo fenomeno, il valore di ogni pixel delle immagini acquisite è la somma dell'effettivo segnale della scena e del veiling glare totale, dato dal contributo di tutti i punti della scena, sia all'interno che all'esterno del campo di acquisizione del sensore.

Il veiling glare ottico è presente anche nelle immagini acquisite dalle camere iperspettrali e si conferma essere indipendente dal tempo di esposizione impiegato.

Il glare è un fenomeno sempre presente, perché quando la radiazione elettromagnetica attraversa la superficie tra due mezzi caratterizzati da diversi indici di rifrazione, come i diversi materiali che costituiscono le componenti ottiche e la struttura stessa del sensore, parte dell'onda viene rifratta e parte viene riflessa. Come conseguenza di questi fenomeni, le informazioni sulla luce di un punto a fuoco, invece di contribuire solamente ad un singolo pixel dell'immagine, si diffondono su una regione finita, aggiungendo segnale ai pixel vicini, con un'intensità che diminuisce con la distanza dal punto considerato. Questo fenomeno si traduce nel fatto che i valori di radianza acquisiti sono diversi da quelli attesi. Il glare è una funzione della distanza tra i punti di scattering e di ricezione. Il glare in un pixel è la somma dei singoli contributi di luce riflessa e rifratta da tutti gli altri pixel. Dal momento che la quantità di glare in un punto è la somma della quantità di luce diffusa da ogni altro punto, la quantità di glare è diversa per ogni punto dell'immagine. Non è una maschera uniforme applicata all'intera scena, ma varia spazialmente all'interno dell'immagine in base alla distribuzione locale e globale della luce nella scena posta di fronte al sensore.

La possibilità per un sensore di registrare un'immagine ad alta gamma dinamica, HDR, quindi, è limitata dalla presenza del glare, poiché gli oggetti chiari tendono a ridurre il contrasto nelle aree più scure. In generale, maggiore è il range dinamico del segnale d'ingresso, maggiore è l'effetto del glare sulle aree più scure. Esistono delle tecniche di progettazione di ingegneria ottica, quali, ad esempio, rivestimenti neri delle superfici interne, rivestimenti antiriflesso delle lenti e deflettori che bloccano le fonti di luce al di fuori del campo di acquisizione del sensore, che contribuiscono a ridurre la quantità di glare, ma non lo eliminano. Questa aggiunta indesiderata di luce diffusa non può essere rimossa da un'immagine acquisita. La rimozione del glare è un problema di non linearità, di perdita di informazioni o dell'incertezza del modello oculare. Il veiling glare ottico, quindi, sulle misure effettuate con un sensore iperspettrale determina errori di acquisizione.

## 5.3 CHEMICAL COLOUR IMAGING

Il Chemical Colour Imaging, CCI, è un caso speciale di imaging iperspettrale nel quale le proprietà chimiche sono d'interesse.

La camera iperspettrale utilizza un sensore sensibile alla luce, alle lunghezze d'onda della parte visibile e a quella parte di spettro oltre il visibile, cioè vicino all'infrarosso. È possibile, inoltre, focalizzare l'analisi a specifici intervalli e ricercare eventuali informazioni peculiari dell'interazione luce-materia. Tale camera scatta, infatti, centinaia di foto separate in lunghezza d'onda di intervalli molto stretti, chiamati anche bande, larghi circa 4

milionesimi di millimetro. L'oggetto potrà essere analizzato, quindi, in centinaia di immagini diverse prese dalla stessa angolazione: ciascuna differirà, o meno, dalle altre a causa della composizione chimica dell'oggetto stesso. Determinati elementi o composti chimici assorbono, infatti, la radiazione in modo diverso, e dunque modificheranno lo spettro in modo caratterizzante. La potenza della tecnologia iperspettrale non è vincolata all'intervallo di lunghezza d'onda, cioè, camere diverse e sensori interni diversi possono rilevare radiazioni diverse. Per questo tale tecnologia innovativa trova applicazioni in vari ambiti, dal geologico al biomedicale, dal settore agricolo a quello alimentare, senza escludere l'investigazione forense.

Le camere iperspettrali sono speciali telecamere che combinano la spettroscopia ottica alle tecniche di misura e d'analisi, basate sull'imaging classico.

Un'invenzione israeliana permette di rilevare le immagini iperspettrali e le cellule tumorali grazie all'analisi delle informazioni ottenute a diverse lunghezze d'onda sullo spettro elettromagnetico.

Grazie al campionamento compressivo, un software è in grado di minimizzare la raccolta di dati ridondanti durante la cattura delle immagini. Questo rende la fotocamera più veloce e capace di creare immagini spettrali di ottima qualità.

Il vantaggio principale dell'imaging iperspettrale è che, poiché viene acquisito un intero spettro in ciascun punto, l'operatore non ha bisogno di alcuna conoscenza preliminare dell'oggetto d'analisi e il post-processing consente di estrarre tutte le informazioni disponibili dal set di dati. L'imaging iperspettrale può anche trarre vantaggio dalle relazioni spaziali tra i diversi spettri, consentendo modelli spettrali-spaziali più elaborati per una segmentazione e classificazione più accurata dell'immagine.

## 6. LA LUCE IN FOTOGRAFIA

La **luce** in fotografia è l'elemento più importante. Senza di essa è praticamente impossibile fare fotografia, perché quello che si cattura con la fotocamera è la luce riflessa dal mondo circostante.

Il termine luce deriva dal latino "lux" e si riferisce a quella porzione di spettro elettromagnetico percepibile dall'occhio umano. Questo spettro è compreso tra le lunghezze d'onda che vanno da circa 400 a 720 nanometri. Queste differenti lunghezze d'onda vengono interpretate dal cervello sotto forma di colori, che vanno dal rosso per le lunghezze d'onda più ampie, cioè le frequenze basse, fino al violetto per le lunghezze d'onda più brevi, ovvero le frequenze alte. La somma di tutte le frequenze produce la luce bianca. Al di fuori dello spettro visibile all'occhio umano ci sono gli infrarossi per le basse frequenze, e gli ultravioletti per le alte frequenze.

Quando la luce colpisce il mondo circostante, viene in parte assorbita ed in parte riflessa. Alcuni oggetti trattengono determinate frequenze e ne riflettono altre. Proprio le frequenze riflesse sono quelle che determinano il colore di un determinato oggetto o superficie. Se un oggetto assorbe tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico allora il suo colore risulterà nero, viceversa se lo riflette tutte sarà bianco.

La temperatura colore della luce in fotografia ha un impatto profondo sul risultato finale di un'immagine. Infatti, mentre l'occhio umano ha la capacità di adattarsi naturalmente alle diverse colorazioni della luce, la fotocamera ha bisogno di una corretta regolazione per interpretare la luce nel modo giusto. Per questo motivo le fotocamere digitali hanno la funzione specifica del bilanciamento del bianco. Se il bilanciamento del bianco non è impostato correttamente, la foto presenterà una dominante di colore. A seconda che la reale temperatura della luce sia più o meno alta rispetto alla regolazione effettuata, assumerà una dominante arancione o azzurra.

La luce assume una colorazione diversa a seconda della fonte che la emette. Questa colorazione viene misurata in gradi Kelvin, che definiscono lo spettro cromatico della luce. La scala dei gradi Kelvin definisce fredda la luce dalla colorazione giallo/arancio, cioè a 2000K e, calda quella tendente all'azzurro, ovvero a 12000K.

### *Tabella del bilanciamento del bianco*

<u>FONTE LUMINOSA</u>	<u>TEMPERATURA COLORE [K]</u>
Candela	1500
Lampada ad incandescenza	2750 - 3000 in base alla potenza della lampadina
Lampada al quarzo	3200 - 3500
Sole diretto	5000 - 5500

Flash	5400 - 5500
Cielo nuvoloso	6000 - 7000
Ombra	8000

Il bilanciamento del bianco è necessario, perché a differenza del cervello umano, che è bravo a correggere i colori e, quindi, per esempio, se la bandiera italiana fosse illuminata da una luce colorata, riconoscerebbe che la banda centrale è bianca, per le macchine fotografiche non è così. Tramite il bilanciamento del bianco, quindi, si dice alla fotocamera che ha registrato un'immagine sfruttando la luce disponibile, che cosa deve considerare bianco e utilizzarlo come riferimento per gli altri colori. Con il bilanciamento del bianco si va, quindi, a correggere i colori registrati dalla fotocamera.

## 6.1 TIPOLOGIE DI LUCE IN FOTOGRAFIA

La luce è composta da un'energia che dà origine a molte tipologie di fonti luminose, sia artificiali sia naturali e, che viaggiando alla velocità di 300.000 km/s si propaga in tutte le direzioni. La quasi totale mancanza di direzione rende quasi inesistenti le ombre, questo aiuta nella valutazione di un'esposizione corretta, ma riduce drasticamente il contrasto, facendo così diventare gli scatti, piatti, come nel caso di un'illuminazione frontale.

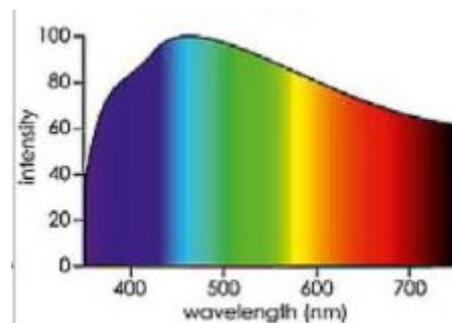
La luce naturale è quella proveniente dal sole e quella più difficile da gestire, dato che cambia rapidamente direzione, intensità e colore. I momenti migliori per fotografare sono al mattino presto o la sera poco prima del tramonto. In questi momenti, la luce è più morbida e proviene da un'angolazione laterale, esaltando le forme e la profondità. Inoltre, assume una colorazione arancio/rosso dal quale prende il nome la golden hour o l'ora d'oro.

Durante le ore centrali del giorno, invece, si va incontro ad una luce molto intensa, dura, che produce ombre nette e quindi contrasti molto elevati.

La luce diretta appiattisce tutto e non dona tridimensionalità.

Se si scatta in presenza di nuvole la situazione cambia, perché le nuvole fanno da grande diffusore di luce rendendola più morbida. Più grande è la fonte di luce rispetto al soggetto, più morbida risulta la luce. La luce diffusa crea ombre morbide, con un passaggio graduale dalle zone chiare a quelle scure e dona tridimensionalità agli oggetti.

La luce in fotografia può essere scomposta nei suoi colori fondamentali per mezzo di un prisma, ottenendo quindi tanti fasci di colore differente. La luce solare è caratterizzata dall'aver lo spettro d'intensità più completo, cioè continuo e con un buon contributo in tutte le lunghezze d'onda.



Img. 10 Spettro luce solare

Per quanto riguarda la luce artificiale, la si può distinguere in due categorie: la luce continua, che dura nel tempo e, la luce flash, di forte intensità e di durata molto breve. L'utilizzo della luce artificiale è vantaggioso, dato che, si ha il controllo totale della luce in termini di intensità, direzione, temperatura colore, diffusione, ecc., e, inoltre, la luce artificiale permette di scattare in situazioni in cui non si ha luce naturale.

Il vantaggio della luce continua, rispetto a quella flash, è il fatto di poter vedere in tempo reale l'effetto che ha sulla scena che si sta riprendendo, così da poter correggerne l'impostazione prima di iniziare a scattare. Uno svantaggio, invece, è che spesso occorrono grandi potenze per ottenere la luce necessaria, con conseguente consumo di energia elettrica e grande produzione di calore. La luce flash, invece, è quella che più si avvicina alla temperatura colore della luce diurna.

La luce mista, invece, è data dalla presenza di entrambe le fonti di illuminazione e, ciò può creare delle difficoltà in termini di bilanciamento del bianco, perché le luci nella scena hanno temperatura colore diversa.

## 6.2 LA QUALITA' DELLA LUCE IN FOTOGRAFIA

La qualità della luce è la sua capacità di rendere fedelmente i colori.

La luce bianca può essere ottenuta con spettri molto differenti fra loro, che, però, influenzano la resa del colore. Dagli esperimenti di scomposizione della luce con il prisma che furono compiuti da Isaac Newton a metà del 1600, si è visto che la comune luce bianca sia in realtà una miscela di tante luci colorate.

Spettri palesemente disuniformi sulle varie bande di frequenza portano a una percezione e, soprattutto, ad una registrazione dei colori non corretta e non correggibile. Ogni sorgente luminosa influisce sulla percezione del colore.

Il metodo per misurare e valutare la qualità della luce è il Color Rendering Index. Il CRI è l'indice di resa cromatica di una sorgente luminosa che aiuta a misurare la qualità della luce e viene ottenuto analizzando quanto appaiano naturali i colori degli oggetti da essa illuminati. Il CRI viene calcolato misurando lo scostamento delle coordinate cromatiche di alcuni campioni colore illuminati dalla sorgente in esame confrontate con quelle rilevate sotto una sorgente di riferimento ed, è espresso con un valore compreso fra 0 e 100,

Se, passando dalla sorgente campione a quella in esame, la misurazione del campione non varia, l'indice di resa cromatica per quello specifico colore è pari a 100. Ciò significa che la sorgente luminosa analizzata è adatta a riprodurre correttamente oggetti di quella tinta.

### 6.3 LA DIREZIONE DELLA LUCE

A seconda della direzione della luce, si ottiene un risultato completamente diverso tra una fotografia e l'altra, quindi per illuminare le scene nel modo corretto bisogna prendere in considerazione la direzione dell'illuminazione. Le direzioni della luce sono distinte in tre categorie: la luce frontale, che appiattisce il soggetto e nasconde le ombre, la luce posteriore, o controluce, che crea contrasto e, la luce laterale che dona tridimensionalità al soggetto, ma può creare le ombre, allungandole. Con la luce frontale occorre stare attenti agli effetti che possono crearsi con materiali lucidi o riflettenti.

### 6.4 LE PROPRIETÀ DELLA LUCE

Gli unici due ingredienti di una fotografia sono la luce ed il colore. La luce trasporta energia e, in certe condizioni si comporta come una particella, in altre, come un'onda.

Dal punto di vista fotografico, le proprietà della luce sono la quantità e la qualità di luce che colpisce il soggetto, il colore della luce e la sua direzione di provenienza. La luce viaggia solo in linea retta, ma può essere reindirizzata mediante un riflettore. In questo caso la luce può essere anche colorata, utilizzando un riflettore di colore non neutro.

La colorimetria RGB si può definire additiva, dato che tutti i colori sono ottenuti dalla somma dei tre colori primari. Il nero si forma dalla totale assenza di tali colori, mentre il bianco dalla somma di tutti e tre. Ciascun colore ha una possibilità di variazione di 255 "gradini". Il modello RGB funziona sulle fotocamere e monitor in cui si aggiunge luce al nero per creare il colore, a differenza delle stampanti che usano il ciano, il magenta, il giallo e il nero, CMYK, per creare tutti gli altri colori. Questi colori sono denominati colori primari sottrattivi, dato che partendo dal bianco che contiene tutti i colori, gli si sottrae determinate bande per ottenere il colore desiderato.

### 6.5 LAMPADE

La lampadina ad incandescenza ha indici di resa cromatica ottimi, a dispetto di uno spettro ben diverso da quello solare, anche a causa della più bassa temperatura colore, di circa 3000K. Gli indici di resa cromatica sono simili a quelli della luce solare, infatti, il filamento è un corpo incandescente, proprio come il sole.

Le lampade fluorescenti hanno la temperatura colore "daylight", simile a quella solare, ma dallo spettro si vede che sono diverse dalla luce solare e dalla lampadina. A differenza delle quali, infatti, le lampade fluorescenti hanno uno spettro non continuo, caratterizzato da picchi, generati dai fosfori impiegati, che sono alla base di questa tecnologia. Le lampade a fluorescenza, quindi, sono state soppiantate dai LED.

### 6.6 SPETTRI DI LUCE

Lo spettro elettromagnetico, in fisica, indica l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche, suddivisibili convenzionalmente in varie bande di frequenza. Le radiazioni elettromagnetiche sono generate dalla vibrazione di campi elettrici e magnetici che si propagano nello spazio alla velocità della luce. Le singole radiazioni sono caratterizzate da una frequenza di vibrazione, misurata in Hz, cioè in cicli al secondo e, da una lunghezza d'onda associata, misurata in metri.

Lo spettro luminoso è l'insieme dello spettro di emissione, che indica quali lunghezze d'onda sono emesse dalla sorgente e la loro energia e di quello di assorbimento. L'assorbimento selettivo dei colori avviene, per esempio,

quando l'acqua assorbe la luce molto velocemente, in quanto è circa 800 volte più densa dell'aria. La luce che penetra all'interno dell'acqua modifica la sua intensità luminosa e la sua composizione spettrale per effetto di diversi tipi di assorbimento.

I colori sono le singole lunghezze d'onda dello spettro visibile. La saturazione di un colore è il livello di purezza del colore in una data scena, cioè la situazione per cui il colore non è diluito con il bianco o con il nero. In fotografia, la sottoesposizione intenzionale di circa  $\frac{1}{2}$  stop o l'uso di un filtro polarizzatore possono aumentare la saturazione dei colori.

Per una completa descrizione dell'onda elettromagnetica vengono utilizzati tre parametri: la lunghezza d'onda  $\lambda$ , la frequenza  $\nu$  e l'ampiezza  $A$ . La lunghezza d'onda è la distanza tra due picchi consecutivi, spesso misurata in micrometri [ $\mu\text{m}$ ], mentre la frequenza corrisponde al numero di picchi passanti per un medesimo punto in un certo intervallo di tempo, ed è espressa generalmente in Hertz [Hz]; infine, l'ampiezza equivale all'altezza del picco dell'onda, perciò pari al contenuto energetico. A questo riguardo si parla di irradianza, misurata in [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Dal prodotto della lunghezza d'onda e della frequenza si ottiene la velocità di propagazione dell'onda, espressa in [ $\text{m}/\text{s}$ ]. Dalla distribuzione continua dell'energia elettromagnetica in funzione della lunghezza d'onda, o della frequenza, invece, si ottiene lo spettro elettromagnetico, il quale è infinito e continuo. L'energia trasportata dalla radiazione è quindi dipendente da tali grandezze: all'aumentare della lunghezza d'onda vi è una riduzione della frequenza, e quindi una diminuzione del contenuto energetico.

Parlando di luce in fotografia, si ha inoltre a che fare con termini come intensità e contrasto. L'intensità è la quantità di luce che illumina il soggetto fotografato. Essa varia in rapporto alla sua vicinanza e grandezza, intesa come fascio di luce. L'intensità della luce che raggiunge un soggetto aumenta man mano che ci si avvicina, quindi raddoppia al dimezzarsi della distanza, oppure diminuisce se il fascio di luce viene allargato.

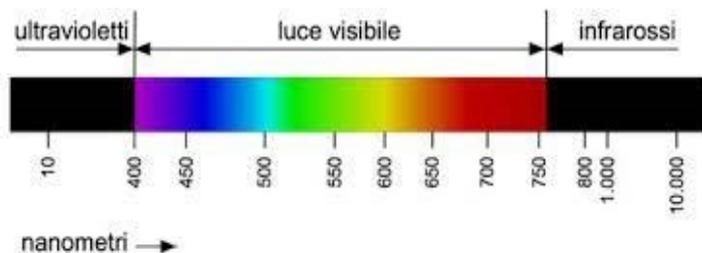
Il contrasto di illuminazione è dato dalla differenza tra la luce ricevuta dalle zone più illuminate del soggetto, e le zone di ombra più profonda. Uno scatto molto contrastato, quindi, è caratterizzato da grosse differenze di illuminazione.

La luce solare appare all'occhio umano come se fosse bianca, o per meglio dire incolore, perché composta di uno spettro comprensivo di molte lunghezze d'onda.

La lunghezza d'onda della luce visibile nell'aria va indicativamente dai 400 ai 750 nm; corrispondenti alle lunghezze d'onda in altri mezzi, come l'acqua, che diminuiscono proporzionalmente all'indice di rifrazione. In termini di frequenze, lo spettro visibile varia tra i 430THz, il rosso scuro ed, i 770THz, il violetto.

Le lunghezze d'onda inferiori a 400nm sono identificate come ultraviolette, meglio definite con i termini UVA - UVB - UVC; quelle invece maggiori a 700nm sono gli infrarossi.

Banda	Intervalli	
	$\lambda$ (nm)	f (THz)
Ultravioletto		
UVC	100-280	2997-1067
UVB	280-320	1067-934
UVA	320-390	934-769
Visibile		
Violetto	390-455	769-659
Blu	455-492	659-610
Verde	492-577	610-520
Giallo	577-597	520-503
Arancio	597-622	503-482
Rosso	622-760	482-384
Infrarosso		
IRA	760-1400	384-214
IRB	1400-3000	214-100
IRC	3000-16000	100-3



Img. 11 Spettro elettromagnetico

L'occhio umano presenta in media la sua sensibilità massima attorno alla lunghezza d'onda di 556 nm, circa 540THz, dello spettro elettromagnetico, corrispondente al colore giallo citrino. I colori che si riescono a vedere compongono lo spettro cromatico, formato solo da colori puri, quindi non conterrà il nero, il bianco e il grigio, che, mescolandosi fra loro, creano tutte le tonalità.

## 7. LENTI E SPECCHI

Le lenti e gli specchi sono tra i principali strumenti che costituiscono i sistemi ottici utilizzati per convogliare la luce all'interno degli strumenti di misura. Le superfici che la luce incontra sono dette catottriche, o specchi, quando su di esse avviene principalmente riflessione. La maggior parte degli specchi comuni sono costruiti depositando su un vetro una sottile lamina di alluminio o argento, i quali riflettono molto bene le lunghezze d'onda del visibile. E' possibile costruire specchi di piccole dimensioni di forme diverse.

Una lente, invece, è costituita da uno o più mezzi, il più possibile trasparenti, attraversati dalla luce che viene rifratta. Si distinguono secondo la curvatura delle due superfici. La ricostruzione delle immagini da parte delle lenti non è perfetta, in generale più l'apertura è grande, o più ci si discosta da un'ottica parassiale, più l'immagine sarà distorta. L'apertura definisce l'angolo di accettazione entro il quale uno strumento è in grado di raccogliere la luce, il quale solitamente è dato dal rapporto tra il diametro della lente e la sua distanza focale. Lavorando con specchi e lenti si ha spesso a che fare con diversi tipi di distorsioni. Tra le distorsioni più importanti vi è l'aberrazione cromatica, derivante dal diverso angolo di rifrazione dei raggi paralleli a diverse lunghezze d'onda, l'aberrazione sferica, dovuta alla diversa focalizzazione dei raggi posti a diversa distanza, l'aberrazione coma, quando un fascio di luce passante per la lente origina una forma a V e l'astigmatismo, che è un errore rifrattivo generato dalla diversa curvatura delle lenti sui piani verticale e orizzontale.

## 8. CALIBRAZIONE RADIOMETRICA

Le immagini rilevate dal sensore iperspettrale sono immagini digitali in cui la scena rilevata viene rappresentata mediante una matrice di pixel, ognuno dei quali è caratterizzato da un numero intero positivo, il DN, Digital Number, che corrisponde alla radianza media dell'area coperta da ciascun pixel. I DN si ottengono da una quantizzazione del segnale elettrico originario, attraverso un processo di conversione del segnale, che li traduce in livelli di grigio o di intensità luminosa. Il numero di sfumature disponibili dipende dalla memoria di ciascun pixel, espressa in bit, che corrisponde alla risoluzione radiometrica del sistema di osservazione.

Ogni pixel costituente l'immagine risulta caratterizzato da tre valori: le due variabili spaziali  $x$  e  $y$ , che individuano la posizione del pixel all'interno dell'immagine e dal DN, correlato all'intensità della radianza al suolo, che indica il valore della sfumatura di colore, o di grigio, assunto da ogni singolo pixel.

Ogni banda spettrale registrata dal sensore ha una funzione di risposta caratteristica per effettuare la conversione analogico-digitale del segnale elettrico.

Un'immagine rilevata da un sensore è quindi una matrice di numeri, che deriva dalla traduzione in valori numerici della quantità d'energia riflessa da un oggetto. Per poter essere tradotti in un'immagine, i DN devono subire un processo inverso di trasformazione dal numerico all'analogico, attraverso il quale è possibile passare dai valori dei pixel della matrice, alla luminosità di visualizzazione sullo schermo.

Nel caso di riprese iperspettrali, si ottengono più immagini, e quindi più matrici, della medesima scena osservata, una per ogni banda rilevata. In tal caso, il pixel dell'immagine può essere considerato come un vettore di valori, composto da tanti DN quante sono le bande spettrali rilevate.

Nelle diverse bande spettrali cambia la risposta a seconda del tipo di superficie e quindi, analizzando la risposta rilevata dal sensore alle diverse lunghezze d'onda, è possibile discriminare una superficie da un'altra.

Quanto più è elevato il numero di bande rilevate dal sensore, tanto più precisa risulterà tale discriminazione.

La calibrazione radiometrica serve ad eliminare le distorsioni del segnale dovute al malfunzionamento del sensore e all'influenza delle condizioni esterne, come atmosfera e illuminazione, al momento dell'acquisizione. L'atmosfera, infatti, così come gli oggetti, può assorbire, riflettere o trasmettere la radiazione elettromagnetica in modo diverso nello spazio e nel tempo e, perciò, costituisce un disturbo che va a scaturire in un errore sui dati raccolti. Nel suo percorso dal bersaglio al sensore, infatti, l'energia elettromagnetica viene interessata da fenomeni legati

alla presenza nell'atmosfera di particelle in sospensione, gli aerosol, che causano l'effetto atmosferico, diminuendo, il valore di radianza originario e quindi andando a compromettere il rilievo della riflettività. L'interazione fra l'onda elettromagnetica e l'atmosfera si compone di due meccanismi principali che agiscono sulla radiazione solare: l'assorbimento, che riduce l'energia dell'onda che arriva sulla Terra trasformandola in calore e, la diffusione o scattering, che cambia la direzione di propagazione dell'onda nello spazio. L'effetto globale di questi due fenomeni è quello di ridurre il flusso radiante incidente. Il fenomeno dell'assorbimento, in particolare, agisce come un filtro selettivo rendendo l'atmosfera opaca in determinati intervalli dello spettro elettromagnetico.

La calibrazione radiometrica delle immagini telerilevate consiste nell'applicare delle procedure per stimare in modo corretto la riflettività dell'oggetto osservato a partire dalla misura di radianza effettuata, operando quindi sui valori di DN ad essa associati. La calibrazione radiometrica di un sensore risulta fondamentale al fine di correlare il segnale osservato alla radianza effettiva che raggiunge il sensore.

L'informazione spettrale rilevata, infatti, non corrisponde esattamente a quella del bersaglio al suolo, perché risente dell'influenza dei pixel circostanti e dell'effetto atmosferico, che comportano un errore sul valore di radianza registrato dal sensore.

Il sensore di una camera iperspettrale misura grandezze elettromagnetiche rappresentative dell'interazione della radiazione con le superfici osservate, poi tradotte nei Digital Number, utilizzati a comporre le matrici dell'immagine digitale. Tuttavia, qualora le immagini iperspettrali debbano essere utilizzate per analisi di tipo quantitativo, è importante che esse siano sottoposte alla calibrazione radiometrica: essa si compone della conversione dei Digital Number in valori di riflettanza. I sensori iperspettrali operano, infatti, nelle regioni dello spettro elettromagnetico in cui le lunghezze d'onda sono principalmente riflesse. Per tale motivo risultano di grande interesse le proprietà riflettenti delle superfici.

Le procedure che consentono di attribuire i valori di radianza dei pixel dell'immagine di partenza ai pixel dell'immagine finale corretta sono comunemente note come tecniche di ricampionamento.

Ciascun Digital Number contenuto nella matrice di pixel è funzione della radianza  $L$ . Tale grandezza viene misurata dal sensore per ogni banda spettrale di acquisizione. Tale funzione viene generalmente assunta come relazione lineare, matematicamente calcolabile tramite la formula  $DN = B + G \cdot L$ , in cui  $B$  e  $G$  rappresentano l'offset e il guadagno. Nel processo di acquisizione dell'immagine mediante un sensore, quindi, il segnale in input è costituito dai valori di radianza  $L$  proveniente dalla scena osservata, mentre il segnale di output è costituito dai valori assunti dai DN all'interno dell'immagine. Tale legge costituisce la base della calibrazione radiometrica, la cui applicazione tende all'eliminazione di tutte le possibili cause di variabilità e influenza sui DN, individuabili nelle caratteristiche del sensore e nelle condizioni esterne di illuminazione. Dato il caso generale di un sensore con visuale dall'alto, il processo che permette di passare da DN a riflettività si basa su più fasi, le quali richiedono un prima conversione da DN a radianza al sensore, poi valutata a terra e così convertita in termini di riflettività. I valori di radianza, infatti, richiedono anch'essi delle correzioni, in quanto ancora influenzati dalla presenza dell'atmosfera e dalle condizioni di illuminazione. I principali fenomeni di interazione tra radiazione e atmosfera riguardano l'assorbimento e la diffusione da parte delle particelle e molecole in essa sospese. Invertendo la relazione matematica, si può ricavare la radianza al sensore in funzione del DN:  $L = DN - B \cdot G = gDN + b$ , in cui i coefficienti  $g$  e  $b$  sono definiti costanti di calibrazione. La riflettività sarà valutata a partire da tale grandezza, tenendo conto delle interazioni con l'atmosfera sopraesposte, eseguendo la correzione atmosferica. Sono disponibili numerose tecniche per la taratura della riflettanza, le quali permettono di passare dai valori di radianza misurati al sensore, o direttamente dai DN, ai valori di riflettanza delle superfici. La conversione da Digital Number a riflettanza la si può svolgere tramite l'applicazione di un particolare metodo empirico, ossia il Metodo di Regressione Lineare. Esso si basa su tre stadi: misurazione dei DN in regioni note, denominate Region of Interest, ROI, di cui siano noti i valori di riflettività nelle varie lunghezze d'onda; poi si individuano le equazioni di calibrazione per ogni banda dalla relazione tra DN e riflettività delle ROI e, infine, si calibra l'immagine in tutte le bande mediante le equazioni sopra definite.

## 9. RIFLETTANZA

La riflettanza, riflettività o albedo, misura, in ottica, la capacità di riflettere parte della luce incidente su una data superficie o materiale. È il rapporto tra l'intensità del flusso radiante riflesso e l'intensità del flusso radiante incidente ed è, quindi, una grandezza percentuale adimensionale.

Sottoposto ad irraggiamento termico o luminoso, ogni corpo ha una determinata proprietà di riflessione, assorbimento e trasmissione sia del calore radiativo, sia della luce. La riflettanza,  $\rho$ , rappresenta il potere riflettente di un corpo sottoposto a irraggiamento. La somma dei parametri di riflettanza ( $\rho$ ), trasmittanza ( $\tau$ ) e assorbanza ( $\alpha$ ) dà sempre 1, ossia:  $\alpha + \rho + \tau = 1$ , in quanto l'intero raggio radiante che giunge sul corpo con la sua energia si frammenta rispettando la legge di conservazione dell'energia in cui una parte è riflessa, una parte è trasmessa ed, una parte è assorbita.

La riflettanza è la traiettoria prodotta da un'onda, che viaggia in un certo mezzo, dopo aver urtato con una superficie piana, chiamata interfaccia. Essa è, perciò, la frazione di flusso luminoso riflesso all'interfaccia fra due mezzi di indice di rifrazione diverso. Essa varia rapidamente con la differenza fra gli indici di rifrazione e ha il valore minimo per incidenza perpendicolare. Il valore che assume la riflettanza per un particolare oggetto dipende dalle caratteristiche della sua superficie. Le superfici molto scure tendono a valori prossimi a 0, mentre le superfici chiare possono arrivare ad avere valori compresi tra 0.7 e 0.85. Per ottenere valori di riflettanza prossima a 1 bisogna eseguire dei trattamenti specifici sull'oggetto che vengono generalmente effettuati per la produzione di riflettori.

La radianza  $L$  è la quantità di radiazione elettromagnetica riflessa da una superficie di area unitaria, e diretta verso un angolo solido unitario in una direzione indicata, misurata su un piano perpendicolare a quest'ultima.

La radianza rappresenta la grandezza fondamentale nel telerilevamento ed è molto utile per quantificare la luce riflessa da un oggetto che viene ricevuta da un sensore rivolto verso di essa. Questa quantità fisica è legata sia alla geometria dell'osservazione, sia alle caratteristiche del sensore  $e$ , permette di descrivere come la radiazione si distribuisce nello spazio.

Ogni oggetto è caratterizzato da una propria capacità di riflessione, assorbimento e trasmissione delle onde elettromagnetiche. Le superfici opache sono caratterizzate da valori di trasmittività  $\tau$  pressoché trascurabili. Considerando che, per la legge di Kirchoff, un corpo con un'alta assorbività avrà anche un'alta emissività, dato che  $\alpha = \epsilon$ , allora  $\rho + \epsilon = 1$ . Per le superfici reali, poichè hanno una forte dipendenza dalla lunghezza d'onda considerata, l'equazione diventa:  $\rho\lambda + \epsilon\lambda = 1$ . Il flusso radiante proveniente da una qualsiasi superficie, quindi, sarà dato principalmente dal contributo dell'energia riflessa ed emessa.

Le modalità con cui una superficie riflette dipendono dalla rugosità della superficie e dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente. La riflettività  $\rho$  permette di definire la firma spettrale di una superficie e quindi di identificarla. La firma spettrale è una curva che indica la capacità di una superficie di riflettere l'energia incidente alle varie lunghezze d'onda. La curva di riflettanza di una superficie dipende dalla posizione della fonte d'illuminazione, dalle condizioni fisico-chimiche e dalla geometria della superficie e del sensore  $e$ , dal punto di vista di quest'ultimo.

In una lente, la riflessione avviene a entrambe le superfici di separazione, quindi le riflettanze si sommano.

La riflettanza dipende in generale debolmente dalla lunghezza d'onda, a meno che si voglia creare una riflettanza massima o minima a certe lunghezze d'onda con strati antiriflesso.

L'assorbimento è il flusso luminoso che viene assorbito dal mezzo a causa di impurezze. L'assorbimento normale è proporzionale allo spessore della lente, alla concentrazione di impurezze  $e$ , abbastanza uniforme su tutte le lunghezze d'onda del visibile, per mantenere i colori naturali.

La trasmittanza, invece, è il rapporto fra il flusso trasmesso dalla lente o dal dispositivo ottico e il flusso incidente.

Un vetro è contemporaneamente trasparente e riflettente. Il flusso luminoso trasmesso è il prodotto del flusso incidente su una faccia del vetro per il coefficiente di trasmittanza.

Il misuratore di riflettanza misura il grado di riflessione inviando un raggio di luce sulla superficie. Successivamente, il riflesso della luce viene confrontato con un nero e un bianco assoluto e, a partire da lì, viene calcolato il grado di riflessione. Ciò che determina la riflettanza di una superficie sono il colore e le caratteristiche di una superficie. Il colore della superficie è importante. Le coperture bianche sono caratterizzate da riflettanza più alta, mentre quelle nere da riflettività più bassa.

L'emissività è la proprietà di radiazione del calore restante che viene irradiato dalla copertura verso l'esterno sotto forma di raggi infrarossi e si esprime in %.

Una copertura altamente riflettente funge da raffrescante passivo grazie alla riflettanza, che permette di mantenere la temperatura più bassa. Diverse superfici riflettono parte della radiazione elettromagnetica incidente in modo differente in funzione delle loro proprietà chimico-fisiche e della lunghezza d'onda. La curva di riflettanza di una superficie varia molto in funzione delle condizioni ambientali e di ripresa.

Attraverso l'analisi del tipo di spettro prodotto da una certa sostanza è possibile risalire alla composizione chimica della sostanza; infatti, lo spettro di emissione funge da firma per ciascun elemento.

## 10. IRRAGGIAMENTO

L'irraggiamento è il trasferimento di energia tra due corpi per mezzo di onde elettromagnetiche.

Se ci si pone di fronte ad una sorgente termica luminosa, si avverte una sensazione di caldo. Tale sensazione è dovuta da una parte alla convezione, in quanto il calore riscalda l'aria circostante e, in parte all'irraggiamento.

L'irraggiamento è uno dei tre modi attraverso cui avviene la propagazione del calore. In particolare, al contrario della conduzione e della convezione, l'irraggiamento non prevede contatto diretto tra gli scambiatori, e non necessita di un mezzo per propagarsi. Quindi è un fenomeno che interessa ogni aggregato materiale e, avviene anche nel vuoto. Questo è giustificato dal fatto che il trasferimento di calore per irraggiamento avviene sotto forma di onde elettromagnetiche.

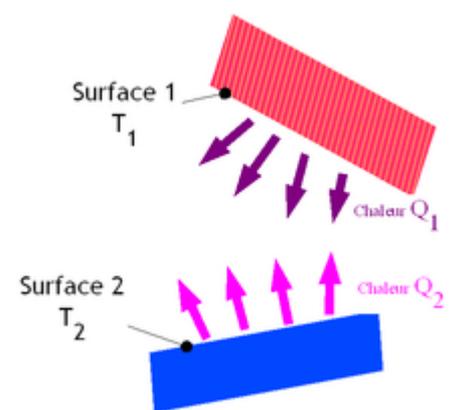
Si ha sia emissione sia assorbimento di radiazione elettromagnetica.

La quantità di calore emessa da un corpo per irraggiamento è infatti proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura; perciò a basse temperature l'irraggiamento è responsabile di una frazione trascurabile del flusso di calore rispetto alla convezione e alla conduzione, ma al crescere della temperatura la sua importanza aumenta rapidamente fino a diventare il principale artefice della trasmissione del calore per temperature medio-alte.

Fisicamente l'irraggiamento consiste nell'emissione di onde elettromagnetiche generate dagli atomi e molecole eccitati dall'agitazione termica, che si diseccitano emettendo fotoni di frequenza proporzionale alla loro temperatura. I corpi a temperatura ambiente, per esempio, emettono in prevalenza fotoni nella gamma degli infrarossi, che per questo sono anche detti *raggi termici*; corpi molto freddi, invece, irradiano microonde, quelli vicini allo zero assoluto semplici onde radio, mentre i corpi molto caldi arrivano ad emettere luce visibile, dapprima rossa, temperatura del *calor rosso*, circa 700 °C, poi sempre più bianca, temperatura del *calor bianco*, circa 1200 °C. Man mano che la temperatura aumenta, la frequenza della luce emessa aumenta fino al bianco-azzurro, per poi passare ai raggi ultravioletti, e ai raggi X nel caso di plasmi stellari a temperature dell'ordine di milioni di gradi.

Il calore scambiato per irraggiamento si trasmette prevalentemente dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore. L'energia, in realtà, si propaga in entrambe le direzioni, ma con minore intensità da quello freddo a quello caldo. Infatti, se un corpo emanasse soltanto e non assorbisse mai energia elettromagnetica, la sua temperatura raggiungerebbe lo zero assoluto e non potrebbe trasmettere calore per irraggiamento.

L'emissione e l'assorbimento dipendono dalla frequenza della radiazione, dalla natura del corpo e da alcune caratteristiche della sua superficie. Un corpo avente una superficie scura è un buon assorbitore e un buon emettitore di calore per irraggiamento.



Img. 12 Scambio termico tra due superfici per irraggiamento.

## 11. PROPRIETÀ OTTICHE DEI TESSUTI

Le proprietà ottiche dei tessuti caratterizzano i fenomeni relativi alle interazioni tra materia biologica e onde elettromagnetiche. Si ha un'onda elettromagnetica quando un campo elettrico ed uno magnetico variano nel tempo e nello spazio. La lunghezza d'onda  $\lambda$  e la frequenza  $\nu$  di un'onda elettromagnetica sono legate dalla relazione seguente:  $c = \lambda\nu$ , dove la costante  $c$ , dal latino "celeritas", indica la velocità della luce, e più in generale di una qualsiasi onda elettromagnetica, nel vuoto e vale  $c=2.998 \times 10^8$  m/s. La frequenza  $\nu$  è inoltre direttamente legata all'energia  $E$  della radiazione elettromagnetica dalla relazione:  $\nu = hE$ , dove  $h=6.626 \times 10^{-34}$  Js è la costante di Planck.

Ordinando le onde per frequenza o per lunghezza d'onda si ottiene lo spettro elettromagnetico, suddiviso in bande che raggruppano onde con determinate proprietà. La banda ottica è la porzione di spettro che copre i gruppi di radiazioni ultraviolette, visibili e infrarosse.

Le radiazioni elettromagnetiche appartenenti a differenti bande frequenziali trovano diverse tipologie di impieghi in campo biomedico. Infatti i raggi  $\gamma$ , data la loro alta frequenza, sono le radiazioni più energetiche tra quelle usate in medicina e si prestano per la sterilizzazione di strumenti e per scopi terapeutici, specialmente in oncologia, dove si usano per bombardare selettivamente tessuti tumorali. I raggi X, invece, sono usati in diagnostica per ottenere immagini radiografiche. La radiazione ottica si usa negli spettrofotometri.

L'ultravioletto trova applicazioni terapeutiche, ad esempio in Laser medici, in trattamenti di precisione ed è usato per la sterilizzazione. L'infrarosso è usato nella termografia ad infrarosso o nell'ossimetria ottica e per fini terapeutici, come la fotocoagulazione. La radiazione a radiofrequenza è utilizzata per fini terapeutici, ad esempio per ablazioni a radiofrequenza.

Da un'analisi cromatica del corpo umano, ad esempio della pelle, la melanina, del sangue, l'emoglobina o, dell'urina, si possono trarre numerose informazioni.

Il colore di un corpo dipende sia dalle proprietà ottiche del corpo sia dalla percezione fisiologica del colore da parte dell'osservatore. Da un punto di vista fisico il colore di un oggetto, che non emetta luce propria, dipende sostanzialmente dalle componenti frequenziali della luce incidente sull'oggetto che sono assorbite da esso.

Alcuni corpi mostrano un determinato colore poiché sono in grado di generare ed emettere luce propria. Ad esempio, corpi ad elevata temperatura, quindi a incandescenza o, di certe reazioni chimiche, come la chemiluminescenza o, di corpi che emettono luce in seguito all'assorbimento di componenti con lunghezza d'onda inferiore a quelle emessa, quindi la fluorescenza o, di corpi che emettono luce non immediatamente dopo l'assorbimento ma con un certo ritardo, ossia con una certa lentezza di emissione, cioè la fosforescenza.

Esistono differenti tipologie di riflessione, come la riflessione speculare, se la lunghezza d'onda della radiazione è molto più piccola delle discontinuità della superficie, sennò si ha una riflessione mista. Nel primo caso il raggio riflesso forma con la normale alla superficie un angolo uguale a quello del raggio incidente. Nel secondo caso il raggio subisce una combinazione dei due effetti: la radiazione viene diffusa, ma mantiene una componente principale lungo la direzione speculare. Sennò, se il raggio viene scomposto e riemesso in più direzioni, indipendentemente dalla sua direzione originale, il fenomeno è definito come il profilo di scattering della superficie.

### 11.1 PROPRIETÀ OTTICHE DEL SANGUE

Il sangue è un tessuto fortemente diffusivo a causa dello scattering, provocato dalle componenti cellulari e pertanto, dipendente dall'ematocrito. Analogamente anche il suo coefficiente di assorbimento dipende dall'ematocrito, essendo in particolare ad esso legato con legge quadratica.

Alcuni valori della profondità di penetrazione nel sangue per  $\lambda=500$  nm in relazione all'ematocrito e alla saturazione di ossigeno sono:

Saturaz O <sub>2</sub> [%]	H [%]	$\delta$ [mm]
100	45	0.060
100	4.5	0.505
40	45	0.067
40	4.5	0.560

Gli spettri dell'emoglobina, o deossiemoglobina e, dell'emoglobina ossigenata, o ossiemoglobina, si incrociano in più punti, detti isosbastici. Si definisce isosbastico un punto corrispondente ad una lunghezza d'onda specifica alla quale due o più specie presentano spettri di assorbimento che si incrociano. Una coppia di sostanze può naturalmente avere più di due punti isosbastici nei propri spettri. **L'ossiemoglobina e la deossiemoglobina hanno punti isosbastici caratteristici a 590 e 805nm.** Si sfrutta la trasmissione di luce a due diverse lunghezze d'onda, rosso e infrarosso, entrambe comprese nelle finestre ottiche della pelle, nella banda frequenziale in cui la pelle presenta scarso assorbimento. Ciò garantisce un'elevata profondità di penetrazione della radiazione utilizzata per raggiungere efficacemente i globuli rossi e quindi l'emoglobina.  $HbO_2$  e  $Hb$  presentano un diverso assorbimento dello spettro della luce. Questa proprietà permette una valutazione non invasiva di  $SO_2$  nel sangue: nelle regioni di luce nel rosso e nell'infrarosso, l'assorbimento è relativamente basso e consente di ottenere una misurazione accurata della trasmissione della luce. Il coefficiente di assorbimento molare dell'emoglobina è definito come il rapporto tra la costante di assorbimento dell'emoglobina e la concentrazione dell'emoglobina. Per una data  $SO_2$  arteriosa si ha un diverso valore della costante di assorbimento del sangue e di conseguenza della trasmissione della luce attraverso il tessuto. L'intensità della luce rilevata dipende da  $SO_2$ .

Per spiegare meglio tale fenomeno è importante capire il modo in cui la luce si propaga attraverso un mezzo e più precisamente attraverso un tessuto biologico. Il meccanismo che permette tutto ciò è chiarito dal concetto di assorbimento di onde elettromagnetiche appartenenti alla regione ottica dello spettro elettromagnetico. In particolar modo, per l'effetto fotoacustico è di particolare interesse la banda degli infrarossi ed, in particolar modo degli infrarossi più vicini al visibile, quelli corrispondenti alla lunghezza d'onda di 700- 2000 micrometri, spesso chiamati con l'abbreviazione NIR, cioè NearInfraRed. L'intervallo di frequenze in cui agiscono i raggi infrarossi può essere associato alla frequenza naturale alla quale atomi e molecole oscilleranno in assenza di un campo magnetico applicato. Quando le radiazioni colpiscono il materiale, l'energia viene trasferita dal campo incidente al sistema e l'agitazione delle molecole aumenta notevolmente. Nonostante la durata dello stato di eccitamento duri circa 10s-7s, gli atomi o le molecole solitamente perdono la loro energia durante la collisione con le altre particelle coinvolte in 10s-12s, facendo così aumentare l'energia cinetica delle molecole circostanti che ne partecipano. Quindi, l'energia cinetica associata al campo incidente è molto spesso dissipata come calore all'interno del mezzo. Questo processo, noto come assorbimento, ha come altro effetto la riduzione dell'intensità del fascio di luce attraversante il mezzo. Una relazione tra l'assorbimento di luce in un mezzo, la sua natura chimica e lo spessore dello stesso mezzo attraversato viene descritta matematicamente nel 1760 dalla legge di Lambert-Bouguer, nota anche come legge di Lambert-Beer:  $I = I_0 e^{-\mu x}$ , dalla quale si può determinare la frazione di intensità luminosa assorbita da ogni strato infinitesimo del mezzo attraversato, tramite una costante  $\mu$  che indica il coefficiente di assorbimento, il quale ha unità di misura inversa della lunghezza. Il coefficiente  $\mu$  rappresenta anche la probabilità per unità di lunghezza che un fotone possa essere assorbito dal mezzo.

L'assorbanza ottica,  $A$ , è espressa come rapporto tra l'intensità di luce trasmessa e l'intensità della luce che attraversa il campione, e viene espressa in logaritmo.

Nel meccanismo fotoacustico i fotoni assorbiti dal mezzo, in questo caso costituito da tessuto biologico, inducono un'espansione volumetrica e generano onde di pressione. Questo accade per via della frequenza degli impulsi ottici, che si succedono ad una frequenza sufficientemente alta da non consentire al tessuto di accumulare energia sotto forma di calore. La forma della sorgente acustica dipende dalla distribuzione spaziale dei fotoni nel campione e dalle proprietà di assorbimento degli elementi che lo compongono. **All'interno dell'organismo umano l'acqua è la molecola che assorbe maggiormente le radiazioni; il sangue che invece è costituito da una componente fluida detta plasma e da una componente corpuscolare, che comprende eritrociti ricchi di emoglobina, leucociti, cioè i globuli bianchi e le piastrine, ha un alto coefficiente di assorbimento, ma inferiore rispetto alla molecola d'acqua e soprattutto presenta assorbimento solo nel range di lunghezze d'onda comprese fra 0,4 e 1 micrometri.**

Oltre all'assorbanza, è presente un secondo fenomeno di tipo ottico, lo scattering, o diffusione. Lo scattering elastico della luce è un fenomeno che accade quando in un mezzo delle particelle cariche sono messe in un moto oscillatorio dal campo elettrico dell'onda incidente, per esempio il fascio di luce di un laser o di un LED. Il mezzo propaga almeno una parte della luce alla stessa frequenza dell'onda primaria a cui era stata messa in oscillazione. In questo caso si osserva una deviazione della potenza luminosa verso determinate direzioni. In un mezzo omogeneo e denso in cui la separazione fra le molecole è molto più piccola della lunghezza d'onda del raggio incidente, i vari atomi e le molecole diffonderanno la radiazione in tutte le direzioni del mezzo. Un'altra frazione viene invece

assorbita da molecole di sangue, per lo più della parte corpuscolata e, convertita in calore. Una parte della luce incidente viene infine riflessa. Le onde luminose si propagano all'interno di un tessuto con velocità minore rispetto alla velocità della luce. Il rapporto fra le due velocità è dato dall'indice di rifrazione, che, per un determinato mezzo, cambia al variare della lunghezza d'onda della luce incidente.

Un corpo può assorbire l'energia di un'onda elettromagnetica incidente, in quanto essa può indurre variazioni energetiche a livello molecolare o atomico. Ad esempio, l'assorbimento di componenti infrarosse determina un aumento dell'energia cinetica delle molecole, con conseguente aumento dell'energia termica del mezzo. L'energia assorbita può essere utilizzata dalle molecole del mezzo per operare transizioni tra livelli energetici differenti. L'assorbimento, quindi, si verifica in presenza di determinate interazioni tra la radiazione incidente e le molecole. Ne consegue che l'assorbimento risulta fortemente dipendente dalla frequenza dell'onda. In particolare, si ha che ogni sostanza presenta specifici spettri di assorbimento. L'assorbimento totale di un campione dipende dal numero di molecole in cui sono indotte transizioni energetiche. Pertanto, gli spettri di assorbimento possono essere impiegati quantitativamente per indagini analitiche sulla composizione di campioni incogniti, mediante l'uso di spettrofotometri. È utile sottolineare che una qualsiasi sostanza colorata presenta nel proprio spettro di assorbimento dei picchi, che determinano le regioni di massimo assorbimento, nel visibile ed in particolare in corrispondenza della frequenza del colore complementare

Il sangue è un tessuto fortemente diffusivo a causa dello scattering provocato dalle componenti cellulari, che dipenderà dall'ematocrito. Il coefficiente di assorbimento dipenderà dall'ematocrito stesso. A parità di intensità di luce trasmessa e di mezzo, l'intensità della luce rilevata dipenderà in modo inversamente proporzionale dal numero di molecole e alla lunghezza del cammino ottico.

Altri fattori di influenza sono la dispersione o scattering della luce che aumenta il percorso di lunghezza della luce di un fattore non noto. La lunghezza del cammino ottico varia sia tra gli individui, sia tra le diverse situazioni fisiologiche per lo stesso individuo. La luce è assorbita anche dal sangue venoso.

## 12. CARATTERIZZAZIONE ILLUMINAZIONE

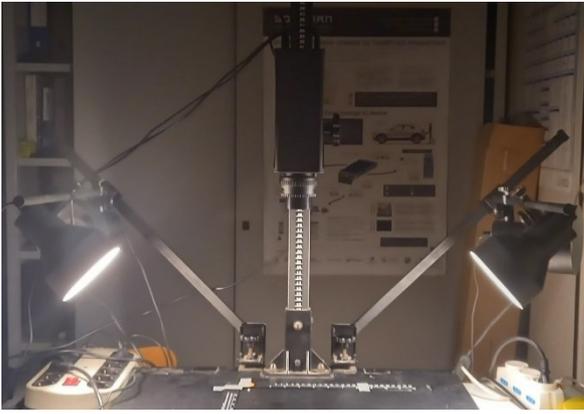
La parte sperimentale del lavoro svolto ha coinvolto l'effettuazione di varie prove, al fine di ottenere una modalità di definizione della miglior geometria di illuminazione e dei parametri di acquisizione necessari alla telecamera iperspettrale HinaLea.

Per definire l'ottima geometria si sono utilizzate come fonte di illuminazione le due lampade alogene. Per prima cosa si sono calcolate le distanze tra i vari oggetti. Una volta spente le luci dei neon e, chiusa la porta del laboratorio, così da assicurarsi che l'unica fonte di illuminazione siano le due lampade equi-posizionate; si è messa a fuoco la telecamera iperspettrale. Successivamente si è eseguita l'autoesposizione sul riferimento bianco. Si sono, poi, settati il bianco ed il nero come riferimenti ed, infine, è stata svolta l'acquisizione. I campioni esaminati sono stati lo stesso riferimento bianco, un campione di sangue ed il piano d'appoggio nero. La procedura è stata ripetuta modificando gli angoli di inclinazione delle lampade rispetto la telecamera. Partendo da  $0^\circ$ , quindi con le lampade allineate alla telecamera, si è misurato con il goniometro un angolo di  $30^\circ$ , poi di  $45^\circ$  e poi di  $60^\circ$ .

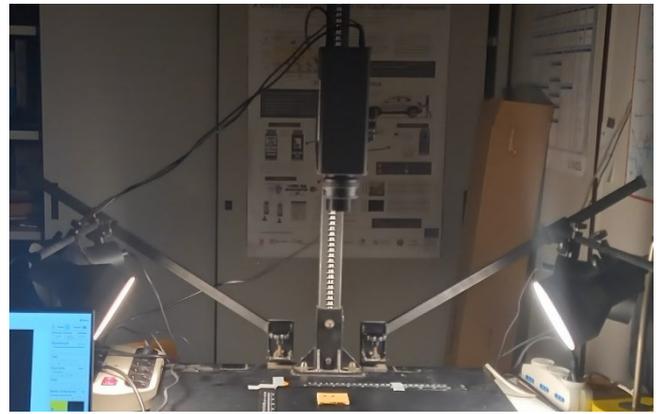
Le distanze sono state calcolate rispetto al centro della telecamera posizionata lungo il suo asse verticale. Le lampade sono state disposte simmetricamente rispetto questo asse a una distanza di 80 mm rispetto il fulcro della lampada e, di 145 mm rispetto al centro della lampada. L'obiettivo della telecamera dista 320mm dal piano di lavoro e, il suo asse centrale orizzontale dista 420mm dal piano di lavoro. Le lampade sono state allineate all'obiettivo della telecamera. Le lampade sono posizionate lungo il braccio di applicazione, ad una distanza di 415mm. L'altezza tra la base del braccio e la lampada è di 45mm. Il campo di vista ha una risoluzione di  $60 \times 101$ mm (hxb).

Le analisi sono state eseguite su un computer portatile DELL con intelCore i7 usando il programma TruScope Windows 1.1.9 e la telecamera iperspettrale è HinaLea.

La messa a fuoco è stata eseguita su un testo stampato. L'auto-esposizione, invece, è stata eseguita sul riferimento bianco.



*Img. 13 Lampade a 60° da HinaLea*



*Img. 14 Lampade a 45° da HinaLea*



*Img. 15 Lampade allineate a HinaLea*



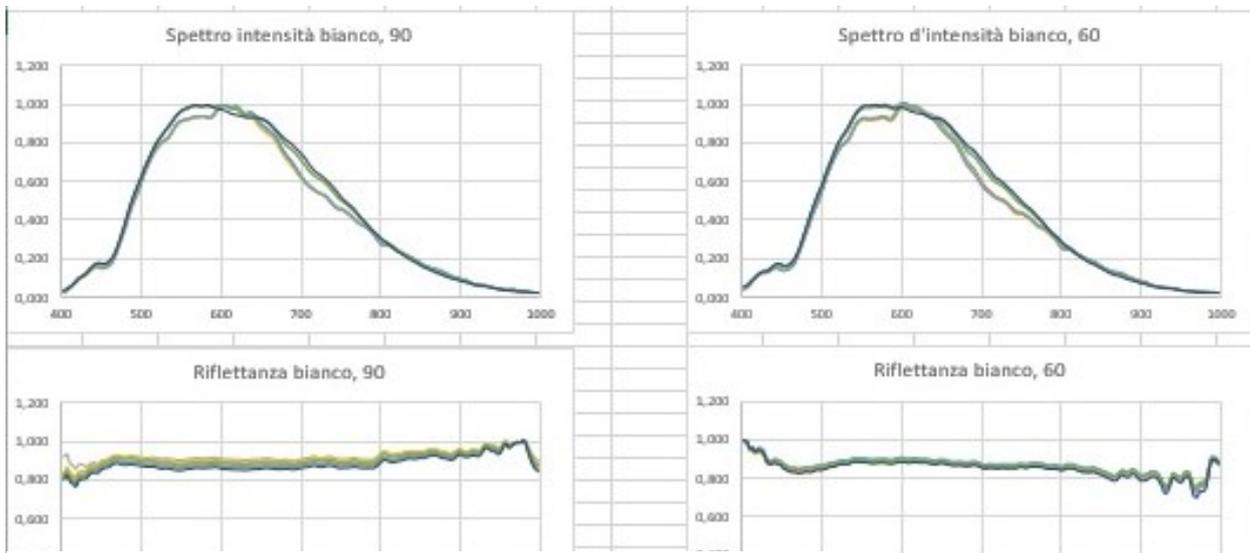
*Img. 16 Risoluzione HinaLea*

Si è acquisito il bianco, la superficie d'appoggio e due campioni di sangue: uno su sfondo assorbente, cioè su di un cartoncino marrone e, l'altro su uno sfondo non assorbente, cioè su una mattonella bianco lucida.

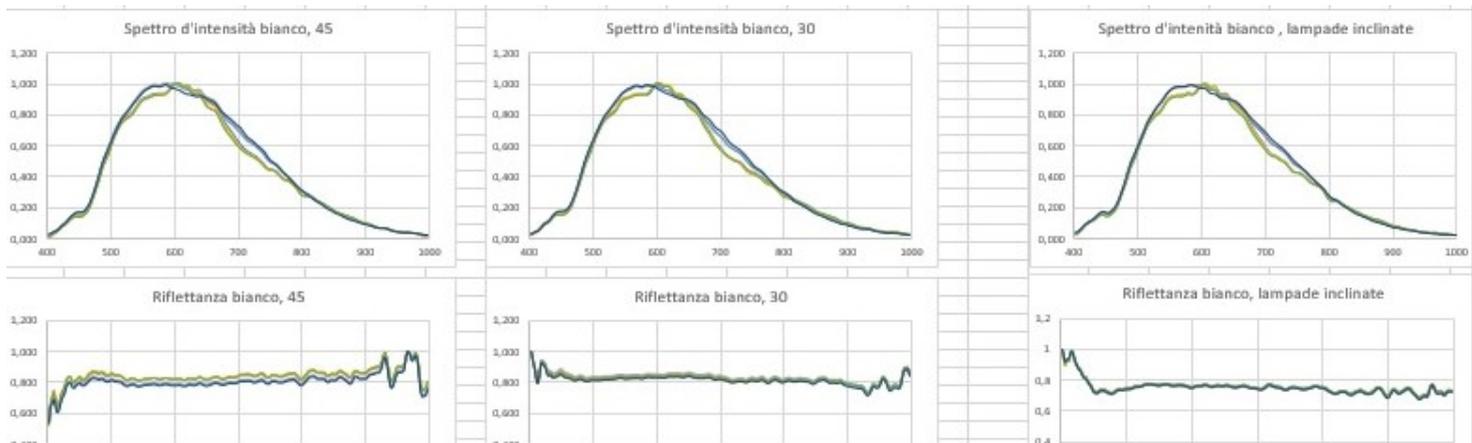
L'esposizione nell'acquisire il sangue sullo sfondo bianco lucido diminuisce perché riflette maggiormente le lunghezze d'onda. Il campione sullo sfondo di cartone, invece, dà minor problemi riguardo l'esposizione, ma assorbe il sangue, quindi le proprietà rischiano di confondersi con lo sfondo. Il campione sullo sfondo lucido è un cubo di dimensioni di 4.5cmx4.5cmx0.5cm (bxlxh), dove h è lo spessore della mattonella. Per definire l'ottima geometria si è eseguito questo processo inclinando le lampade a diverse angolature rispetto la telecamera: 0°, 30°, 45° e 60°, ottenendo diversi risultati che hanno portato ad affermare che il campo di acquisizione è illuminato nella maniera ottima se le lampade sono inclinate di 0° rispetto la telecamera. Si è giunti a questa conclusione analizzando i grafici risultanti dalle acquisizioni, normalizzandoli e confrontandoli. La soluzione in cui le lampade sono allineate alla telecamera è la migliore, dato che le curve di riflettanza e dello spettro d'intensità sono più uniformi e hanno un contributo maggiore rispetto i grafici ottenuti nelle altre configurazioni.

I grafici sono stati normalizzati dividendo ogni valore per il valore massimo ottenuto. Normalizzando i grafici si ottiene una lettura più immediata in cui, le zone da analizzare sono i cambi di pendenza. Ricavata la geometria migliore, si è tentato di inclinare le lampade di 20° rispetto la telecamera, ma si è riscontrata un'illuminazione meno uniforme, cioè scarsa alle estremità e maggiore al centro del campo di acquisizione. Si è ricavato, quindi, che la geometria migliore è l'utilizzo delle lampade allineate alla telecamera.

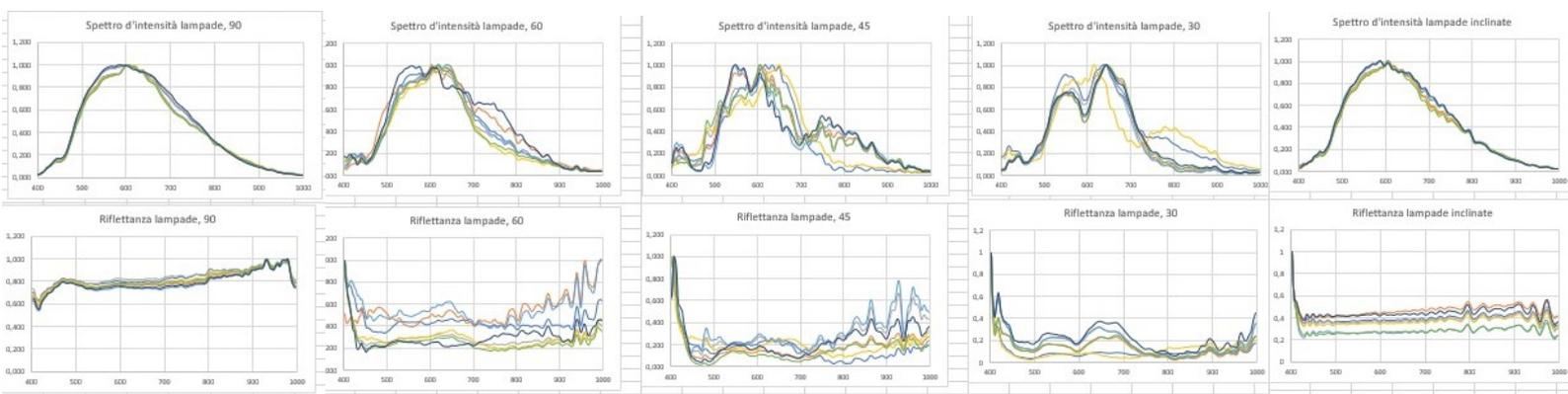
Ogni grafico mostra varie curve e, ognuna descrive lo spettro d'intensità e la riflettanza risultante nelle regioni di interesse, ROI; selezionate. Sono state considerate per il bianco e per le sole lampade i quattro bordi, la regione centrale e le zone centrali superiori e inferiori, mentre per i campioni di sangue sono state selezionate le macchie di sangue.



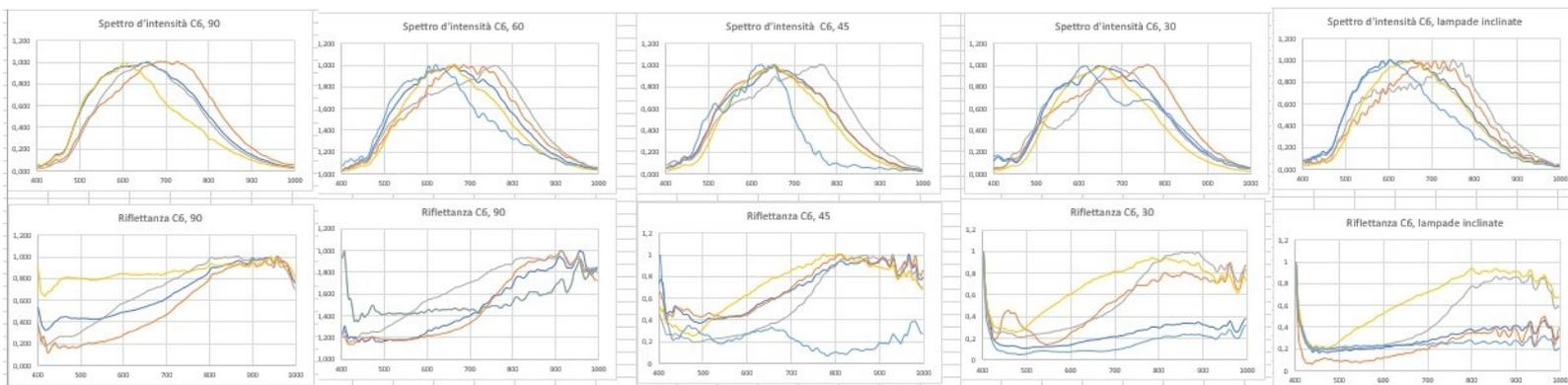
Img. 17 Definizione ottima geometria: spettri e riflettanza bianco



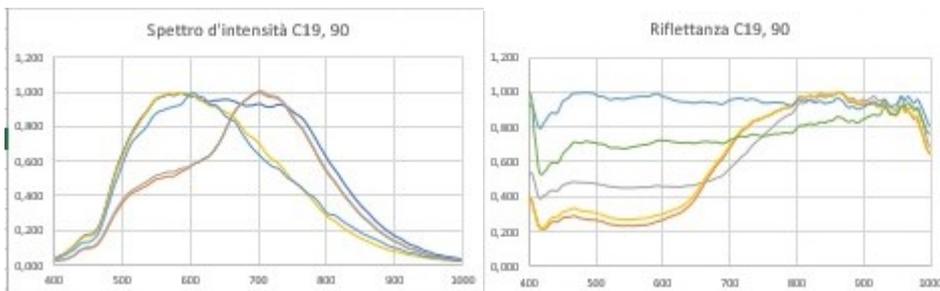
Img. 18 Definizione ottima geometria: spettri e riflettanza bianco



Img. 19 Definizione ottima geometria: spettri e riflettanza lampade



Img. 20 Definizione ottima geometria: spettri e riflettanza sangue su sfondo assorbente



Img. 21 definizione ottima geometria: spettri e riflettanza sangue su sfondo non assorbente

Nell'acquisizione dei diversi campioni si è mantenuta costante l'esposizione di 218ms, così che le variazioni degli spettri dipendessero solo dalla diversa inclinazione della fonte di illuminazione. Nel tentativo di inclinare le lampade di 20° nella configurazione scelta, invece che utilizzarle parallelamente alla telecamera, si è notato che effettuando l'autoesposizione, si è ottenuta una diminuzione, fino a 75,3ms. Ciò è dovuto al fatto che sul campione arriva maggiore intensità di illuminazione.

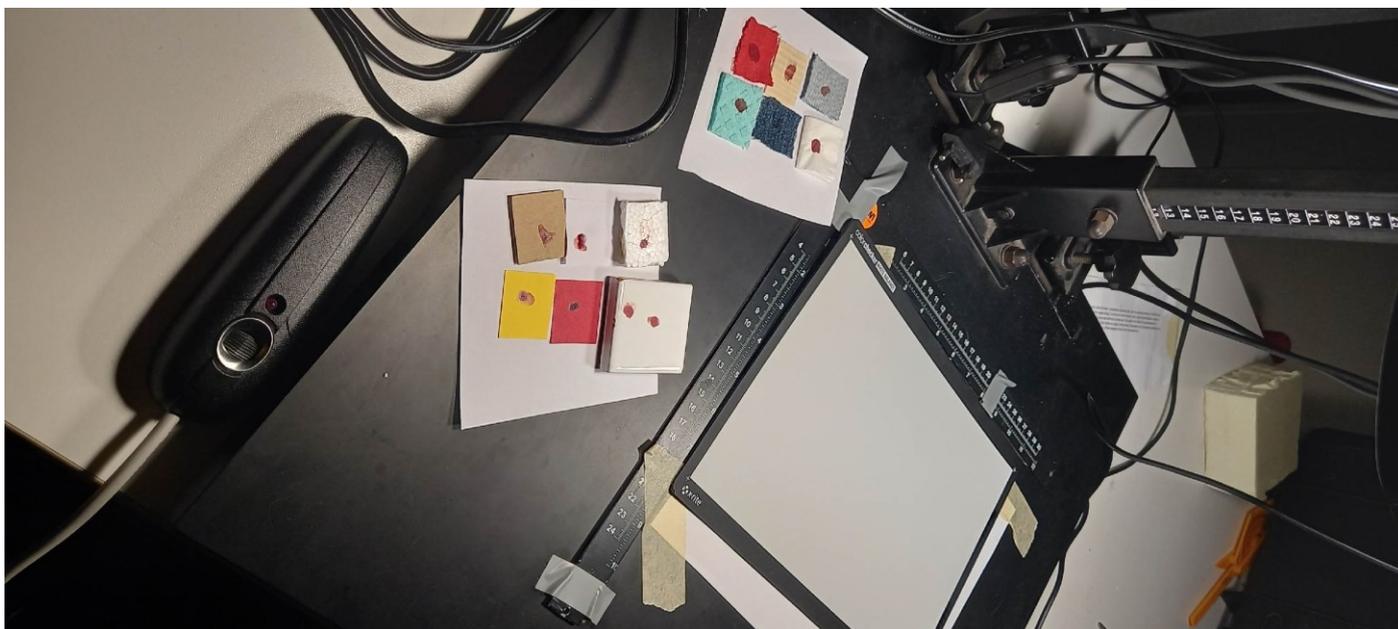
Da questo risultato si è proseguito nel definirne i parametri ottimi, quali l'esposizione. Per questa fase di lavoro si è utilizzata anche la terza lampada alogena, posta su di un piedistallo e fissata ad esso con un'inclinazione di 45°.

Nel primo tentativo di utilizzare simultaneamente le tre lampade, si sono notati dei settori circolari nell'acquisizione. Questo fenomeno potrebbe essere causato dall'attenuazione dei picchi; cioè se in entrambe le illuminazioni si ha un picco nello spettro d'intensità, allora l'intensità risultante aumenta; invece, se si ha un picco ed un flesso, allora l'intensità cade. Se la spiegazione fosse questa il numero dei cerchi dovrebbe aumentare alle basse lunghezze d'onda e diminuire all'aumentare dei nanometri, ma ciò non accade; quindi, la presenza dei cerchi nell'acquisizione, potrebbe essere dovuta al fatto che, quando la telecamera acquisisce, la lampada pulsa in quel momento, dato che ha un'emissione continua all'occhio umano, ma in realtà pulsa a piccoli intervalli. Dai settori circolari evidenti, si nota che, avendo le lampade diversa intensità, la macchina ha l'esposizione ottimizzata per solo una delle due fonti di illuminazione.

Nell'analizzare i campioni di sangue, serve un'illuminazione che abbia un buon contributo sia alle basse lunghezze d'onda che alle alte, dato che il sangue mostra alcune sue proprietà sia ai 416nm che ai 750nm. Le due lampade alogene hanno un buon contributo dai 480nm ai 850nm, quindi si è utilizzata la terza lampada alogena per ottenere un contributo anche alle basse lunghezze d'onda nel range 400nm-480nm. L'utilizzo di queste due fonti di illuminazione simultaneamente, come già detto, comporta una perdita in termini di esposizione, dato che la terza lampada ha un'intensità d'illuminazione molto maggiore delle altre due alogene e, quindi, lo spettro risultante cade ai 700nm. Per rimediare a questo problema e per ottimizzare l'illuminazione si può operare utilizzando la stessa intensità delle lampade, oppure, si può simulare la tecnica dell'HDR, cioè dell'high dynamic range, che consiste nell'effettuare le acquisizioni dello stesso campione, variandone l'esposizione. Si ottengono, così, una serie di foto in successione, acquisite, in un primo momento con un solo tipo di fonte d'illuminazione e, successivamente, con l'altra sorgente di luce, mantenendo costante la posizione del campione in esame.

Per simulare il funzionamento dell'HDR si sono acquisiti i campioni di sangue con la sola terza lampada nelle lunghezze d'onda più basse, cioè dai 400 ai 490nm e con le altre due alogene in tutto lo spettro. Così si è creata una sovrapposizione tra le due riflettanze e, il risultato finale è dato dall'unione dei due spettri. Nella parte iniziale dell'acquisizione con le due lampade alogene si ha un contributo verso l'infinito e questo è dovuto all'assenza di segnale, di illuminazione, perché si divide per zero.

Sono stati acquisiti diversi campioni di sangue posti su superfici diverse: assorbenti, come il tessuto di jeans e, su alcune non assorbenti, come la mattonella bianca lucida.



*Img. 22 Riferimento bianco; campioni sangue su sfondo assorbente e non e, telecomando di regolazione dell'intensità della terza lampada alogena.*

La procedura seguita è stata quella di utilizzare la geometria di illuminazione definita ottima in precedenza e, con la sola fonte di illuminazione alogena, dopo aver messo a fuoco, si è eseguita l'auto-esposizione e si è preso il riferimento del bianco e del nero e si sono acquisiti i campioni di sangue sia nelle superfici assorbenti che non. La stessa procedura è stata ripetuta con l'utilizzo della sola terza lampada alogena e, infine, si sono selezionate le ROI, cioè le zone di interesse, prendendo di riferimento le stesse coordinate. I campioni, quindi, nel passaggio da un'acquisizione all'altra sono stati acquisiti nella stessa posizione e, quindi, le ROI, regions of interest, considerate sono state prese coincidenti.

Successivamente, si è lavorato tramite Matlab, dove si sono uniti i spettri risultanti, così da ottenere l'illuminazione ottima lungo tutto lo spettro di acquisizione della telecamera HinaLea.

Questo lavoro è, infatti, finalizzato all'ottenimento di un'ottima illuminazione in termini di contributo spettrale, sia alle basse che alle alte lunghezze d'onda, dove il sangue ha contributo, cioè i 460 e 750nm. Per far ciò si poteva sommare e sottrarre della stessa quantità i due spettri risultanti dalle diverse illuminazioni, finché il punto di taglio coincidesse, così da ottenere lo spettro risultante continuo; oppure più precisamente si potevano far coincidere le derivate.

Nella modalità HDR l'auto-esposizione è stata eseguita sul campione che sennò avrebbe saturato, cioè sui campioni di sangue sulle superfici non assorbenti, dato che questi necessitano di un'esposizione minore rispetto agli altri. Con la sola terza lampada si sono acquisiti i campioni di sangue con un'esposizione di 115ms. Questa fonte di illuminazione è stata utilizzata alla minima intensità di illuminazione che può emettere.

Il bianco è stato ripreso a ogni cambio di esposizione. Si è notato che l'esposizione cambia se cambia l'FPI, cioè la temperatura, che varia aumentando dai 28 ai 31°C. Tutte le acquisizioni sono state svolte in modo che i soggetti ed i cavi non creino ombre. Si è posta attenzione anche al fatto di non far imbarcare il riferimento bianco e lo si è spostato tenendolo dalle estremità, così da non lasciare impronte sulla parte indicata come riferimento.

### **13. CONCLUSIONI**

Con questo lavoro si è definito un metodo per caratterizzare l'illuminazione necessaria ad una telecamera iperspettrale.

E' risultato che la soluzione ottimale è un'illuminazione che abbia contributo spettrale nel range d'interesse del campione in analisi. Nel caso del sangue, dato che ha contributi sia a basse lunghezze d'onda che ad alte, cioè 460nm per il sangue ossigenato e, 750nm per il sangue deossigenato, l'illuminazione ottimale deve ricoprire tutto il range 400-800nm.

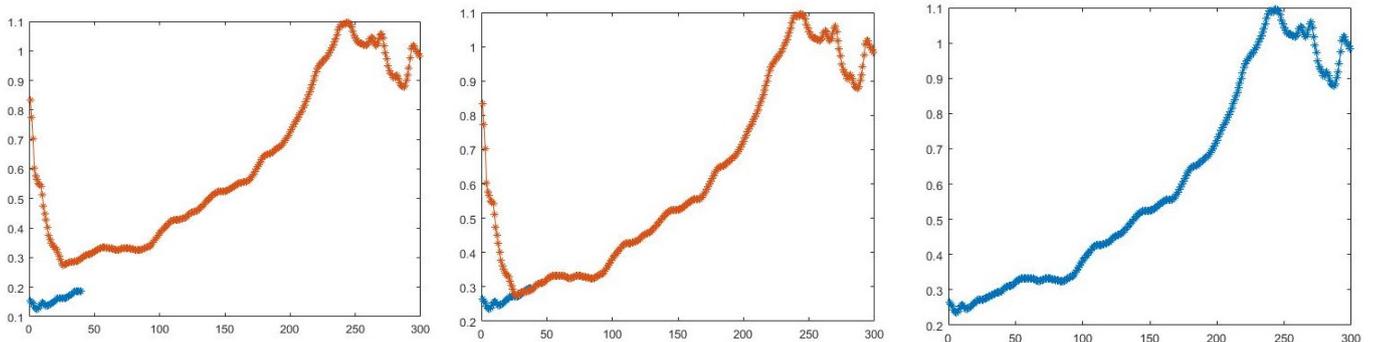
Il metodo per definire l'ottima geometria è riassunto in questi passaggi:

- Calcolare distanze
- Lavorare a luci spente ed a porta chiusa, illuminando con le sole 2 alogene equi posizionate
- Mettere a fuoco
- Effettuare l'autoesposizione sul riferimento bianco
- Settare il bianco ed il nero come riferimento
- Acquisire

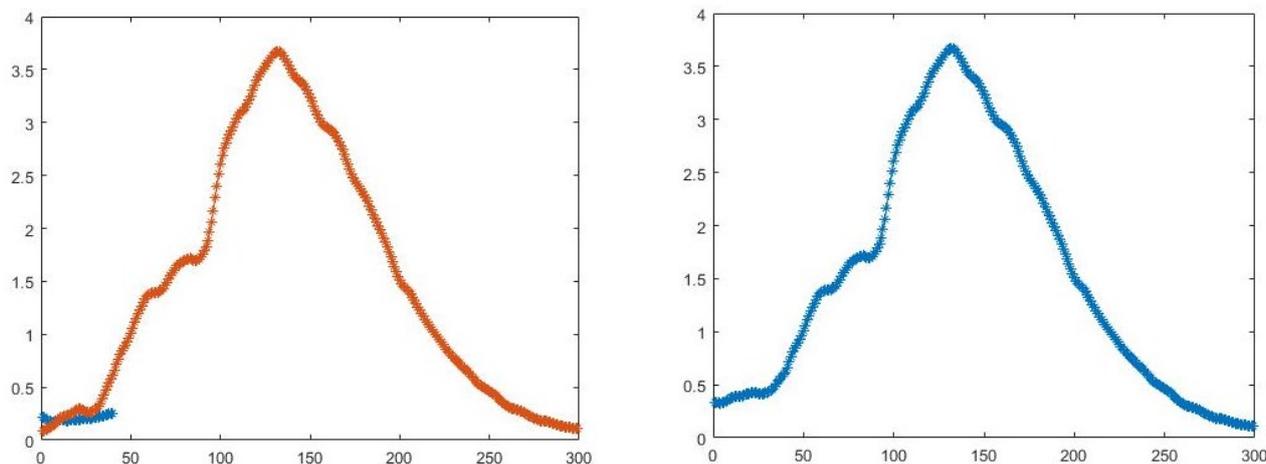
Con le sorgenti di illuminazione presenti in laboratorio, per ottimizzare il risultato si è pensato a creare una modalità HDR, che sta per High Dynamic Range; dato che le due lampade alogene utilizzate inizialmente hanno un buon contributo oltre i 480nm, ma carente nelle lunghezze d'onda minori. Per migliorare lo spettro d'intensità anche nelle lunghezze d'onda minori, allora, si è usata la terza lampada, cosicché, il risultato finale è dato dalla composizione dei due spettri manipolati su Matlab. Le acquisizioni sono state svolte a neon spenti; evitando le ombre, mettendo a fuoco e prendendo come riferimento il bianco ed il nero. Successivamente si è effettuata l'autoesposizione sui campioni più critici, ovvero sul gruppo dove c'era il sangue sulla mattonella bianca. Mantenendo costante questo valore di esposizione e d'illuminazione, si sono poi acquisiti anche i campioni di sangue sulle diverse superfici assorbenti, come il tessuto di jeans. Lo sfondo bianco lucido della mattonella rende l'acquisizione più critica, perché, dato che il bianco riflette tutte le lunghezze d'onda, è necessaria una bassa esposizione, sennò il risultato saturerebbe.

Il metodo per creare la modalità HDR, definendo l'ottima illuminazione derivante dall'utilizzo di due fonti di illuminazione diverse è così riassunto:

- Lavorare a luci spente ed a porta chiusa, così che illuminano solo le 2 alogene equi posizionate
- Effettuare l'autoesposizione sul campione più critico
- Prendere come riferimento il bianco ed il nero
- Acquisire i campioni sulle superfici non assorbenti
- Acquisire i campioni sulle superfici assorbenti
- Cambiare fonte di illuminazione e utilizzare solo la terza lampada alogena
- Ripetere i passaggi precedenti dal secondo in poi
- Selezionare le ROI caratterizzate dalle stesse coordinate
- Su Matlab unire i grafici ottenuti



Le tre immagini soprariportate mostrano il lavoro eseguito tramite Matlab. Lo spettro blu nella prima immagine è lo spettro d'intensità dei campioni di sangue sulle superfici assorbenti, illuminati con la sola terza fonte di illuminazione alogena; mentre lo spettro arancione è dato dall'illuminazione dei stessi campioni ematici con le sole due lampade alogene. La parte iniziale dello spettro arancione, che va all'infinito, nella prima immagine mostra dell'evidente rumore. Ciò è dovuto all'assenza di segnale in quel tratto. Dato che lo spettro è il risultato del rapporto illuminazione/segnale; se il denominatore è nullo, allora il contributo va all'infinito. Nella seconda immagine si vede la sovrapposizione dei due spettri ottenuta facendo coincidere il punto a 480nm e, nell'ultima immagine è mostrato lo spettro risultante del campione di sangue illuminato con la lampada alogena nel range 400-480nm e, con le altre due lampade alogene nelle lunghezze d'onda restanti, ovvero 480-1000nm.



Le due immagini sopra riportate, invece, mostrano il lavoro eseguito su Matlab sui campioni di sangue sui diversi sfondi non assorbenti. La seconda immagine è il risultato dell'unione dei due spettri illuminati con la sola lampada alogena che necessita un'esposizione minore alle basse lunghezze d'onda e, con le sole due lampade alogene alle lunghezze d'onda successive. Curioso è notare il fatto che in questo caso gli spettri non necessitano dell'offset. Ciò può essere dovuto al fatto che l'esposizione è stata presa su questo campione, mentre nel caso precedente il campione risulta sottoesposto.

I grafici risultanti mostrano la miglioria ottenuta nella prima parte della curva. Si può notare, infatti, che il contributo d'intensità sullo spettro risultante alle basse lunghezze d'onda è maggiore rispetto a quello della sola curva arancione, cioè della sola illuminazione delle due lampade alogene.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di caratterizzare l'ottima illuminazione della telecamera iperspettrale, quindi di definirne i parametri. Il tutto attraverso sperimentazioni prendendo in analisi tracce di sangue. Questa analisi può così essere utile a definire un metodo di lavoro cosicché possa essere un'innovazione nel campo di investigazioni scientifiche sulla scena del crimine.

La telecamera iperspettrale deve essere capace, quindi, di risolvere oggetti dalla scena, cioè di vedere ciò che l'occhio umano non percepisce e, quindi, di riuscire ad identificare dallo stato in cui si trova un corpo, cioè dalle sue proprietà, i dati necessari alle investigazioni forensi o utili in campo medico. Per consentire ciò la telecamera necessita quindi di condizioni di lavoro ottimali.

## 14. OSSERVAZIONI

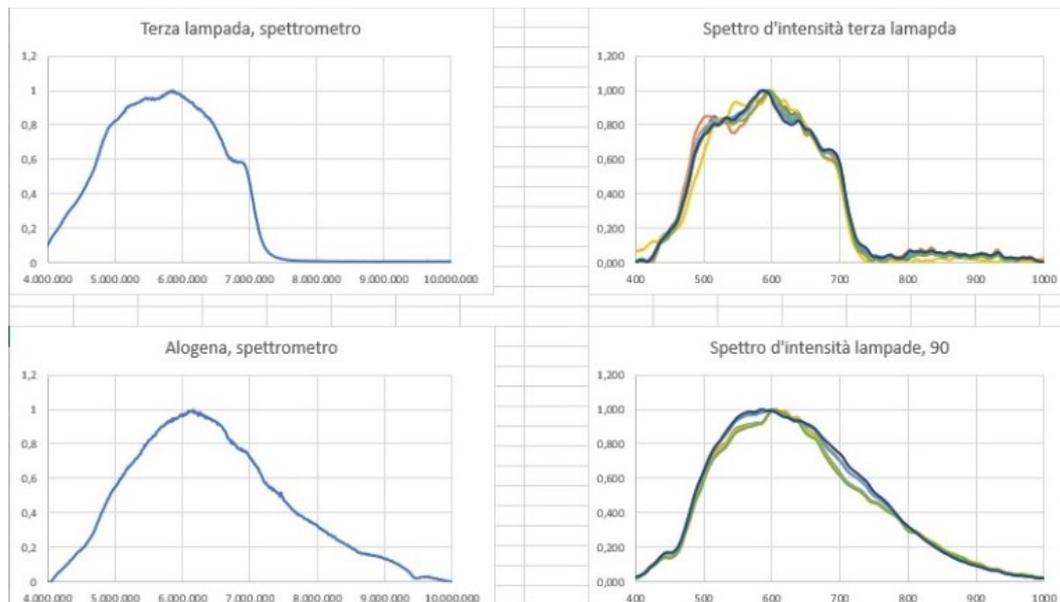
Si è notato che è più difficile analizzare le corrette proprietà dei campioni di sangue posti su sfondi assorbenti, dato che gli spettri si confondono con la superficie su cui poggiano. Questo è stato notato prendendo una ROI nello sfondo, una nella macchia di sangue e, una nella macchia di sangue più visibilmente assorbita e si è notato che quest'ultima curva tende a discostarsi da quella del sangue e tende a quella dello sfondo; cosa che non accade per le tracce ematiche sugli sfondi non assorbenti.

Si è notato, inoltre, che le acquisizioni dei campioni saturano in base a dove li si posizionano. Questo è dato, quindi, dal modo in cui l'illuminazione incide sul campione.

Aggiungendo la terza lampada alogena il contributo delle altre due lampade alogene oltre i 700nm scompare perché l'esposizione, di circa 45ms, dovuta al contributo della terza fonte di illuminazione, per le altre due è troppo bassa, dato che la terza sorgente alogena ha una potenza di illuminazione molto maggiore rispetto le altre due.

Il rumore presente alle estremità del range della lunghezza d'onda è dovuto all'assenza di illuminazione e, quindi, di segnale in quelle zone. Dato che il denominatore del rapporto illuminazione/segnale è zero, infatti, il contributo va all'infinito e questo indica rumore nel segnale.

L'intensità di illuminazione delle lampade è stata calcolata sia tramite lo spettrometro, che tramite la telecamera selezionando le ROI e risulta:



L'illuminazione è correlata all'esposizione, perché, come visto, ad un'intensità di illuminazione maggiore corrisponde un'esposizione minore. Quindi, più il campione in analisi è illuminato, meno tempo è necessario per scansarlo. L'esposizione aumenta nelle code, cioè nelle prime e nelle ultime lunghezze d'onda, perché aumenta il tempo di acquisizione.

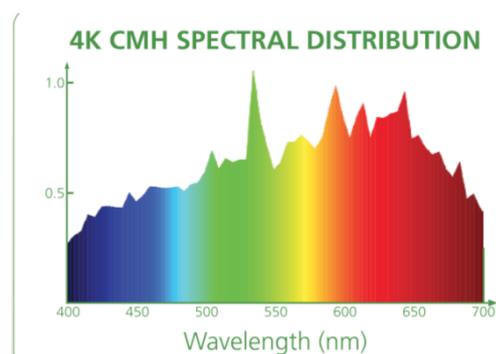
L'esposizione è un parametro importante per l'illuminazione, infatti, essa determina il tempo di acquisizione. Per cercare di ottimizzarla la si è modificata manualmente, facendola aumentare fino a poco prima del valore al quale l'acquisizione avrebbe saturato. Si ottengono, così, risultati più dettagliati, dato che la scansione è più lenta. Se si diminuisse troppo l'esposizione, invece, si otterrebbero acquisizioni sottoesposte, quindi scansionate troppo velocemente.

E' importante, inoltre, mettere a fuoco l'immagine prima di acquisirla.

L'obiettivo del lavoro effettuato è stato, quindi, quello di caratterizzare l'illuminazione ottimale necessaria ad uno strumento per poter analizzare varie tracce biologiche, come, ad esempio, il sangue. Questo strumento è la telecamera iperspettrale HinaLea.

## 15. SUGGERIMENTI

Le lampade CMH o LEC ad alta resa possono essere una buona soluzione, dato che hanno un buon contributo sia alle basse frequenze che alle alte, illuminando così le lunghezze d'onda d'interesse nell'analisi di tracce di sangue; oppure una soluzione ottimale può essere ottenuta dall'utilizzo delle LED SUMMERGROW SGS400W-300W, che hanno un ottimo contributo alle code, combinato all'illuminazione alogena, così da ottenere uno spettro continuo con un ottimo contributo d'illuminazione sia alle basse che alle alte lunghezze d'onda, fino a 780nm.



Img. 23 Spettro d'intensità lampade CMH

## 16. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Professore Paolo Castellini, l'Ing. Luigi Montalto e tutti coloro che hanno contribuito al conseguimento di questo titolo.

## 17. SITOGRAFIA

<https://hinaleaimaging.com/>  
<https://www.treccani.it/vocabolario/fotografia/>  
<https://fotografiaartistica.it/cose-la-fotografia/>  
<https://www.google.com/search?q=che+cose+la+fotografia&oq=che+cose+la+fotografia&aqs=chrome..69i57j0i10l2j46i10j0i10l2j0i22i30l3j0i10i22i30.7082j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>  
<https://www.docsity.com/it/che-cos-e-una-fotografia/5151719/>  
<https://enzoalessandra.com/obiettivi-fotografici-tipologie-e-utilizzi/>  
<https://marcocrupi.it/2019/05/guida-ai-tipi-di-obiettivo-scelta-ottica-corso-di-fotografia-digitale.html>  
<https://www.fotopost.it/guida-ai-diversi-tipi-obiettivi-fotografici/>  
<https://www.xn--photocaf-80a.it/blog/fotoglossario/obiettivo-fotografico/>  
<https://www.ifolor.ch/it/ispirazioni/tipi-obiettivo-fotografico-differenze-produttori-criteri-acquisto>  
<https://simonemodica.com/obiettivi-fotografici-guida-allacquisto-tipologie-pregi-e-difetti/>  
<https://tecnicafotografica.net/blog/8-cose-da-sapere-sugli-obiettivi-fotografici/>  
<https://ilblogdireflexmania.it/tipologie-obiettivi-caratteristiche/>  
<https://www.giovanlattanzi.it/tipi-di-obiettivi-fotografici/>  
<https://qd-europe.com/it/it/prodotti/imaging/telecamere-iperspettrali/>  
<https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/droni-sapr/sensori-iperspettrali.aspx>  
<https://www.imagesspa.it/sistemi-multispettrali-iperspettrali/>  
<https://www.packagingobserver.com/iperspettrale-camera/>  
<https://www.optoprim.it/prodotti/spettrometri-e-camere-iperspettrali/camere-iperspettrali/>  
<https://nursetimes.org/fotocamere-iperspettrali-un-strumento-la-diagnosi-tumore/43373>  
<https://www.horusdynamics.com/sensore-iperspettrale/>  
[https://amslaurea.unibo.it/9572/1/Montedoro\\_Vincenzo\\_tesi.pdf](https://amslaurea.unibo.it/9572/1/Montedoro_Vincenzo_tesi.pdf)  
<https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/droni-sapr/sensori-multispettrali.aspx>  
<https://www.skydrone360.it/cose-camera-multispettrale/>  
[https://it.mimi.hu/fotografia/spettro\\_luminoso.html](https://it.mimi.hu/fotografia/spettro_luminoso.html)  
<https://www.chrysis.net/it/fotografia/manuale-di-fotografia/luce-e-colori/>  
<https://zoomonpictures.it/la-luce-in-fotografia/>  
<https://cameragation.it/luce-e-colore-questo-e-il-segreto-per-una-buona-fotografia>  
<https://www.abc-fotografia.it/la-luce-non-e-tutta-uguale-impariamo-a-valutare-la-sua-qualita/>  
<https://www.diventarefotografodavventura.it/la-luce-in-fotografia/>  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro\\_visibile](https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro_visibile)  
<https://it.wikipedia.org/wiki/Riflettanza>  
<https://www.dronebee.it/riflettanza/>  
<https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/412735>  
[https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/misuratore-di-riflettanza-pce-instruments-misuratore-di-riflettanza-pce-rm-100-det\\_5887914.htm](https://www.pce-instruments.com/italiano/strumento-di-misura/misuratore/misuratore-di-riflettanza-pce-instruments-misuratore-di-riflettanza-pce-rm-100-det_5887914.htm)  
<https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/562052>  
<https://derbigum.it/blog/riflettivita/>  
<https://www.sapere.it/sapere/strumenti/studiafacile/fisica/Le-onde/La-luce/La-riflessione-e-la-rifrazione-della-luce.html>  
<https://www.sapere.it/sapere/strumenti/studiafacile/fisica/Le-onde/I-fenomeni-ondulatori/Comportamento-delle-onde.html>  
<https://it.wikipedia.org/wiki/Irraggiamento> <https://webthesis.biblio.polito.it/17382/1/tesi.pdf>  
[https://www.gruppodelcolore.org/wp-content/uploads/2020/11/ColoreEcolorimetriaContributiMultidisciplinari\\_VolXVIA.pdf](https://www.gruppodelcolore.org/wp-content/uploads/2020/11/ColoreEcolorimetriaContributiMultidisciplinari_VolXVIA.pdf)  
<https://amslaurea.unibo.it/13329/1/tesi%20definitiva.pdf>  
[http://www.danielemazzei.it/wp-content/uploads/2013/03/Sensori\\_Chimici\\_3.pdf](http://www.danielemazzei.it/wp-content/uploads/2013/03/Sensori_Chimici_3.pdf)  
<https://unibiofor.it/tecnologia-e-scena-del-crimine-luso-del-laser-scanner/>  
<https://camera.to/mostre/sulla-scena-del-crimine-la-prova-dellimmagine-dalla-sindone-ai-droni/>  
<https://spiegato.com/cose-la-fotografia-forense>  
<https://www.centropiaggio.unipi.it/sites/default/files/course/material/Cap7.pdf>  
[http://math.unife.it/astro-fisica/insegnamenti/ottica-applicata/materiale-didattico/misureottiche\\_riflettometri/misure%20ottiche\\_lecture.pdf](http://math.unife.it/astro-fisica/insegnamenti/ottica-applicata/materiale-didattico/misureottiche_riflettometri/misure%20ottiche_lecture.pdf)  
<https://www.amazon.it/dp/B08BNBCX5F?tag=ciaofood0f-21&linkCode=osi&th=1&psc=1>  
<http://www.fioridicampo.com/shop/prodotto/led-summergrow/>

## 18. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Romaszewski, P. Głomb, A. Sochan, M. Cholewa. A dataset for evaluating blood detection in hyperspectral images. *Forensic Science International* (2021)
- [2] M. H. F. Aref, A. A.R. Sharawi,, Y. H. El-Sharkawy. Delineation of the Arm Blood Vessels Utilizing Hyperspectral Imaging to Assist with Phlebotomy for Exploiting the Cutaneous Tissue Oxygen Concentration. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* (2021)
- [3] M. H. Aref,, I. H. Aboughaleb, Y. H. El-Sharkawy. Tissue characterization utilizing hyperspectral imaging for liver thermal ablation. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* (2020)
- [4] D. Promny, J. Aich, T. Püske et al. Evaluation of Hyperspectral Imaging as a modern aid in clinical assessment of burn wounds of the upper extremity. *Burns* (2021)
- [5] J. Behmann , A.-K. Mahlein , S. Paulus , H. Kuhlmann , E.-C. Oerke , L. Plümer. Calibration of hyperspectral close-range pushbroom cameras for plant phenotyping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (2015)
- [6] Alessandro Benelli, Chiara Cevoli, Luigi Ragni, A. Fabbri. In-field and non-destructive monitoring of grapes maturity by hyperspectral imaging. *Biosystems engineering* (2021)
- [7] R. Gasbarrone. Tecniche innovative ed applicazioni sensoristiche per la caratterizzazione di materie prime. (2019)
- [8] L. Innocenti. Impiego di metodologie di telerilevamento iperspettrale e multisensore per la determinazione di caratteristiche chimico-fisiche-mineralogiche di matrici geologiche. (2010)
- [9] M. Cattaruzza, F. Spizzo. Lampade LED multi-wave. (2012)