

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale, Territoriale

Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



IL DATO SATELLITARE PER IL MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE DEL LAGO MAGGIORE

Relatore: Prof. Marco Mancini

Correlatore: Ing. Chiara Corbari

Tesi di Laurea Specialistica di:

Fabio Graziani

Matricola 737268

Anno Accademico 2012/2013

Ringraziamenti

Alla mia famiglia ed alla mia fidanzata, linfa vitale per i miei obiettivi, a loro è dedicato questo lavoro

Ai miei nonni che mi hanno insegnato la tenacia

Ad ing. Lotterio e ing. Raimondi della società Loterios s.r.l. per avermi permesso di studiare

Al prof. Mancini e ad ing. Chiara Corbari per il prezioso e ed irrinunciabile apporto tecnico

Al Progetto finanziato SYNDIAL “Monitoring natural recovery del sistema Lago Maggiore/Fiume Toce”

Sommario

1	Introduzione	1
1.1	Finalità e campo di applicazione	1
1.1.1	Principio di funzionamento	1
1.1.2	Analisi dei vantaggi e degli svantaggi	1
1.2	Stato dell'arte e analisi bibliografica	2
1.2.1	Telerilevamento e sensori	2
1.2.1.1	Alcune applicazioni italiane	3
1.2.1.2	Alcune applicazioni internazionali	3
1.2.2	Contributo rispetto alla letteratura esistente	4
1.3	Qualità di un corpo idrico superficiale	4
1.3.1	Parametri studiati per il monitoraggio	4
1.3.2	Classificazioni	5
2	Metodologia operativa	6
2.1	Principio fisico di funzionamento	6
2.1.1	Firma spettrale	6
2.1.2	Correzione atmosferica	7
2.2	Dati satellitari e strumenti di monitoraggio	8
2.2.1	Sensori	8
2.2.1.1	Il sensore MODIS	8
2.2.1.2	Il satellite LANDSAT	10
2.2.1.3	Il satellite Worldview2	10
2.2.2	Metodi per interpretare i Digital Number	11
2.3	Software specialistico utilizzato	11
2.4	Calibrazione degli algoritmi	13
3	Risultati	14
3.1	Area di studio	14
3.2	Misure al suolo	15
3.3	Studio dei parametri di qualità	17
3.3.1	Torbidità	17
3.3.1.1	Taratura algoritmi	17
3.3.1.2	Risultati spazialmente distribuiti	24
3.3.2	Trasparenza	28
3.3.2.1	Taratura algoritmi	28
3.3.2.2	Risultati spazialmente distribuiti	34
3.3.3	Solidi sospesi	37

3.3.3.1	Taratura	37
3.3.3.2	Risultati spazialmente distribuiti	41
3.3.4	Temperatura	41
3.3.4.1	Risultati spazialmente distribuiti	41
3.4	Confronto multi-scala e multi-satellite dei risultati	43
3.4.1	Confronto torbidità settembre 2013 in NTU	43
3.4.2	Confronto trasparenza settembre 2013 in metri	43
4	Conclusioni	45
5	Bibliografia.....	46

Indice delle figure

Figura 1	Principio di funzionamento	1
Figura 2	Finestre atmosferiche.....	7
Figura 3	Bande spettrali satellite Worldview2	10
Figura 4	Georeferenziazione	11
Figura 5	Landsat calibration	11
Figura 6	Correzione atmosferica	12
Figura 7	Esempio di mappatura di riflettanza e dei punti di campionamento.....	12
Figura 8	Esempio di foglio di calcolo di taratura ai minimi quadrati.....	13
Figura 9	Area di studio: vista dall'alto	14
Figura 10	Area di studio: vista tridimensionale.....	14
Figura 11	Campagna misure in situ 24 luglio 2013.....	15
Figura 12	Campagna misure in situ 23 settembre 2013.....	15
Figura 13	Campagna misure in situ 26 giugno 2013.....	16
Figura 14	Campagna misure in situ 23 luglio 2013.....	16
Figura 15	Camagna misure in situ del 28 agosto 2013.....	16
Figura 16	Foglio di calcolo taratura torbidità Modis	17
Figura 17	Foglio di calcolo taratura torbidità Landsat.....	19
Figura 18	Foglio di calcolo taratura torbidità Worldview2.....	22
Figura 19	Legenda Torbidità Modis (NTU).....	24
Figura 20	Torbidity Modis 22 lug.....	24
Figura 21	Torbidity Modis 23 lug.....	24
Figura 22	Torbidity Modis 24 lug.....	24
Figura 23	Torbidity Modis 25 lug.....	24
Figura 24	Torbidity Modis 26 lug.....	24
Figura 25	Legenda torbidità Modis (NTU)	25
Figura 26	Torbidity Modis 21 set.....	25
Figura 27	Torbidity Modis 23 set.....	25
Figura 28	Torbidity Modis 24 set.....	25
Figura 29	Torbidity Landsat.....	26
Figura 30	Legenda torbidità Landsat (NTU).....	26
Figura 31	Torbidity Worldview2 set 2013	27
Figura 32	Legenda torbidità worldview2 (NTU)	27
Figura 33	Torbidity Worldview lug 2012	27

Figura 34 Legenda torbidità Worldview (NTU).....	27
Figura 35 Taratura trasparenza con Modis	28
Figura 36 Taratura trasparenza con Landsat	30
Figura 37 Foglio di calcolo taratura trasparenza con worldview2	32
Figura 38 Legenda trasparenza Modis (m)	34
Figura 39 Trasparenza Modis 22 lug.....	34
Figura 40 Trasparenza Modis 23 lug.....	34
Figura 41 Trasparenza Modis 24 lug.....	34
Figura 42 Trasparenza 25 lug.....	34
Figura 43 Trasparenza Modis 26 lug.....	34
Figura 44 Legenda trasparenza Modis (m)	35
Figura 45 Trasparenza Modis 21 set.....	35
Figura 46 Trasparenza Modis 23 set.....	35
Figura 47 Trasparenza Modis 24 set.....	35
Figura 48 Trasparenza Landsat	36
Figura 49 Legenda trasparenza Landsat (m)	36
Figura 50 Trasparenza Worldview set 13	36
Figura 51 Legenda trasparenza Worldview (m)	36
Figura 52 Trasparenza Worldview lug 2012	37
Figura 53 Legenda trasparenza worldview (m)	37
Figura 54 Foglio di calcolo taratura TSS modis.....	37
Figura 55 Foglio di calcolo taratura TSS Landsat	39
Figura 56 TSS Landsat	41
Figura 57 Legenda TSS Landsat (mg/l).....	41
Figura 58 Immagine termica Modis 24 luglio 2013	41
Figura 59 Immagine termica Landsat	42
Figura 60 Legenda immagine termica Landsat (°C)	42
Figura 61 modis-worldview	43
Figura 62 modis-landsat	43
Figura 63 landsat-worldview	43
Figura 64 modis-worldview	43
Figura 65 modis-landsat	43
Figura 66 landsat-worldview	43
Figura 67 Scala confronto errori.....	44

Indice delle tabelle

Tabella 1 Bande spettrali Modis	9
Tabella 2 Bande spettrali Landsat 7.....	10
Tabella 3 Parametri statistici torbidità Modis	19
Tabella 4 Parametri statistici torbidità Landsat.....	21
Tabella 5 Parametri statistici torbidità worldview	23
Tabella 6 Parametri statistici trasparenza Modis	29
Tabella 7 Parametri statistici trasparenza Landsat.....	31
Tabella 8 Parametri statistici trasparenza worldview	33
Tabella 9 Parametri statistici TSS Landsat	40
Tabella 10 Riassunto algoritmi	45

Indice dei grafici

Grafico 1 Calibrazione torbidità Modis.....	18
Grafico 2 Validazione torbidità Modis.....	18
Grafico 3 Calibrazione torbidità Landsat	20
Grafico 4 Calibrazione torbidità Landsat	20
Grafico 5 Calibrazione HARMA torbidità Landsat	20
Grafico 6 Validazione torbidità Landsat	21
Grafico 7 Calibrazione torbidità Worldview2	22
Grafico 8 Validazione torbidità Worldview2	23
Grafico 9 Calibrazione Trasparenza Modis.....	28
Grafico 10 Validazione trasparenza Modis.....	29
Grafico 11 Calibrazione trasparenza Landsat.....	30
Grafico 12 Validazione trasparenza Landsat	31
Grafico 13 Calibrazione trasparenza Worldview2	32
Grafico 14 Validazione trasparenza Worldview2	33
Grafico 15 Calibrazione Solidi sospesi totali Modis.....	38
Grafico 16 Validazione Solidi sospesi totali	38
Grafico 17 Calibrazione TSS HARMA Landsat	39
Grafico 18 Calibrazione TSS Landsat.....	40
Grafico 19 Validazione TSS Landsat.....	40

Abstract

L'obiettivo di questo lavoro è l'utilizzo del dato satellitare per studiare i parametri di qualità delle acque del ramo del Lago Maggiore area estuario del fiume Toce.

L'elaborato si basa sulla taratura dei dati di riflettanza rilevati da diversi satelliti mediante i dati campionati in situ, al fine di ottenere delle relazioni empiriche sito-specifiche che consentano di correlare il dato satellitare con i parametri qualitativi del corpo idrico: in particolare sono stati analizzati torbidità, trasparenza, solidi sospesi totali e temperatura superficiale.

Le relazioni matematiche riflettanza-parametro, dopo un confronto con le relazioni già esistenti in letteratura, sono state applicate alle immagini telerilevate e si è potuto procedere alla mappatura dell'area di indagine.

I risultati ottenuti hanno mostrato una buona correlazione per i parametri di torbidità e trasparenza dai dati di ogni satellite utilizzato, mentre le relazioni matematiche ricavate per i solidi sospesi totali da Modis non hanno restituito valori di correlazione apprezzabili, pertanto non se ne è provveduto alla mappatura. Per i parametri di torbidità e trasparenza è stato inoltre eseguito un confronto tra i risultati ottenuti a partire da dati di riflettanza provenienti da satelliti diversi, ed è risultato che l'errore commesso è trascurabile per le aree più interne del bacino, mentre aumenta sensibilmente nelle zone sottocosta.

1 Introduzione

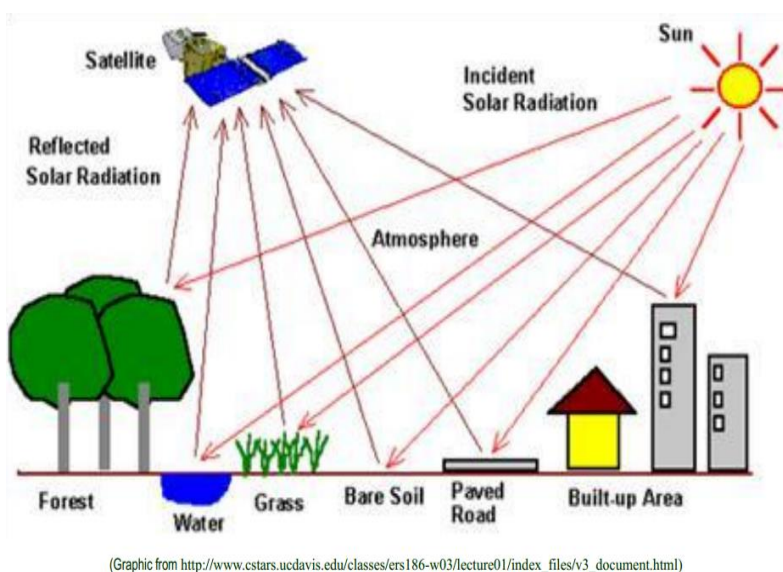
1.1 Finalità e campo di applicazione

L'obiettivo di questo lavoro è l'utilizzo del dato satellitare per studiare i parametri di qualità delle acque del ramo del Lago Maggiore nell'area dell'estuario del fiume Toce.

È stato scelto di usare il telerilevamento da satellite perché questa tecnologia ha il grande vantaggio di consentire un monitoraggio continuativo dal punto di vista temporale ed estensivo dal punto di vista spaziale, rispetto al classico campionamento *in situ*, che restituisce un risultato maggiormente accurato, ma non estensivo, antieconomico e *time-consuming*.

1.1.1 Principio di funzionamento

Il telerilevamento si basa sul rilievo, da parte di satelliti in orbita attorno al pianeta, di una grandezza emessa da un oggetto a terra: nel nostro caso la radiazione elettromagnetica riflessa nello spazio (Riflettanza).



I parametri qualitativi non si ottengono direttamente dall'immagine satellitare ma devono essere calcolati partendo dal dato di riflettanza rilevata dai corpi idrici in range di bande ottiche che variano da satellite a satellite.

Al momento non sono disponibili delle relazioni analitiche univoche in grado di correlare le grandezze fisiche dell'immagine rilevata con il dato qualitativo, pertanto tutte le indagini da telerilevamento necessitano di un processo di calibrazione mediante misure *in situ*.

Figura 1 Principio di funzionamento

1.1.2 Analisi dei vantaggi e degli svantaggi

Il telerilevamento rappresenta un'opportunità per:

- superare il concetto puntuale di campionamento a vantaggio di una descrizione spaziale completa;
- valorizzare la misura puntuale *in situ* per estenderne il significato nello spazio circostante;
- accedere a serie temporali di misure spazialmente distribuite;
- ampliare la conoscenza delle fenomenologie in atto anche in aree inaccessibili e/o pericolose;
- ottimizzare i metodi specifici di correzione atmosferica e del trasferimento radiativo;
- creare procedure in parte o completamente automatizzate per il monitoraggio ambientale, in grado di dare una risposta rapida per l'individuazione tempestiva e la gestione delle emergenze;
- confrontare differenti dati mediante Sistemi Informativi Territoriali;
- ottenere questi miglioramenti a costi e tempi contenuti;

Tuttavia la precisione del dato tele rilevato dipende da 4 tipologie di risoluzione del sensore, ovvero:

- radiometrica: la minima differenza di radiazione che il sensore può cogliere;
- spaziale: precisione del pixel;
- temporale: periodo di rotazione del satellite;
- spettrale: numero e tipo di lunghezze d'onda misurabili.

Queste, insieme alla copertura nuvolosa e alla stima non diretta dei parametri, costituiscono i principali svantaggi delle informazioni satellitari.

1.2 Stato dell'arte e analisi bibliografica

1.2.1 Telerilevamento e sensori

Il telerilevamento nasce negli anni 70 dalla necessità di uno strumento per lo studio su larga scala dei processi ambientali, e dagli anni 80 diventa, grazie allo sviluppo tecnologico dei sensori satellitari, un valido strumento anche per il monitoraggio di alcuni tra i più importanti parametri qualitativi delle acque interne.

Nel 1984 fu messo in orbita il satellite Landsat-5 che montava il sensore Thematic Mapper (TM), che grazie alla buona risoluzione spaziale, 30m, è stato di gran lunga il più utilizzato per il monitoraggio delle acque interne, anche per i bacini minori (50ha). Le bande ottiche rilevate erano il blu/verde, verde, rosso, infrarosso vicino, medio e lontano e infrarosso termico: in particolare, secondo Dekker-Peters TM1 può essere usato per la misura di clorofilla-a, TM2 per il fitoplancton, TM3 per i fenomeni interessati da alta presenza di sedimenti e TM4 probabilmente per i TSS (Giardino et al. 2001).

Nel 2000 fu lanciato il satellite TERRA con a bordo il primo dei due sensori MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectrometer) mentre, nel 2002, il secondo MODIS fu lanciato a bordo del satellite AQUA. La risoluzione dei prodotti operativi è di 1 km per Clorofilla-a, Kd490, e Temperatura, ma possiede anche 4 bande con risoluzione maggiore, 2 a 250 m e 2 a 500 m utili per ottenere mediante algoritmi rispettivamente Torbidità e Solidi Sospesi Totali. Inoltre il MODIS è in grado di misurare la temperatura superficiale delle acque (SST, Sea Surface Temperature) grazie a delle bande nell'infrarosso.

Nel 2002 è stato lanciato anche il primo sensore per lo studio del colore del mare dall'Agenzia Spaziale Europea, MERIS (MEdium-Resolution Imaging Spectrometer) fino al 2012.

Gli anni 2000 hanno visto l'avvento di una serie di satelliti commerciali, con costi molto elevati e non operativi, alcuni dei quali ad altissima risoluzione ed accuratezza, si cita ad esempio il worldview2 utilizzato nel nostro progetto, con una risoluzione di 1.8m pixel e rilievo, accanto alle tipiche bande Blu, Verde, Rosso ed Infrarosso vicino, di quattro ulteriori bande spettrali: blu costiero, giallo, rosso lontano, infrarosso medio. I range delle bande spettrali sono mostrati nell'immagine a lato.

1.2.1.1 Alcune applicazioni italiane

Dal 1996 il CNR ha utilizzato il sensore Hyperion per studiare la produttività dell'intero bacino del Lago di Garda in tempi diversi, creando mappe delle fioriture algali, della trasparenza, della temperatura e dei solidi sospesi. [Defrancesco et al.,2001]

CNR-IREA ha continuato il progetto con il Progetto NINFA, che consiste nella sperimentazione di un sistema integrato di telerilevamento per il monitoraggio delle acque dei laghi con la calibrazione di un modello analitico bio-ottici e la calibrazione della correzione atmosferica.[Progetto NINFA 2003]

Negli stessi anni il progetto della Comunità Europea denominato SALMON (SATellite remote sensing for Lake MONitoring) ha testato l'uso del Landsat-5 TM per compiere un'analisi di sensitività e utilizzare vari modelli per interpretarne la Riflettanza.

[Brivio et al.,2001].

Parte di questo progetto è includeva uno tra i più importanti studi italiani in materia, dall'ampio riscontro internazionale, è quello intrapreso nel 1997 dal CNR-IREA per lo studio di clorofilla-a, trasparenza e temperatura superficiale del lago d'Iseo, utilizzando il satellite Landsat.

Per studiare in maniera appropriata la radianza in uscita dalle acque lacustri, i dati satellitari hanno subito un processo di correzione atmosferica mediante un metodo parzialmente basato sulle immagini e in parte misurando la trasmittanza atmosferica in sincrono al passaggio satellitare.

È stato utilizzato un approccio empirico per correlare la radianza atmosfericamente corretta con le misure al suolo per i diversi parametri: ad esempio emerge una forte correlazione, dell'ordine dell'85%, tra la trasparenza misurata in situ e quella calcolata empiricamente come direttamente proporzionale al rapporto fra le bande blu e verde; il risultato di tale correlazione ha portato alla mappatura completa del lago, dal quale si evince una forte influenza negativa sulla trasparenza ad opera fiume immissario nei pressi dell'estuario.

[Giardino et al. 2001]

Nel 2008 è stato effettuato uno studio da parte dell'Università della Basilicata sui Laghi di Monticchio per valutare l'applicabilità del telerilevamento con satellite Landsat anche a corpi idrici interni dalla superficie molto ridotta, nel caso specifico rispettivamente 41 e 14 ha, per i parametri di clorofilla-a e trasparenza.

Il modello di correlazione tra la radianza rilevata ed i parametri ricercati è stato ricavato mediante calibrazione con misure eseguite *in situ*, ed ha restituito valori dei coefficienti di correlazione abbastanza elevati.

In seguito alla mappatura dei due laghi, si è giunti alla conclusione che la presenza di clorofilla-a e la trasparenza sono fortemente correlate (93%) da una relazione di dipendenza lineare.

[Mancino et al. 2009]

1.2.1.2 Alcune applicazioni internazionali

Un recente lavoro canadese ha studiato l'applicabilità di un metodo che combina i dati Modis con Landsat per lo studio dei parametri qualitativi dei laghi nord-americani.

Gli obiettivi principali sono stati la review dei vari metodi basati sul Remote Sensing, e lo sviluppo di una procedura basata su questa tecnica per predire la qualità delle acque provenienti da diverse fonti nel territorio di Alberta.

Si è preferito l'impiego del MODIS che non richiede un pre-processing dei dati (correzioni atmosferiche o geometriche) ma il suo impiego non è qui consigliato nel caso di acque interne per la sua bassa risoluzione. Il Landsat TM/ETM+ è ottimo come risoluzione ma ha un periodo di rotazione elevato (16 gg, contro i 2 del MODIS).

Per risolvere il problema l'autore dello studio ha proposto un modello di fusione MODIS e Landsat della riflettanza nello spazio e nel tempo denominato STARFM, algoritmo sviluppato da Gao et al. 2007 per unire la riflettanza superficiale, che darà un prodotto ETM+ con risoluzione spaziale 30 m. I campionamenti effettuati *in situ* sono usati al 60% per tarare e al 40% per stimare gli algoritmi.

[T. A. Akba et al., 2010]

Uno studio finlandese del 2001 ha studiato l'applicabilità della combinazione di bande dei satelliti Modis e Meris per lo studio dei parametri di clorofilla-a, torbidità, solidi sospesi e trasparenza in laghi e aree costiere della Finlandia.

Sono stati testati gli algoritmi semi-empirici mediante regressioni analitiche e confrontati con i campionamenti eseguiti nelle estati 1997 e 1998 in laghi meridionali e aree costiere baltiche.

I risultati forniti dal satellite Meris hanno il potenziale di determinare con una certa accuratezza i parametri qualitativi di acque interne e costiere, mentre i risultati ottenuti dal satellite Modis sono applicazione limitata alle acque costiere per torbidità, trasparenza e solidi sospesi.

[Härmä et al. 2001]

L'università della Florida (USA) ha effettuato nel 2007 uno studio volto all'utilizzo delle immagini ricavate dal satellite Modis per monitorare l'andamento spaziale e temporale della torbidità della baia di Tampa, servendosi di una serie di immagini e di campionamenti da maggio 2003 ad aprile 2006.

Dato il buon numero di dati disponibili, si è potuto giungere ad un algoritmo abbastanza robusto che ha permesso una mappatura completa dell'area di indagine, mostrando forti variabilità stagionali dovute alla ri-sospensione di materia ad opera dei venti.

[Chen et al. 2007]

Un team universitario cinese ha studiato nel 2008 l'applicabilità del satellite Modis per lo studio della trasparenza di acque interne, usando come caso di studio il lago Poyang. La ricerca nasce dalla necessità di effettuare un monitoraggio a intervalli temporali più ravvicinati (1g) di quelli consentiti dal satellite Landsat (16gg), nonostante la più grossolana risoluzione spaziale di pixel (250 m contro i 30m del Landsat).

Lo studio ha raffrontato i dati di riflettanza rilevati da Modis con quelli rilevati da Landsat, mappando le dinamiche spazio-temporali del lago e mostrando una forte correlazione (94%) tra i gli algoritmi calibrati dai due satelliti.

[Wu et al. 2008]

1.2.2 Contributo rispetto alla letteratura esistente

Questo lavoro presenta un'applicazione quantitativa delle tecniche di telerilevamento per il monitoraggio dei parametri di qualità di torbidità, trasparenza e solidi sospesi, per le acque del Lago Maggiore, a partire dai dati di riflettanza del satellite Modis che dal Satellite Landsat.

Mediante i dati di riflettanza del satellite WV2 ad altissima risoluzione si cercheranno di validare gli algoritmi.

1.3 Qualità di un corpo idrico superficiale

1.3.1 Parametri studiati per il monitoraggio

I parametri oggetto dell'indagine sono torbidità, solidi sospesi, trasparenza, temperatura.

Solidi sospesi (TSS)

Con il termine Solidi Sospesi Totali si intendono tutte quelle sostanze indisciolte, presenti nell'acqua, che vengono trattenute da un filtro a membrana di determinata porosità, quando l'acqua stessa viene sottoposta a filtrazione. La presenza di solidi sospesi oltre determinati limiti di concentrazione altera la normale trasparenza dell'acqua rallentando lo sviluppo delle forme di vita, in particolare quelle sensibili alla luce, ma soprattutto costituisce un veicolo per la diffusione dei contaminanti delle acque come batteri, sostanze nutrienti, pesticidi, metalli etc., che possono essere trasportati anche per lunghe distanze adesi sulla superficie delle particelle solide in sospensione.

Temperatura (T)

La temperatura delle acque superficiali dipende dall'irraggiamento solare e varia in intensità con la stagione e la latitudine. La temperatura media delle acque superficiali degli oceani è di 15°C mentre se si considerano le acque profonde la media scende a soli 3,5°C. Infatti l'acqua superficiale si riscalda a contatto con l'atmosfera e sotto i raggi del sole, in profondità invece, si accumulano le acque fredde che, essendo più dense, sono più pesanti.

Trasparenza (SDD)

La trasparenza indica la proprietà dell'acqua di mare a lasciarsi attraversare dalla radiazione solare visibile. E' determinato per immersione di un disco bianco laccato del diametro di 30 cm e di spessore di 3 mm (disco di Secchi), valutando la distanza di scomparsa alla vista dell'operatore (da 15 cm a 20 m). La trasparenza è influenzata dalla risospensione del sedimento ad opera del moto ondoso, bagnanti, presenza di materiale inorganico e/o fioriture microalgali.

Torbidità (TB)

Con il termine torbidità si definisce la riduzione della trasparenza di un campione dovuta alla presenza di sostanze in sospensione. La torbidità è un parametro importante in quanto influenza la fotosintesi da parte delle piante acquatiche: un'elevata torbidità riduce la penetrazione della luce e quindi la fotosintesi. Questo comporta anche una riduzione dell'ossigeno disciolto in profondità e quindi influenza la sopravvivenza delle specie presenti nell'acqua.

1.3.2 Classificazioni

Lo stato ambientale è determinato dalla combinazione di:

- stato ecologico, espressione della complessità degli ecosistemi acquatici, a cui concorrono sia parametri chimici e fisici, relativi al bilancio dell'ossigeno ed allo stato trofico, sia opportuni indicatori biologici come l'Indice Biotico Esteso
- stato chimico, più semplicemente determinato dalla presenza o meno di sostanze chimiche pericolose in relazione a prefissati valori soglia.

Tabella 1 - Parametri chimico-fisici di base di corpi lacustri

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>pH</i>
<i>Alcalinità (mg/L Ca(HCO₃)₂)</i>	<i>Trasparenza (m)</i>
<i>Ossigeno disciolto (mg/L)</i>	<i>Ossigeno ipolimnico (% di saturazione)</i>
<i>Clorofilla "a" (µg/L)</i>	<i>Fosforo totale (P µg/L)</i>
<i>Ortofosfato (P µg/L)</i>	<i>Azoto nitroso (N µg/L)</i>
<i>Azoto nitrico (N-mg/L)</i>	<i>Azoto ammoniacale (N mg/L)</i>
<i>Conducibilità Elettrica Specifica (µS/cm (20°C))</i>	<i>Azoto totale (N mg/L)</i>

2 Metodologia operativa

In questo capitolo viene descritto il processo di calibrazione degli algoritmi che trasformano i dati di radianza rilevata dai satelliti nei parametri quantitativi di qualità dell'acqua.

2.1 Principio fisico di funzionamento

I sensori sono in grado di rilevare la percentuale di energia radiante che viene riflessa dai corpi oggetto di indagine, si misurano quindi le radiazioni elettromagnetiche (emesse o riflesse) da parte della superficie osservata a frequenze stabilite. La relazione fra l'energia termica (ΔE) assorbita per passare allo stato eccitato e la lunghezza d'onda λ del fotone emesso in fase di rilassamento radiante è descritta dalla legge di Planck:

$$\Delta E = h\nu = hc/\lambda$$

dove:

h = costante di Planck ($6,6262 \times 10^{-34}$ J·s);

ν = frequenza, cioè il numero di oscillazioni al secondo (c/λ , c = velocità della luce nel vuoto ($2,9979 \times 10^8$ m/s));

ΔE = energia termica assorbita nel passaggio allo stato eccitato;

λ = lunghezza d'onda del fotone emesso in fase di rilassamento.

La radianza è definita come la quantità di luce, in un cono infinitesimale ed in una determinata direzione, che attraversa una superficie normale alla sua direzione di propagazione normalizzata per angolo solido, $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$.

2.1.1 Firma spettrale

Ogni corpo dunque emette un certo valore di radiazione, dipendente dalla sua composizione chimica, dallo stato fisico e dalla sua temperatura. La quantità di radiazione elettromagnetica riflessa, assorbita, trasmessa da un qualsiasi oggetto varia al variare della lunghezza d'onda.

Questa importante proprietà consente l'identificazione e la separazione degli oggetti osservati attraverso la loro firma spettrale. Misurando l'energia riflessa e/o emessa dagli oggetti alle diverse lunghezze d'onda è possibile costruire la loro curva o firma spettrale.

La quantità di radiazione proveniente da un oggetto, la **radianza**, è funzione sia delle proprietà chimico fisiche dell'oggetto, sia della radiazione che arriva all'oggetto (irradianza). Se il sole è la fonte di irradianza essa non può essere costante poiché si modifica a seconda dell'ora e delle condizioni atmosferiche.

Tuttavia essa non è necessariamente un buon indicatore delle proprietà fisiche dello stesso. Si utilizza invece la riflettanza, data dal rapporto tra la radianza di un oggetto e l'irradianza che raggiunge lo stesso, che dipende dall'angolo di osservazione dello strumento e dall'angolo del sole.

In linea di principio, vari tipi di superfici possono essere distinte fra loro grazie a tali differenze nelle riflettività (coefficiente di riflessione) relative, supposto che ci sia uno strumento adeguato per la misura di tali differenze in funzione della lunghezza d'onda e dell'intensità della radiazione riflessa (come frazione o percentuale della radiazione incidente).

Confrontando le firme di oggetti differenti è possibile distinguerli tra loro molto meglio rispetto alla comparazione su un'unica lunghezza d'onda, per esempio l'acqua e la vegetazione possono avere la stessa risposta spettrale nel campo del visibile ma sono quasi sempre ben distinguibili nel campo dell'infrarosso.

L'osservazione con strumenti multispettrali è realizzata attraverso la registrazione simultanea di più bande spettrali, tipicamente blu, verde, rosso e infrarosso vicino. La risoluzione geometrica risulta inferiore rispetto al corrispondente pancromatico (di solito rapporto 1:4), ma il carico informativo che portano è di tipo spettrale, è così possibile riconoscere le superfici al suolo attraverso la loro firma spettrale al fine di generare mappe tematiche su vegetazione, uso o copertura dei suoli, censimento dell'urbano, qualità delle acque ecc..

2.1.2 Correzione atmosferica

Le radiazioni elettromagnetiche durante il loro tragitto (dal sole verso un oggetto e da lì verso il sensore satellitare) interagiscono con le sostanze presenti nell'atmosfera (aria, vapore acqueo e altri aerosol) e con componenti presenti in acqua.

L'ozono, l'anidride carbonica ed il vapore acqueo sono i tre elementi atmosferici principali che assorbono la radiazione per poi riemetterla sotto forma di energia radiante con lunghezza d'onda maggiore.

L'ozono assorbe la radiazione ultravioletta dal sole, l'anidride carbonica, gas serra, tende ad assorbire fortemente la radiazione nella parte dell'infrarosso lontano dello spettro. Il vapore acqueo nell'atmosfera assorbe gran parte della radiazione nelle bande più lunghe dell'infrarosso e più corte del microonde. La presenza di vapore acqueo nell'atmosfera più bassa varia notevolmente da luogo a luogo e lungo l'arco dell'anno.

Poiché questi gas assorbono l'energia elettromagnetica in regioni molto specifiche dello spettro, è possibile individuare "zone" dello spettro che non sono influenzate da tale assorbimento atmosferico e quindi utilizzabili per il telerilevamento, sono le cosiddette finestre atmosferiche. Si nota infatti che nell'infrarosso e nel visibile l'influenza dell'atmosfera è minima. Osservando in particolare il campo del visibile, l'influenza aumenta andando dal rosso 0.645 μm al verde 0.550 μm al blu 0.440 μm .

È evidente che è di fondamentale importanza una correzione atmosferica al fine di non compromettere i valori telerilevati.

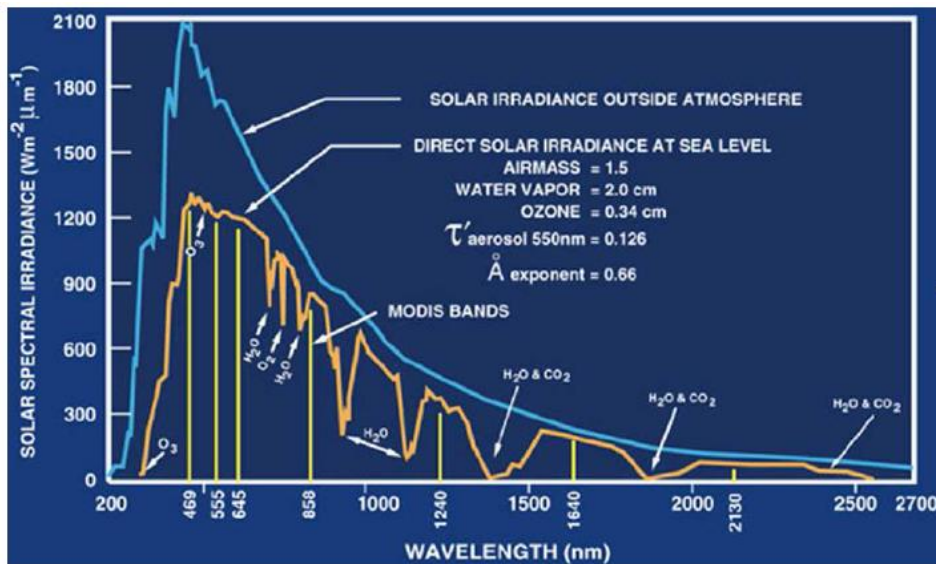


Figura 2 Finestre atmosferiche

Si è scelto un metodo già utilizzato in letteratura, che non richiede informazioni al di fuori dell'immagine. [W. M. Baugh ET AL., 2006] La tecnica prende il nome di "Sottrazione dell'oggetto scuro", Dark Object Subtraction.[Chavez et al. 1996], applicato mediante software nell'elaborazione delle immagini satellitari.

2.2 Dati satellitari e strumenti di monitoraggio

I sensori utilizzati per il telerilevamento si distinguono in sensori attivi e passivi: i primi sono dotati di una sorgente che emette propria radiazione elettromagnetica (ad esempio il Lidar, dotato di una sorgente laser di radiazione luminosa coerente, oppure il radar), mentre i secondi misurano la radiazione emessa dall'oggetto oppure quella generata da una diversa sorgente e diffusa dall'oggetto. I sensori passivi sono genericamente chiamati radiometri (a indicare che misurano la radiazione elettromagnetica).

2.2.1 Sensori

I sensori sono classificati in base alle caratteristiche tecniche del sensore.

Nello specifico ci sono quattro tipologie di risoluzione del sensore, ovvero:

- Radiometrica, rappresenta la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia raggiante
- Spaziale, dimensioni dell'area elementare al suolo di cui si rileva l'energia elettromagnetica
- Temporale, periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area
- spettrale, indica il numero di bande di acquisizione e la loro ampiezza. Migliore è la risoluzione spettrale, più piccolo è l'intervallo di lunghezze d'onda per una particolare banda

Queste risoluzioni dipendono sia dall'ingegneria dello strumento che dalle caratteristiche della piattaforma e dall'altezza di volo o tipo di orbita.

Le tipologie di sensori più diffuse si dividono in:

- sensori ad alta risoluzione geometrica (da 1m a 4m) e bassa risoluzione temporale (da 1 a 5 giorni), in grado di riprendere, con grande precisione, porzioni della superficie terrestre in immagini multispettrali o pancromatiche. Tali sensori (es. WORLDVIEW2) vengono utilizzati principalmente per studi a scala locale, come mappature delle aree urbane o il controllo delle condizioni dei territori agricoli;
- sensori a media risoluzione geometrica (15-30m) e media risoluzione temporale (16-26 giorni), che permettono osservazioni a scala regionale (es. THEMATIC MAPPER, a bordo del satellite Landsat). Questi, sono impiegati, ad esempio, per il monitoraggio di catastrofi naturali (incendi, frane, alluvioni) o l'analisi dell'estensione delle coperture vegetali e dei cambiamenti nel tempo dell'uso del suolo;
- sensori a bassa risoluzione geometrica (da 250m a 1km) e alta risoluzione temporale (0.25-0.5 giorni), adatti a studi a scala globale delle variazioni temporali ad alta frequenza delle caratteristiche proprie di diverse superfici terrestri (es. MODIS e MERIS).

2.2.1.1 Il sensore MODIS

La NASA (National Aeronautic and Space Administration), a partire dal 1991, ha dato inizio ad un programma a scala globale con lo scopo di studiare i principali comparti ambientali del nostro Pianeta: aria, acqua, terra e biota. Il cuore di questa missione è rappresentato dall'Earth Observing System (EOS), un insieme di satelliti ad orbita polare, che conducono osservazioni a lungo termine della superficie terrestre. Nell'ambito del suddetto programma internazionale EOS, intrapreso in collaborazione tra USA (NASA) e Giappone (NASDA), sono state lanciate in orbita diverse piattaforme satellitari. Due di queste sono TERRA, lanciata nel 1999, e AQUA, lanciata nel 2002. TERRA e AQUA ruotano attorno al nostro pianeta seguendo un'orbita polare eliosincrona, e su entrambi sono stati montati i sensori MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Tale sensore è costituito da uno scanner in grado di riprendere la radiazione terrestre in 36 bande spettrali discrete, che spaziano dalla lunghezza d'onda del visibile a quella dell'infrarosso termico (0.4-14.5 μ m). Gli strumenti raccolgono dati in 36 bande spettrali, compresi tra 0,4 μ m e 14,4 μ m di lunghezza d'onda, e con ampia risoluzione spaziale. Ventinove bande sono alla risoluzione di 1 km, due bande a 250 m e cinque a 500 m.

I dati sono resi disponibili gratuitamente al sito web www.reverb.echo.nasa.gov

Nella tabella sottostante vengono presentate le 36 bande spettrali MODIS con i rispettivi principali utilizzi.

Tabella 1 Bande spettrali Modis

Primary Use	Band	Bandwidth ¹	Spectral Radiance ²	Required SNR ³
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Ocean Color/ Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
Atmospheric Water Vapor	16	862 - 877	6.2	516
	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
Surface/Cloud Temperature	19	915 - 965	15.0	250
	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
Atmospheric Temperature	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07
	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
Cirrus Clouds Water Vapor	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
Cloud Properties	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
Surface/Cloud Temperature	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
Cloud Top Altitude	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35

2.2.1.2 Il satellite LANDSAT

Landsat è un progetto per l'acquisizione di immagini satellitari ad opera dall'organizzazione scientifica statunitense USGS che opera da più tempo (1972). Nel corso del tempo sono stati lanciati otto satelliti per lo studio di ambiente ed ecosistemi, risorse naturali e minacce per l'uomo e l'ambiente, impatti climatici e uso del territorio.

Nel corso del tempo sono stati lanciati diversi sensori, quelli utilizzati in questo lavoro sono:

- Landsat 7: 7 bande dalla risoluzione spaziale di 30m ed una a 15m
- Landsat 8: 8 bande dalla risoluzione spaziale di 30m, una a 15m e 2 da 100m

I dati sono resi disponibili gratuitamente al sito web www.earthexplorer.usgs.gov

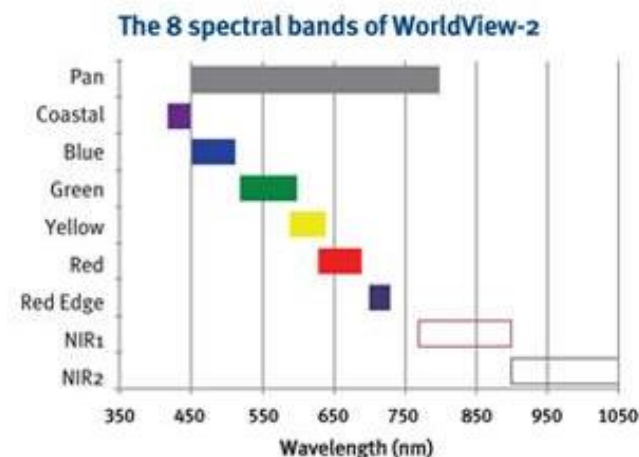
Nella tabella sottostante sono mostrate le bande del satellite Landsat 7

Tabella 2 Bande spettrali Landsat 7

Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	Lunghezza d'onda (micrometers)	Resolution (meters)
	Band 1	0.45-0.52	30
	Band 2	0.52-0.60	30
	Band 3	0.63-0.69	30
	Band 4	0.77-0.90	30
	Band 5	1.55-1.75	30
	Band 6	10.40-12.50	60 * (30)
	Band 7	2.09-2.35	30
	Band 8	.52-.90	15

2.2.1.3 Il satellite Worldview2

Worldview2 è un satellite commerciale (a pagamento circa 8k euro per immagine) che monta sensori ad altissima risoluzione spaziale messo in opera dalla società DigitalGlobe nel 2009. Il sensore raccoglie dati in 8 bande spettrali, alla risoluzione spaziale di 1,85m e l'acquisizione è a richiesta, pertanto non utilizzabile per un monitoraggio in continuo.



In figura sono riportati i range di bande rilevati dal satellite Worldview2: la novità rispetto ai satelliti di più vecchia concezione è costituita dalla presenza di 4 nuove bande: Blu costiero, Giallo, Infrarosso vicino 1 e Infrarosso vicino 2.

Nell'elaborato le bande sono state per convenzione denominate da b1 a b8 a partire dal Blu costiero.

Dato che in letteratura non esistono studi di applicazioni del telerilevamento per l'analisi dei parametri qualitativi delle acque con satellite Wv2, questo elaborato porta un plusvalore nel panorama dell'utilizzo.

Figura 3 Bande spettrali satellite Worldview2

2.2.2 Metodi per interpretare i Digital Number

Si è detto che tramite telerilevamento è possibile studiare un'ampia serie di parametri, i quali sono in grado di contribuire alla definizione della qualità di acque superficiali; nella pratica, i dati rilevati dai sensori esplicitano i valori di radianza delle superfici indagate, quindi è necessario stabilire una relazione quantitativa tra tali valori di radianza al sensore e i parametri biologici, idro morfologici e fisico-chimici d'interesse:

- il metodo empirico è basato sullo sviluppo di relazioni statistiche tra i valori spettrali misurati dal sensore e parametri caratteristici della qualità dell'acqua, misurati in coincidenza al passaggio del sensore;
- il metodo semi analitico è un approccio che utilizza spettri di specifiche regioni dell'immagine e che implica la conoscenza delle caratteristiche spettrali delle sostanze otticamente attive, ricercate nell'acqua, per sviluppare algoritmi per questi componenti;
- il metodo analitico utilizza un approccio basato su relazioni fisiche attraverso le quali le proprietà ottiche dell'acqua sono associate alla radianza emergente dalla colonna d'acqua, a sua volta relazionata al segnale misurato dal sensore.

Il metodo analitico riguarda l'inversione di tale approccio per determinare i parametri di qualità dell'acqua dalle immagini. [Giardino et al., 2003]

2.3 Software specialistico utilizzato

Le immagini rese disponibili da satellite che contengono i dati di radianza telerilevata, necessitano di *pre-processing*, articolato in due fasi, previa calibrazione per la ricerca degli algoritmi di trasformazione.

1. La prima fase, consta di due sub-fasi, entrambe operate mediante software ENVI®

A1) Relativamente a Modis e Worldview, georeferenziazione delle immagini acquisite secondo il sistema di riferimento UTM utilizzando il Datum WGS-84

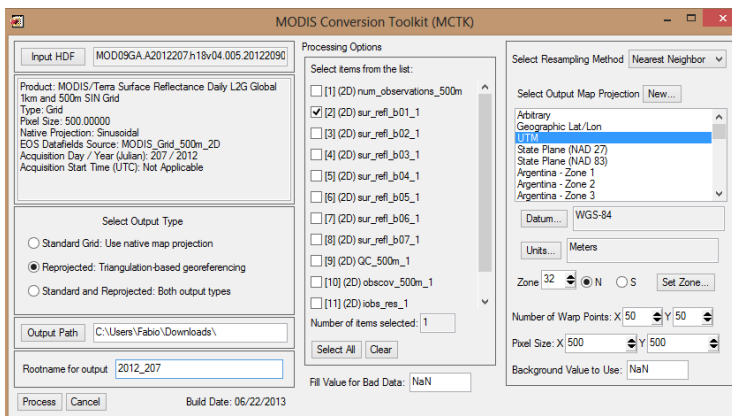


Figura 4 Georeferenziazione

A2) Relativamente a Landsat, trasformazione della radianza delle immagini acquisite in riflettanza utilizzando l'utility *Landsat calibration*

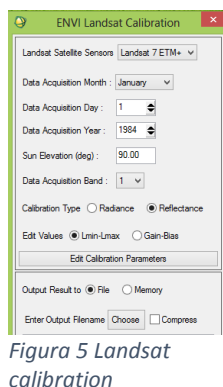


Figura 5 Landsat calibration

B) correzione atmosferica con algoritmo *Dark object subtract*



Figura 6 Correzione atmosferica

2. La seconda fase, operata con software ESRI® ArcGis, permette di:

- trasformare i file ASCII precedentemente generati in immagini raster georeferenziate
- caricare una mappatura dei punti di campionamento georeferenziate, contenente le informazioni delle grandezze misurate

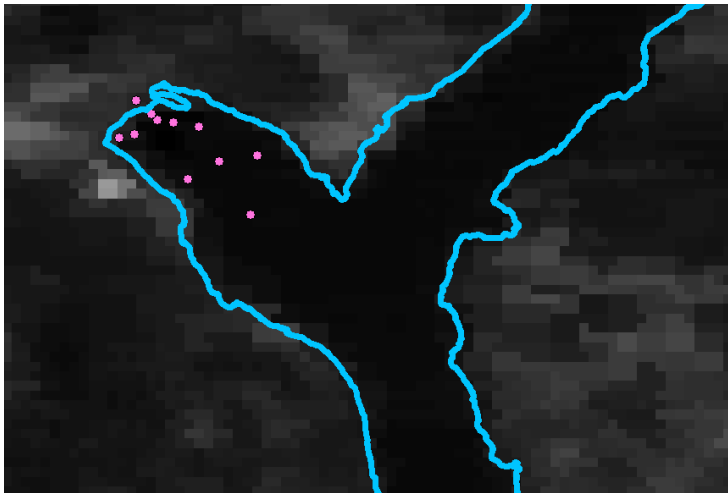


Figura 7 Esempio di mappatura di riflettanza e dei punti di campionamento

2.4 Calibrazione degli algoritmi

La procedura di calcolo degli algoritmi passa attraverso un processo di taratura ai minimi quadrati, in cui entrano in gioco i dati di riflettanza/radianza pre-processati come descritto al punto precedente ed i campionamenti *in situ*.

La taratura ai minimi quadrati utilizza tali input e restituisce come output i coefficienti delle formule analitiche di conversione, che possono essere, tipicamente, di tipo lineare, esponenziale o potenziale; non è noto a priori quale tipo di curva approssimi meglio i risultati, pertanto vanno testate tutte. Il calcolo computazionale è effettuato mediante Excel del pacchetto Microsoft Office®

Taratura ai minimi quadrati

$$y = M^T \cdot \theta$$

Con:

y = matrice dei valori campionati

M = matrice dei valori di radianza

Θ = matrice dei coefficienti, es [a b]

Da cui per ricavare la matrice dei coefficienti Θ:

$$\theta = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (M^T M)^{-1} \cdot (M^T y)$$

Il metodo di taratura ai minimi quadrati è applicabile solamente a funzioni lineari, ma esiste un metodo (linearizzazione) che consente di operare anche con funzioni esponenziali e potenziali, come di seguito illustrato:

$$\ln(y) = \ln(a) + b \ln(M)$$

In Figura 8 un esempio applicativo mediante foglio di calcolo dei coefficienti di una funzione esponenziale:

$$Torbidità = a \cdot e^{(b \cdot Radianza(\mu m))}$$

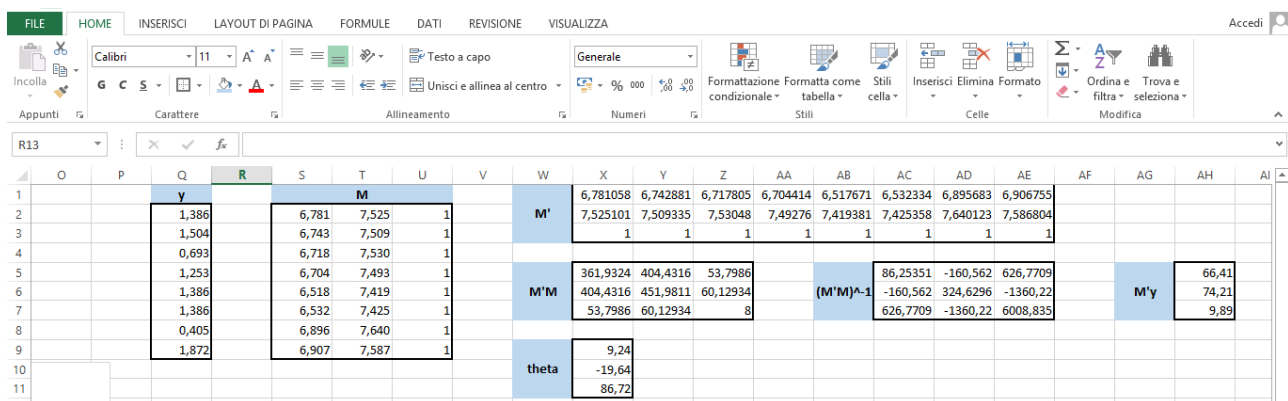


Figura 8 Esempio di foglio di calcolo di taratura ai minimi quadrati

Una volta calcolati i coefficienti di regressione delle diverse curve, ad esempio potenziale ed esponenziale, si selezionano le regressioni con coefficiente di correlazione più elevato in modulo e si calcolano i parametri di qualità mediante foglio di calcolo.

I risultati così ottenuti sono confrontati in un grafico di validazione che riporta in ascisse il parametro calcolato con la regressione ed in ordinate il parametro misurato con campionamento; dal confronto dei coefficienti di correlazione si seleziona quello dal valore assoluto più elevato, che sarà utilizzato per la mappatura del nostro studio.

3 Risultati

In questo capitolo sono ricavati gli algoritmi di calcolo di torbidità, trasparenza e successivamente viene mostrata la loro applicazione alle immagini di riflettanza rese disponibili dai satelliti, al fine di consentire la mappatura delle acque per i parametri qualitativi analizzati: lo scopo di questo elaborato infatti è la ricerca e l'analisi statistica di algoritmi, possibilmente robusti, per applicazioni di monitoraggio.

Per questo motivo lo studio non si è limitato alla sola computazione dei più comuni parametri statistici, ma è stato operato un confronto fra i risultati provenienti dalla mappatura dai diversi satelliti, al fine di appurare la buona riuscita dello studio stesso.

Nelle serie sotto riportate sono state escluse quelle immagini che, dopo la correzione atmosferica, presentavano una nuvolosità residua, anche ridotta, sullo specchio d'acqua: questo perché ciò avrebbe influito negativamente sulla riflettanza rilevata, alterando i risultati e restituendo una mappatura non coerente.

3.1 Area di studio

L'area di studio è il ramo del lago Maggiore a valle dell'estuario del fiume Toce, fino a qualche chilometro di distanza dalla costa.

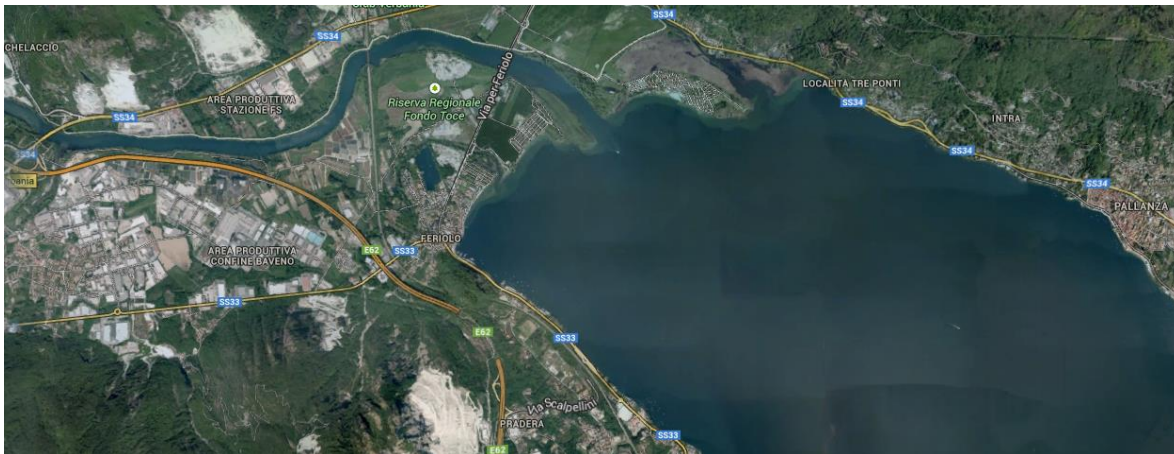


Figura 9 Area di studio: vista dall'alto

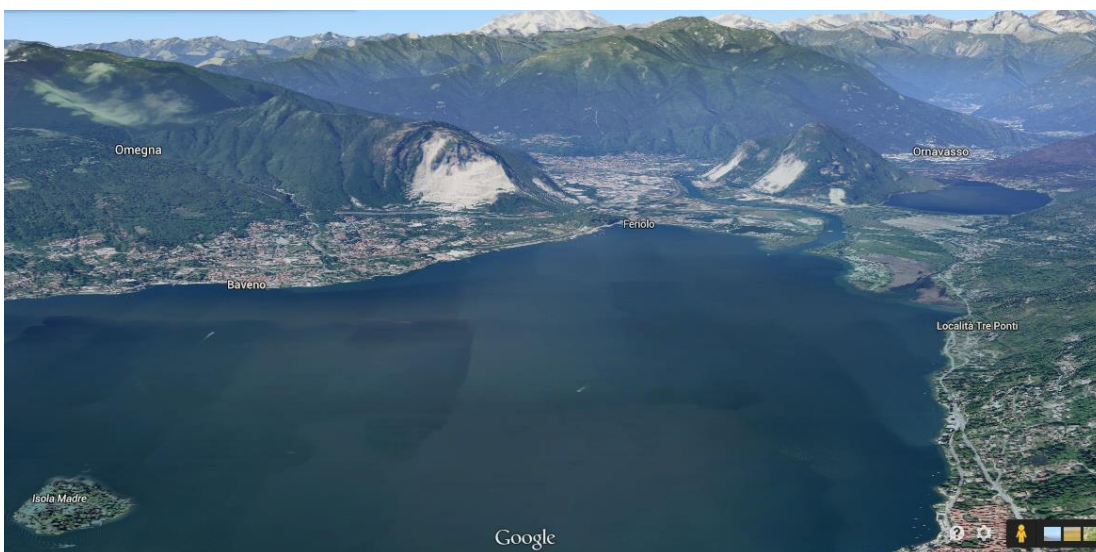
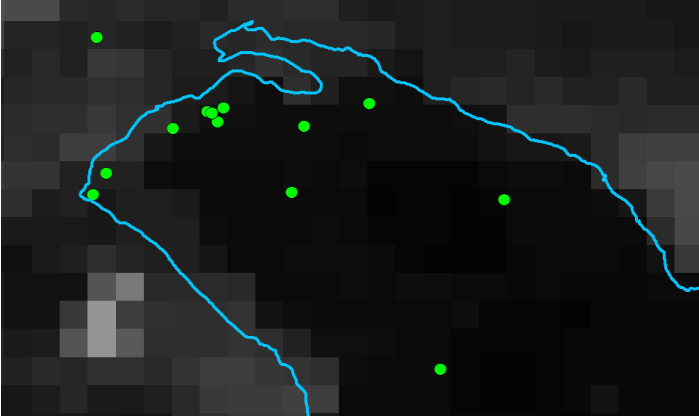


Figura 10 Area di studio: vista tridimensionale

3.2 Misure al suolo

I dati utilizzati nella calibrazione degli algoritmi sono frutto di campagne di misura in parte eseguite dal Dipartimento SIA del Politecnico di Milano ed in parte dalla società Environ, tutti i rilievi limnologici sono stati eseguiti con le classiche tecniche di campionamenti *in situ* e successiva analisi di laboratorio.

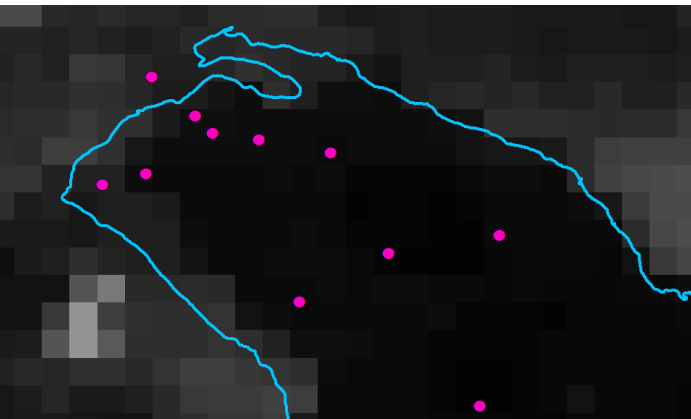
Campagna del 24 luglio 2013:



In Figura 11 si riportano in cerchi verdi i punti di campionamento ed in azzurro il profilo del bacino. I parametri rilevati sono: Torbidità alle profondità di 10 cm, 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 8m espressi in NTU; Trasparenza espressa in metri e Temperatura dell'acqua in °C alle profondità di 5cm e 1,5m. Non sono stati presi in esame quei punti che insistono su pixel non interamente ricompresi nel confine del bacino, come ad esempio i due punti verdi al centro a sinistra dell'immagine. Risoluzione pixel 250 m.

Figura 11 Campagna misure *in situ* 24 luglio 2013

Campagna del 23 settembre 2013:



In Figura 12 si riportano in cerchi rosa i punti di campionamento ed in azzurro il profilo del bacino. I parametri rilevati sono: Torbidità alle profondità di 10 cm, 1m, 2m, 3m, 5m, 8m espressi in NTU; Trasparenza espressa in metri e Temperatura dell'acqua espressa in °C alle profondità di 5cm e 1,5m.

Non sono stati presi in esame quei punti che insistono su pixel non interamente ricompresi nel confine del bacino.

Risoluzione pixel 250m.

Figura 12 Campagna misure *in situ* 23 settembre 2013

Campagne del 26 giugno 2013, 23 luglio 2013 e 28 agosto 2013

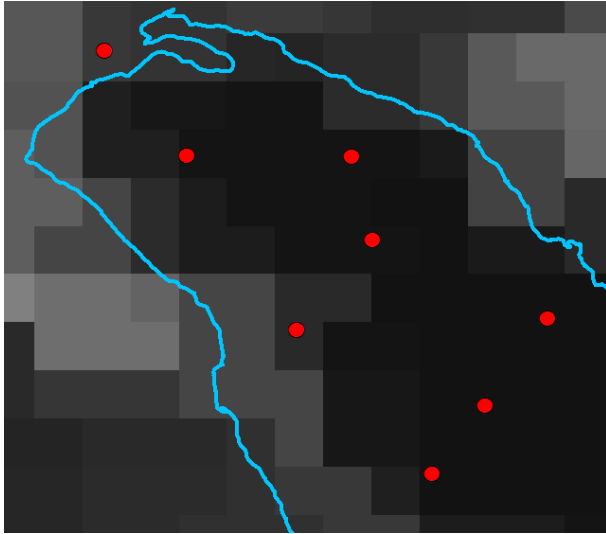


Figura 13 Campagna misure in situ 26 giugno 2013

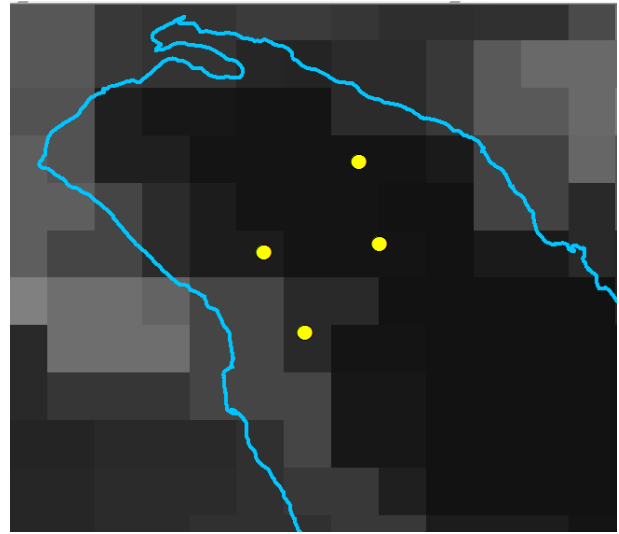


Figura 14 Campagna misure in situ 23 luglio 2013

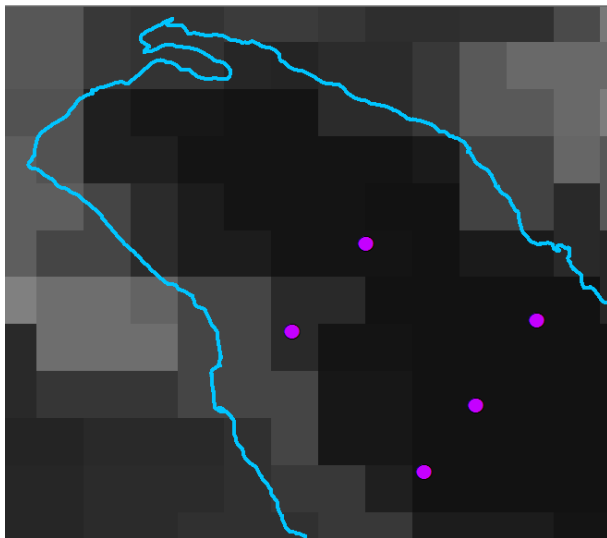


Figura 15 Campagna misure in situ del 28 agosto 2013

Nelle Figura 13 Figura 14 e Figura 15 sono rispettivamente riportati in cerchi rossi, gialli e viola le campagne di misurazione dei solidi totali sospesi, espressi in mg/l.

Non sono stati presi in esame quei punti che insistono su pixel non interamente ricompresi nel confine del bacino.

Risoluzione pixel 500m.

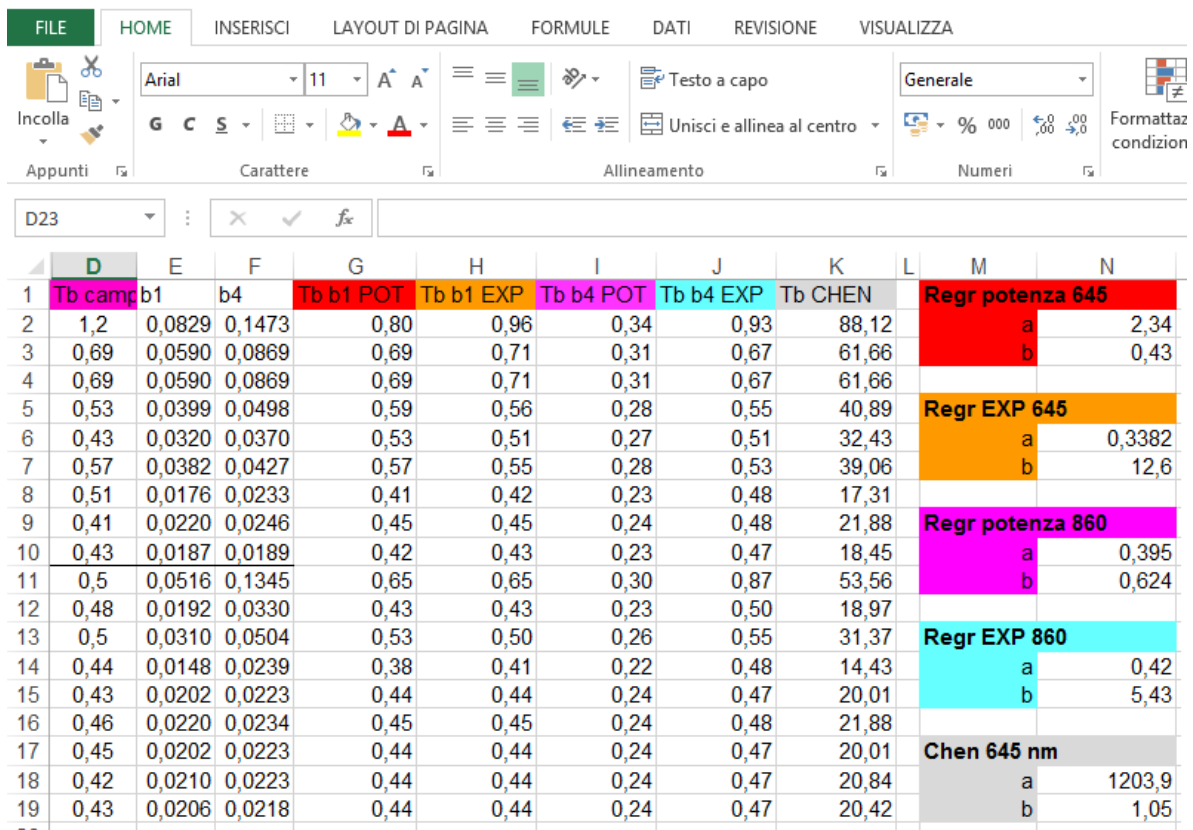
3.3 Studio dei parametri di qualità

3.3.1 Torbidità

3.3.1.1 Taratura algoritmi

3.3.1.1.1 Modis

Per quanto riguarda il parametro di torbidità calibrato con immagini Modis, sono state analizzate le due bande Rosso e Blu e di ciascuna è stata calcolata una curva esponenziale e potenziale oltre al confronto con la formula presa dalla letteratura, Chen et al. Tampa Bay 2001, al fine di stabilire il modello che meglio approssima i valori campionati.



	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Tb camp	b1	b4	Tb b1 POT	Tb b1 EXP	Tb b4 POT	Tb b4 EXP	Tb CHEN		Regr potenza 645	
2	1,2	0,0829	0,1473	0,80	0,96	0,34	0,93	88,12		a	2,34
3	0,69	0,0590	0,0869	0,69	0,71	0,31	0,67	61,66		b	0,43
4	0,69	0,0590	0,0869	0,69	0,71	0,31	0,67	61,66			
5	0,53	0,0399	0,0498	0,59	0,56	0,28	0,55	40,89		Regr EXP 645	
6	0,43	0,0320	0,0370	0,53	0,51	0,27	0,51	32,43		a	0,3382
7	0,57	0,0382	0,0427	0,57	0,55	0,28	0,53	39,06		b	12,6
8	0,51	0,0176	0,0233	0,41	0,42	0,23	0,48	17,31			
9	0,41	0,0220	0,0246	0,45	0,45	0,24	0,48	21,88		Regr potenza 860	
10	0,43	0,0187	0,0189	0,42	0,43	0,23	0,47	18,45		a	0,395
11	0,5	0,0516	0,1345	0,65	0,65	0,30	0,87	53,56		b	0,624
12	0,48	0,0192	0,0330	0,43	0,43	0,23	0,50	18,97			
13	0,5	0,0310	0,0504	0,53	0,50	0,26	0,55	31,37		Regr EXP 860	
14	0,44	0,0148	0,0239	0,38	0,41	0,22	0,48	14,43		a	0,42
15	0,43	0,0202	0,0223	0,44	0,44	0,24	0,47	20,01		b	5,43
16	0,46	0,0220	0,0234	0,45	0,45	0,24	0,48	21,88			
17	0,45	0,0202	0,0223	0,44	0,44	0,24	0,47	20,01		Chen 645 nm	
18	0,42	0,0210	0,0223	0,44	0,44	0,24	0,47	20,84		a	1203,9
19	0,43	0,0206	0,0218	0,44	0,44	0,24	0,47	20,42		b	1,05

Figura 16 Foglio di calcolo taratura torbidità Modis

In Figura 16 il foglio di calcolo riporta i risultati ottenuti applicando la taratura ai minimi quadrati:

Tb camp corrisponde alle misure di torbidità in situ, b1 e b4 sono rispettivamente i valori di radianza rilevati nella banda rossa e blu, Tb b1 POT e Tb b1 EXP rappresentano i valori di torbidità calcolati mediante regressione con curve rispettivamente potenziale ed esponenziale utilizzando i dati di riflettanza della banda b1, allo stesso modo Tb b4 POT e Tb b4 EXP rappresentano i valori di torbidità calcolati mediante regressione con curve rispettivamente potenziale ed esponenziale utilizzando i dati di riflettanza della banda b4. Infine Tb CHEN è quanto ottenuto con i coefficienti di letteratura dall'omonimo studio, utilizzando la banda b1 del Modis.

Le caselle sulle destra che recano la scritta *Regr* sono i coefficienti delle regressioni per il calcolo dei modelli, i quali si ritrovano anche nelle equazioni delle curve presenti nel grafico della calibrazione.

Il grafico di calibrazione è volto a ricavare i coefficienti delle regressioni di diverse curve, al fine di selezionare quelle con coefficiente di correlazione più elevato: sono riportati in ascisse i valori di riflettanza espressi in sr^{-1} ed in ordinate la torbidità misurata in NTU.

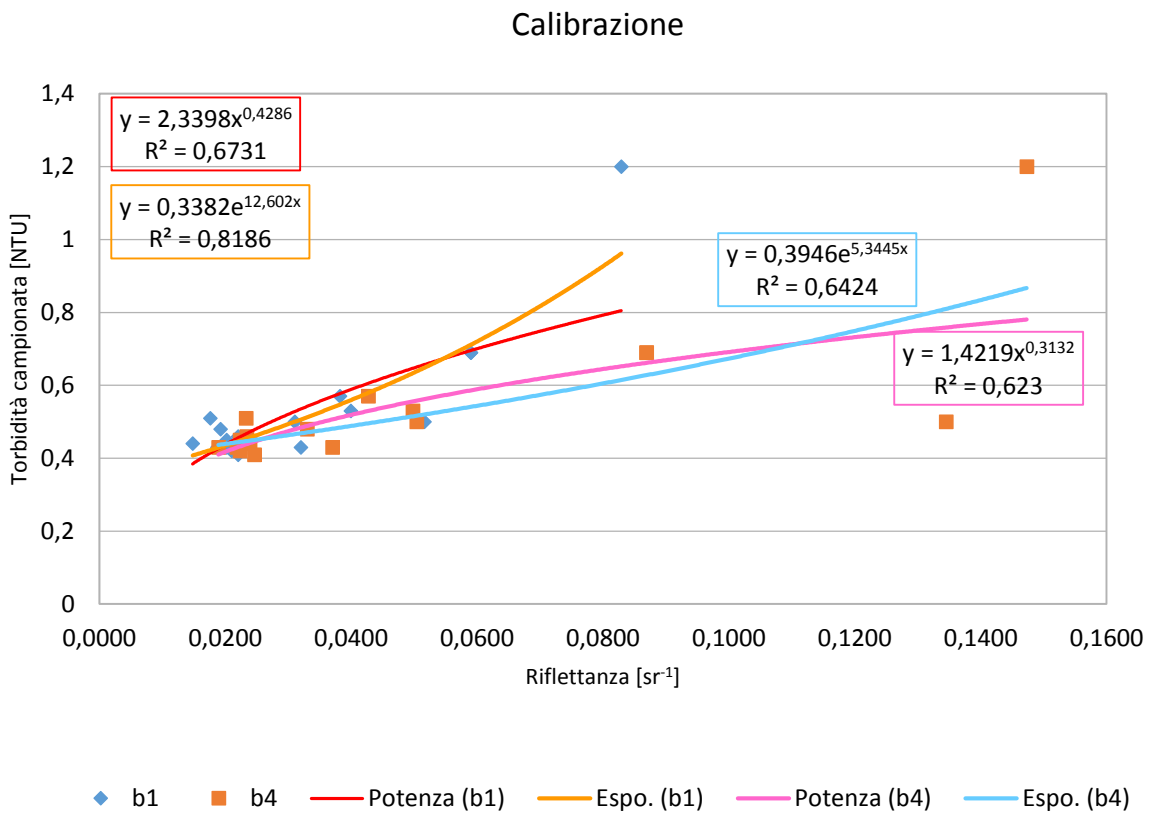


Grafico 1 Calibrazione torbidità Modis

Il grafico di Validazione riporta invece sulle ascisse i valori di torbidità calcolati applicando le curve di regressione ed in ordinate i valori di torbidità misurata. Anche per questo grafico, tanto più R^2 è prossimo ad 1, tanto meglio la curva di regressione approssima i valori misurati.

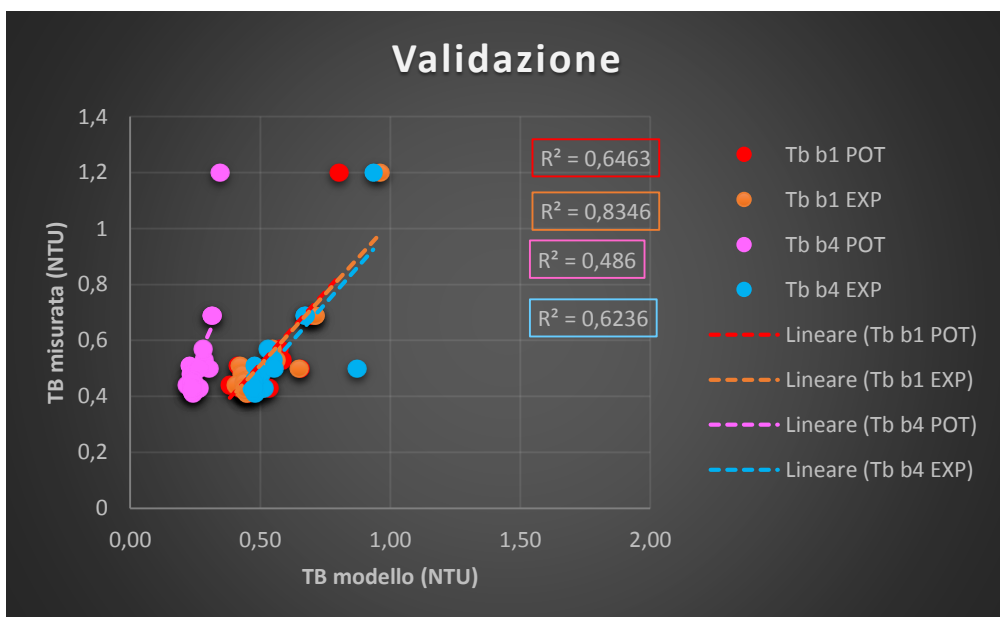


Grafico 2 Validazione torbidità Modis

Infine sono stati calcolati i principali parametri statistici per ogni curva calcolata:

PARAMETRO	Tb b1 POT	Tb b1 EXP	Tb b4 POT	Tb b4 EXP	Tb CHEN
μ errore	0,06	0,06	0,26	0,09	31,23
σ errore	0,09	0,09	0,17	0,12	21,09
RMSD	0,11	0,25	0,30	0,30	37,37

Tabella 3 Parametri statistici torbidità Modis

Dove:

μ errore è la media delle differenza tra i valori della regressione e i valori misurati

σ errore è la deviazione standard delle differenza tra i valori della regressione e i valori misurati

RMSD è lo scarto medio quadratico delle differenza tra i valori della regressione e i valori misurati

In questo caso la curva che meglio approssima i risultati di torbidità è quella esponenziale a partire dai valori di radianza in banda rossa.

Pertanto, l'equazione utilizzata per la mappatura di torbidità con Modis è:

$$\text{Torbidità} = 0.3382 \cdot e^{(12.6 \cdot b1)}$$

3.3.1.1.2 Landsat

Per la taratura della torbidità con Landsat sono state prese in esame le bande Landsat b1, b3 e b4, e confrontate la combinazione riportata in letteratura dal Harna $(b1 - b4) / (b3 - b4)$. Per ciascuna curva è stata calcolata una curva lineare, esponenziale e potenziale, al fine di stabilire il modello che meglio approssima i valori campionati.

	D	G	I	J	K	L	M	N
1	Tb in situ	b1	b3	b4	Harna	TB mod LIN	TB mod POT	TB mod EXP
2					$(b1-b4)/(b3-b4)$			
3	0,48	0,1166	0,0476	0,0363	7,1062	0,78	0,68	0,64
4	1,7	0,1249	0,0546	0,0604	11,1207	1,50	1,37	1,36
5	1,76	0,1204	0,0555	0,0423	5,9167	1,59	1,49	1,50
6	0,5	0,1166	0,0456	0,0393	12,2698	0,57	0,54	0,51
7	0,44	0,1128	0,0476	0,0363	6,7699	0,78	0,68	0,64
8	0,43	0,1124	0,0456	0,0371	8,8588	0,57	0,54	0,51
9	0,46	0,1118	0,0406	0,0333	10,7534	0,06	0,30	0,30
10	0,45	0,1090	0,0436	0,0333	7,3495	0,37	0,43	0,41
11	0,42	0,1128	0,0446	0,0348	7,9592	0,47	0,49	0,46
12	0,43	0,1100	0,0436	0,0318	6,6271	0,37	0,43	0,41
13					Media err	0,18	0,14	0,13
14					SD err	0,13	0,11	0,11
15					RMSD	0,84	0,83	0,82
16								

Figura 17 Foglio di calcolo taratura torbidità Landsat

Il foglio di calcolo in Figura 17 riporta i risultati ottenuti applicando la taratura ai minimi quadrati:

TB mod LIN, TB mod POT e TB mod EXP rappresentano, nell'ordine, la torbidità ottenuta dall'algorithmo di tipo lineare, da quello di tipo potenziale e da quello di tipo esponenziale.

Tb in situ è la misura effettuata nei punti di campionamento e b1, b3 e b4 sono i valori di riflettanza rilevati in corrispondenza dei punti di campionamento dalle immagini satellitari. Infine con Harna è

stato indicato il risultato della combinazione di bande di letteratura, inserita nel confronto.

Nel Grafico 3 vengono mostrate, per ogni banda analizzata, le curve di regressione di tipo lineare, esponenziale e potenziale. Tutte le regressioni hanno mostrato un buon risultato in termini quantitativi, ma la migliore è la banda 3, che riporta un R^2 oscillante nel range $0.78 \div 0.82$, per questo motivo tale banda è stata utilizzata per selezionare il miglior algoritmo di approssimazione tra quello lineare, esponenziale, e potenziale, come mostrato nel Grafico 6 Validazione torbidità Landsat.

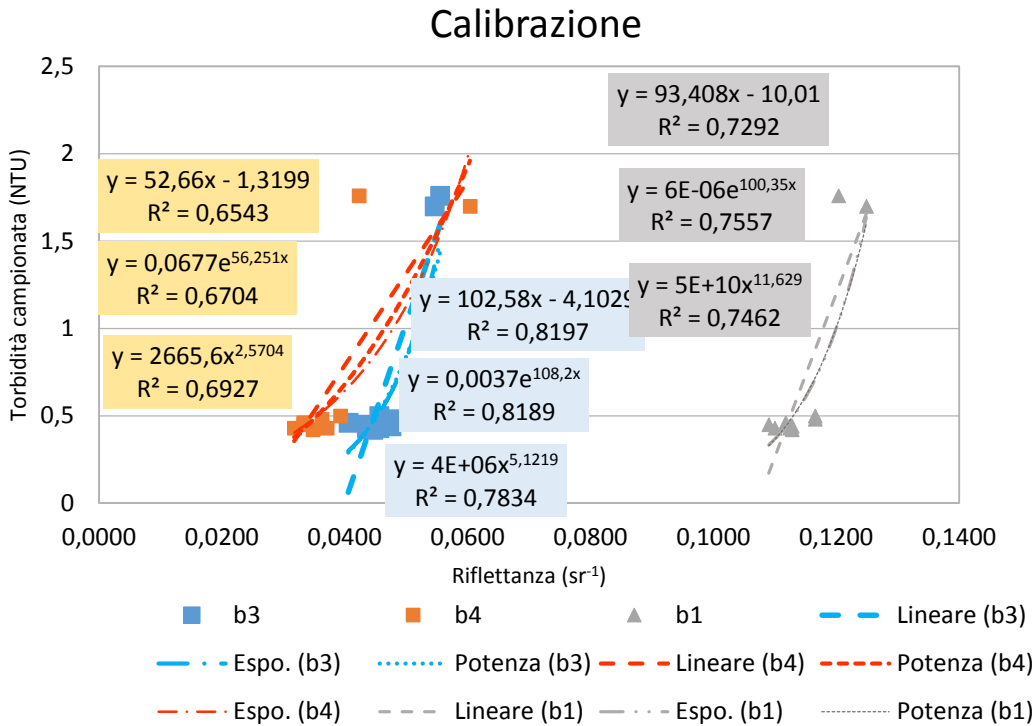


Grafico 4 Calibrazione torbidità Landsat

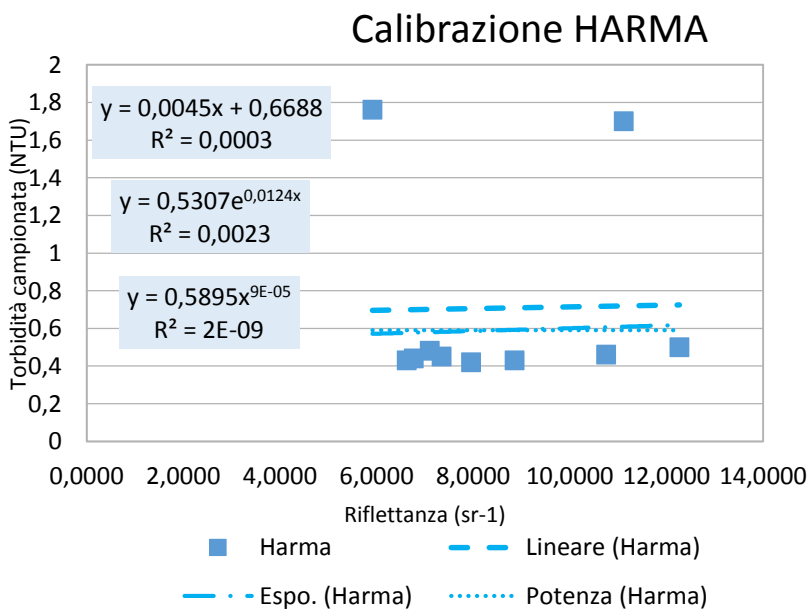
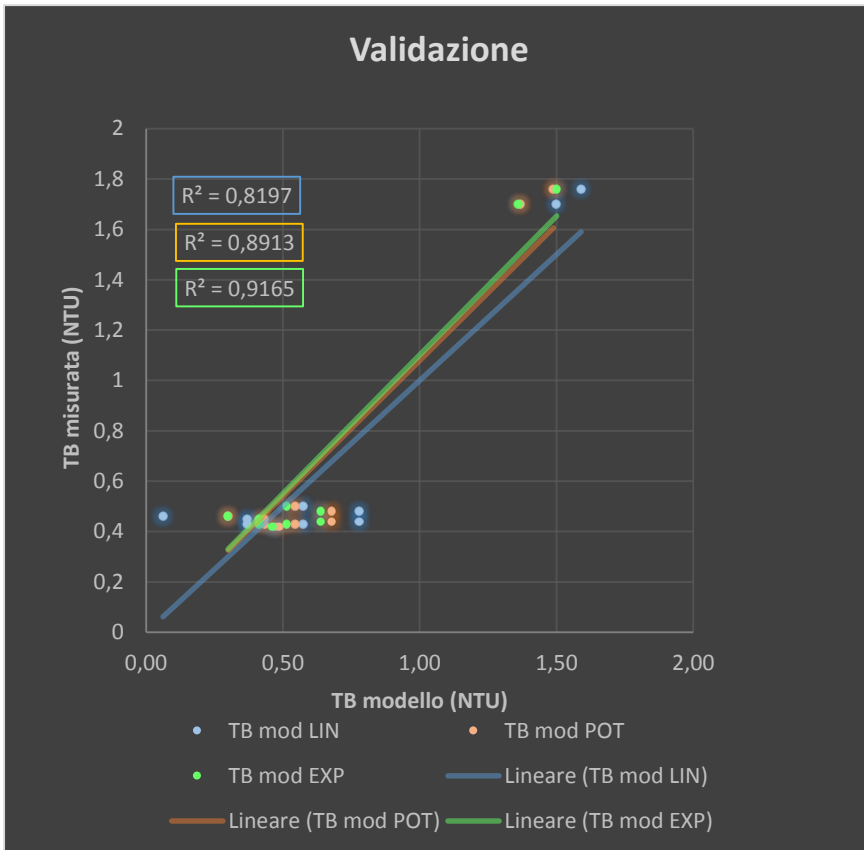


Grafico 5 Calibrazione HARMA torbidità Landsat

Per completezza si riporta inoltre il grafico della calibrazione relativo alla combinazione di bande utilizzata nella letteratura da Harma et al, per mostrare che non è stato possibile stabilire una correlazione tra la torbidità e la combinazione di bande proposta, pertanto non si è ritenuto utile procedere ad una ulteriore analisi di validazione risultati.



In fase di validazione l'algoritmo che fornisce i risultati migliori, come mostrato dal Grafico 6 e dall'analisi statistica a corredo, è quello esponenziale, pertanto nel nostro studio la torbidità con Landsat è stata calcolata come

$$Tb = 0.0037 \cdot e^{108.2 b3}$$

Grafico 6 Validazione torbidità Landsat

PARAMETRO	Tb mod LIN	Tb mod POT	Tb mod EXP
μ errore	0,18	0,14	0,13
σ errore	0,13	0,11	0,11
RMSD	0,84	0,83	0,82

Tabella 4 Parametri statistici torbidità Landsat

3.3.1.1.3 Worldview2

In Figura 18 si riporta il foglio di calcolo utilizzato per la taratura ai minimi quadrati: TB mis e TB mod rappresentano rispettivamente la torbidità misurata in situ e la torbidità calcolata mediante l'algoritmo prescelto. Per la taratura di torbidità con Worldview2 sono state prese in esame tutte le bande da b1 a b8.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	TB mis	SDD mis	blue (477)	verde_b3	yellow (607)	red (658)	red edge	near_ir_b7	TB mod	SD mod
2	0,48	4	1854	2953	1600	881	1300	1031	0,51	3,96
3	0,5	4,5	1825	2969	1536	848	1214	956	0,51	3,92
4	1,76	2	1864	3295	1654	827	1246	859	0,76	3,12
5	0,44	3,5	1795	2891	1504	816	1149	870	0,47	4,14
6	0,43	4	1668	2627	1300	677	913	634	0,34	4,98
7	0,46	4	1678	2611	1310	687	956	687	0,34	5,04
8	1,7	1,5	2080	3824	1955	988	1418	1138	1,44	2,15
9	0,55	6,5	1977	3764	1876	999	1579	1214	0,73	3,19

Figura 18 Foglio di calcolo taratura torbidità Worldview2

Nel Grafico 7 è mostrata per ciascuna banda del satellite solamente la regressione che ha restituito il coefficiente di correlazione più elevato allo scopo di favorire la leggibilità dello stesso. È importante notare che, a differenza di Modis e Landsat, nei grafici di calibrazione sono riportate sulle ascisse i valori di radianza invece che i valori di riflettanza, mentre sulle ordinate si trovano i valori di torbidità. Nel nostro caso la banda che ha mostrato il coefficiente di correlazione più elevato è stata la banda 3 con un valore di 0.68.

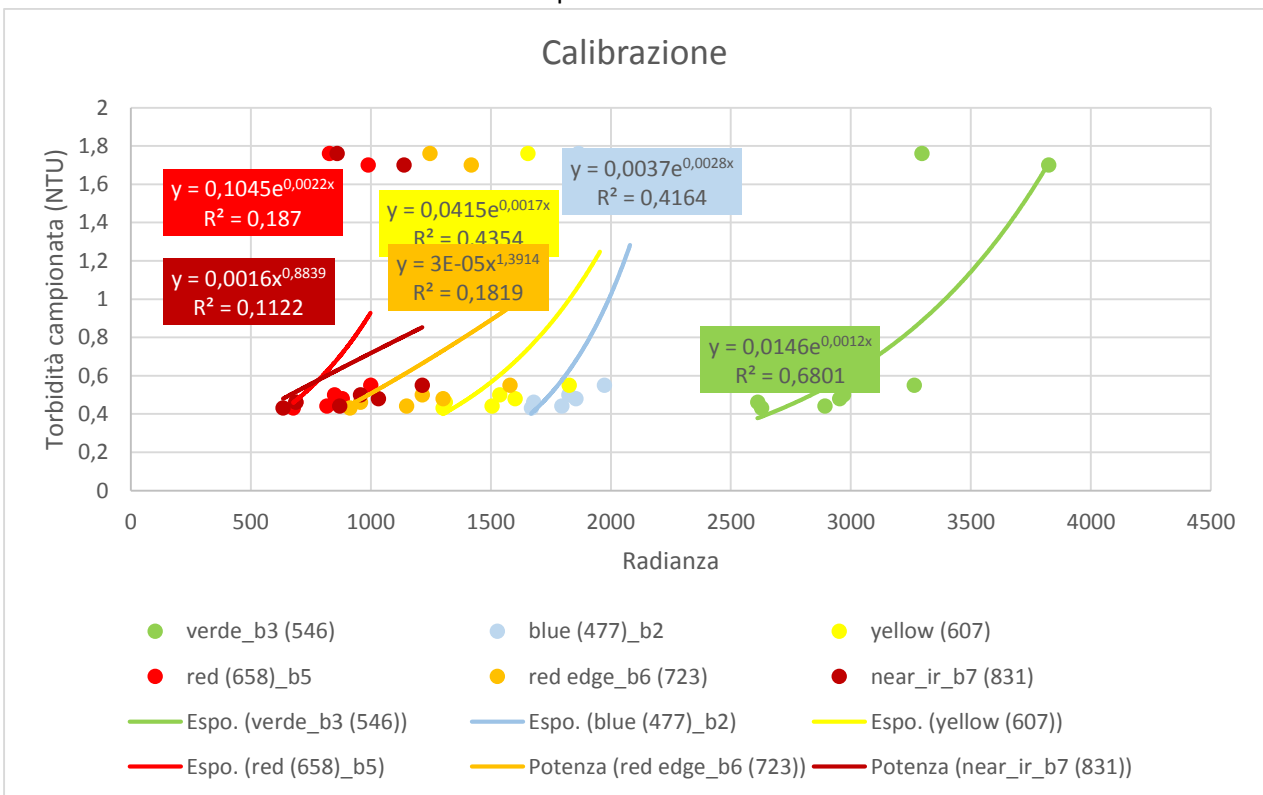
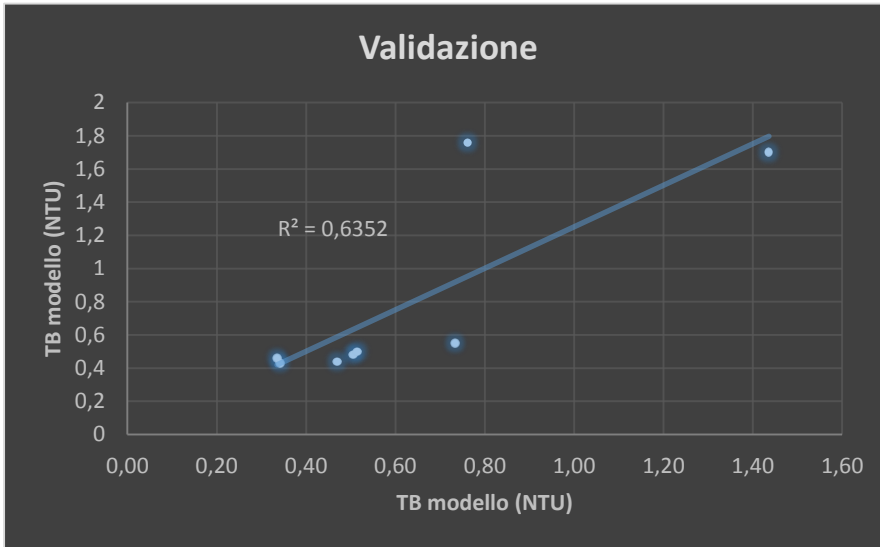


Grafico 7 Calibrazione torbidità Worldview2



Nel Grafico 8 Validazione torbidità sono riportati rispettivamente in ascisse i valori di torbidità calcolati mediante algoritmo ed in ordinate i valori di torbidità campionati in situ. Come mostrato dal coefficiente di correlazione, si è potuto trovare una correlazione soddisfacente sia per Torbidità.

Grafico 8 Validazione torbidità Worldview2

L'equazione utilizzata per worldview2 è:

$$Tb = 0.0146 * e^{0.0012*b3}$$

Si riporta infine l'analisi statistica dei parametri:

Parametro	Torbidità
μ errore	0.22
σ errore	0.33
RMSD	0.80

Tabella 5 Parametri statistici torbidità worldview

3.3.1.2 Risultati spazialmente distribuiti

3.3.1.2.1 Modis

Il satellite Modis, grazie alla sua alta frequenza di passaggi, ha consentito di effettuare delle riprese giornaliere alcuni giorni prima e alcuni giorni dopo le date in cui sono stati operati i campionamenti in situ: di seguito si riportano le serie dei dati telerilevati a luglio 2013 e settembre 2013, due giorni prima e due giorni dopo i campionamenti in situ del 24 luglio e del 23 settembre e la legenda, divisa in classi omogenee, comune a tutte le immagini seguenti. Le unità di misura sono in NTU e la risoluzione spaziale è di 250m.

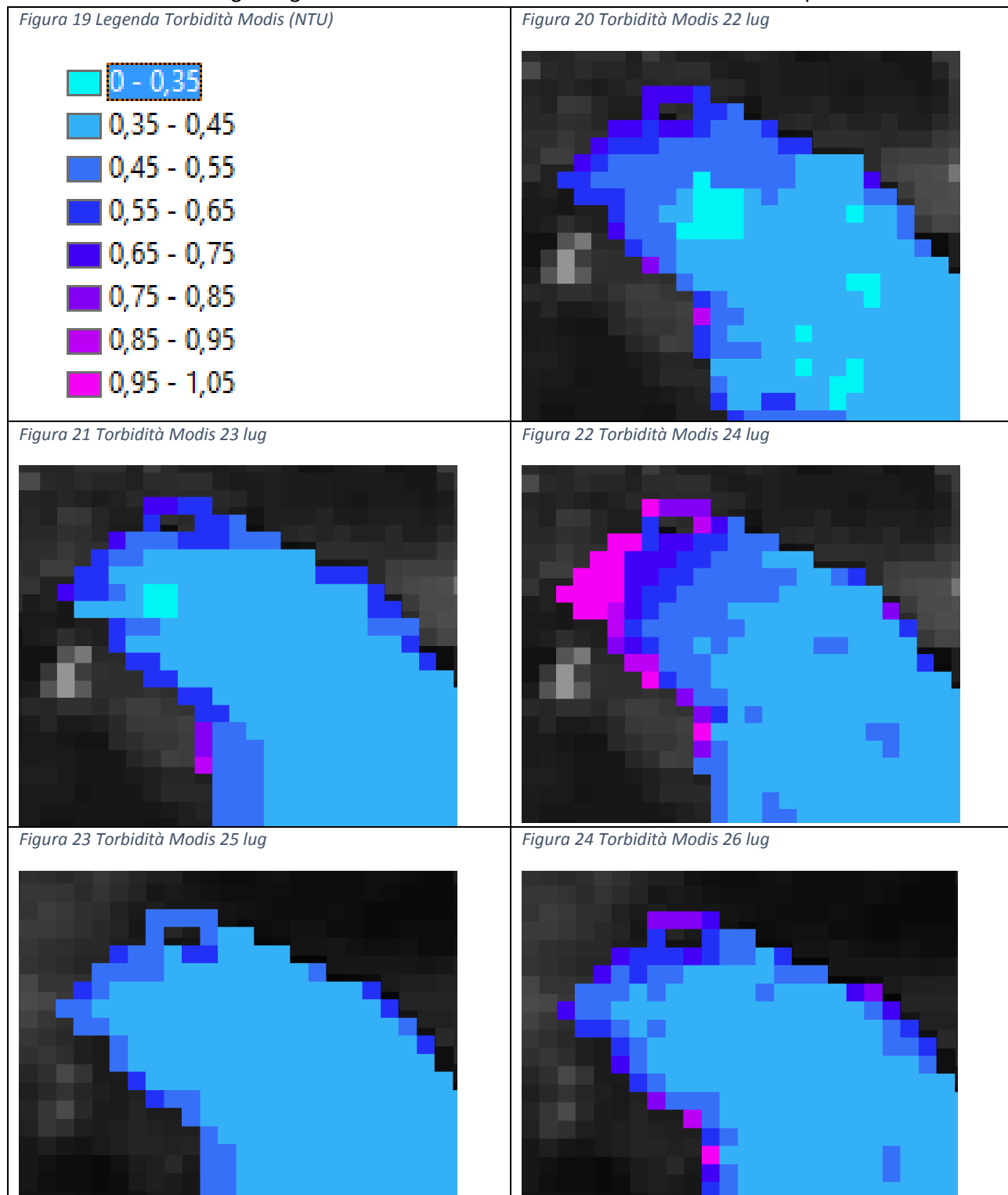


Figura 25 Legenda torbidità Modis (NTU)

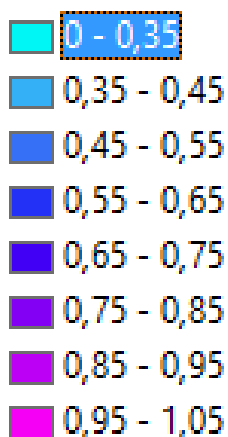


Figura 26 Torbidità Modis 21 set

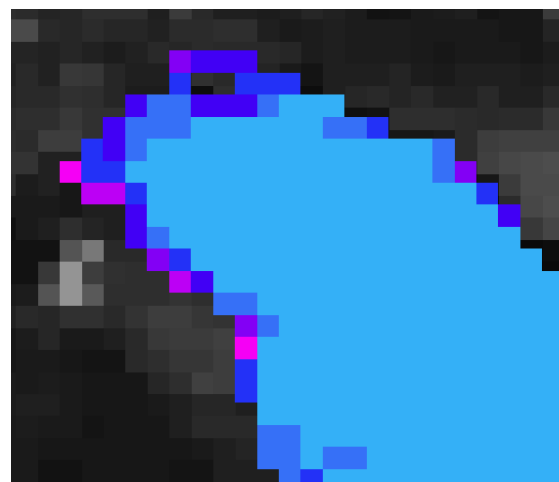


Figura 27 Torbidità Modis 23 set

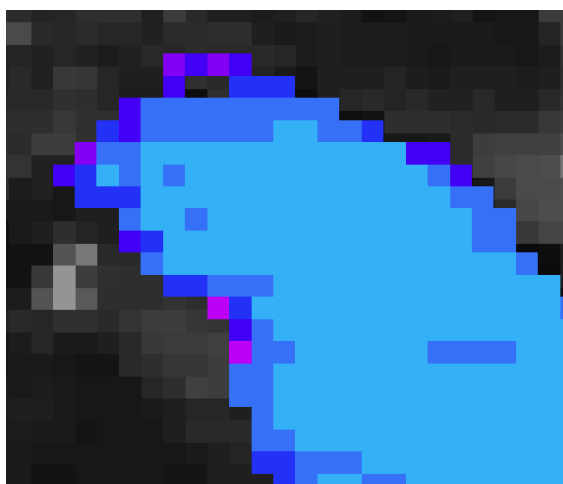
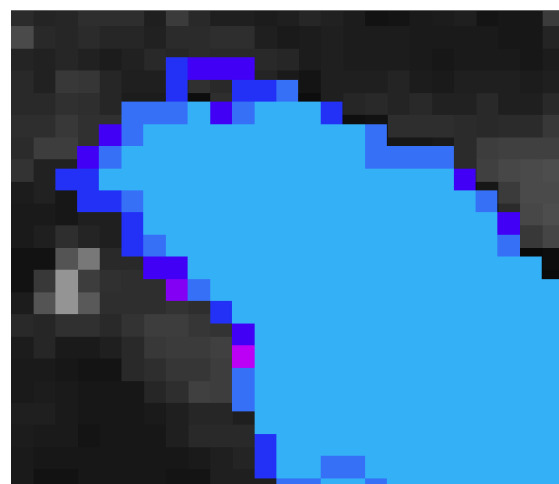


Figura 28 Torbidità Modis 24 set



Dalle serie di immagini di luglio e settembre si possono fare le seguenti osservazioni:

- Esistenza di un gradiente negativo di torbidità dalla zona dell'estuario del fiume Toce verso le acque interne del bacino lacustre, come previsto dato l'effetto di trasporto ad opera del corso d'acqua: marcato nelle zone costiere e non rilevante nelle acque interne
- Differenze di riflettanza tra le immagini di luglio e settembre a causa della diversa stagione in cui le immagini sono state rilevate
- In entrambe le serie di luglio e settembre non si rileva una variabilità rilevante della torbidità non avendo avuto luogo fenomeni meteorologici nei giorni precedenti o seguenti i rilievi in situ

3.3.1.2.2 Landsat

La calibrazione effettuata con il satellite Landsat offre una risoluzione spaziale molto maggiore rispetto al Modis, per contro il tempo di rivoluzione è molto più lungo (16 giorni). Purtroppo in occasione dei campionamenti del 24 luglio 2013, l'immagine Landsat è risultata nuvolosa, pertanto non utilizzabile. Le calibrazioni di Torbidità e trasparenza si basano sull'immagine acquisita in occasione del campionamento di settembre.

Da segnalare che le striature in nero sono pixel ove l'immagine non è stata rilevata per un difetto strutturale del satellite.

Dall'immagine inoltre si può notare come la presenza di torbidità mostri un gradiente negativo man mano che ci si allontana dalla costa, in special modo nell'area dell'estuario del fiume, come previsto dato l'effetto di trasporto fluviale. Data la grandezza del bacino, questi fenomeni si attenuano man mano che ci si inoltra nelle acque interne a causa della diluizione operata dal notevole volume d'acqua presente.

Figura 29 Torbidità Landsat

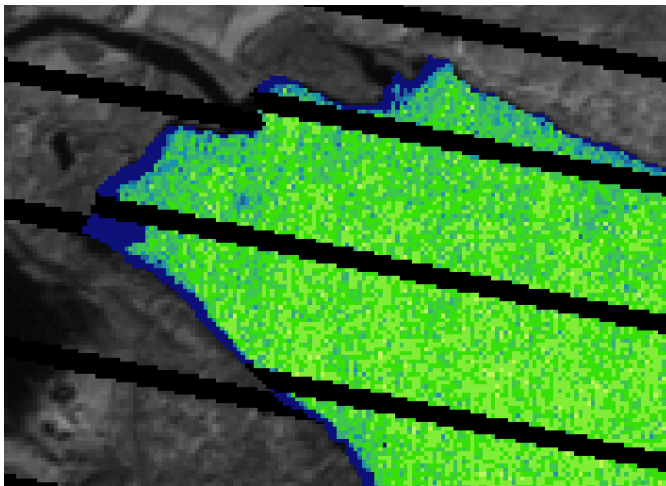
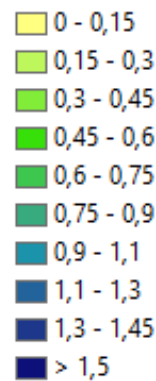


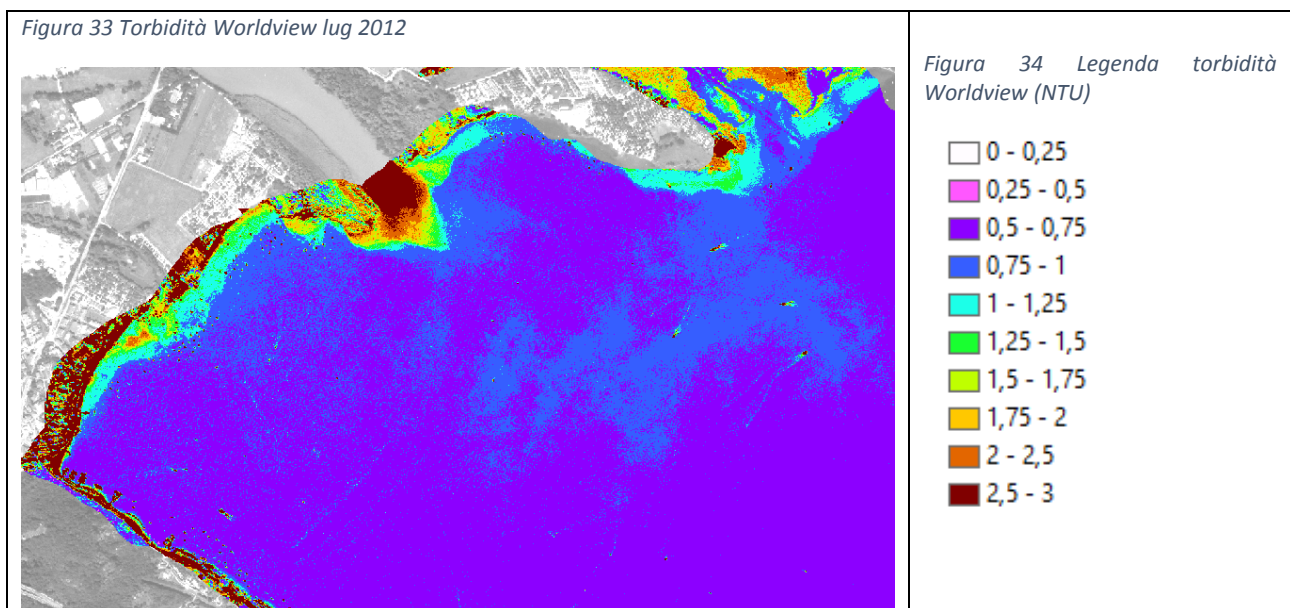
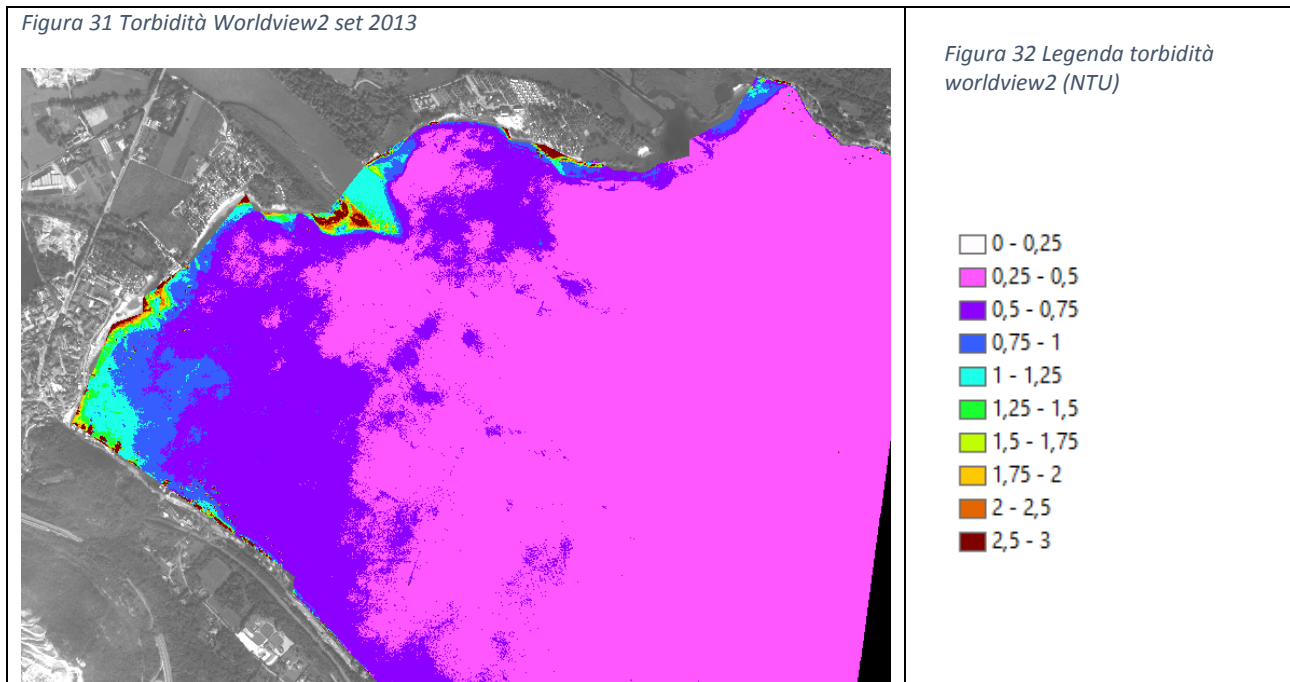
Figura 30 Legenda torbidità Landsat (NTU)



3.3.1.2.3 Worldview

Grazie all'elevatissima risoluzione spaziale di Worldview2 si nota facilmente il *plume* a maggior torbidità alla foce del fiume Toce, dovuto all'immissione da parte di quest'ultimo di acque più torbide entro le acque lacustri.

Per questo motivo nelle immagini seguenti si rileva ancora più nettamente che il gradiente di concentrazione di torbidità, digrada repentinamente dalle aree costiere verso le acque interne del bacino, per i fenomeni di trasporto fluviale di cui sopra.



3.3.2 Trasparenza

3.3.2.1 Taratura algoritmi

3.3.2.1.1 Modis

Per la taratura della trasparenza con immagini Modis, sono state analizzate le due bande b1 e b2 e la loro combinazione b1*b2 di ciascuna è stata calcolata una curva esponenziale e lineare, oltre al confronto con la formula presa dalla letteratura, Wu et al, al fine di stabilire il modello che meglio approssima i valori campionati.

	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	SDD mis	red	blue	r*b	SDD Pot	SDD Lin	SDD wu	Regr Pot	y=a*y^b*y^c
2	4	0,0367	0,0391	0,0014	1,54	2,71	207970373,17	a	0,0509
3	0,5	0,0472	0,0451	0,0021	0,99	1,28	460014267,42	b	-2,7102
4	2	0,0472	0,0451	0,0021	0,99	1,28	460014267,42	c	1,7114
5	3,5	0,0237	0,0330	0,0008	3,77	4,05	9832715,15		
6	4	0,0237	0,0330	0,0008	3,77	4,05	9832715,15	Regr Lin	
7	4	0,0203	0,0263	0,0005	3,89	4,56	116691106,88	a	-2060,1
8	4,5	0,0208	0,0299	0,0006	4,54	4,38	10998779,56	b	5,664
9	4	0,0208	0,0290	0,0006	4,31	4,42	21089362,60		
10	4	0,0185	0,0246	0,0005	4,46	4,73	117661652,62	Regr Wu	
11	0,5	0,0472	0,0451	0,0021	0,99	1,28	460014267,42	a	1,6064
12	4	0,0213	0,0311	0,0007	4,55	4,30	6832261,09	b	15,24
13	4	0,0208	0,0315	0,0007	4,96	4,31	3623481,21	c	-21,30
14	6	0,0216	0,0331	0,0007	4,87	4,19	2241787,71		
15	5	0,0201	0,0293	0,0006	4,81	4,45	10052710,73		

Figura 35 Taratura trasparenza con Modis

In Figura 35 il foglio di calcolo riporta i risultati ottenuti applicando la taratura ai minimi quadrati:

SDD mis corrisponde ai campionamenti *in situ*, red e blue sono rispettivamente i valori di radianza rilevati nella banda rossa e blu, mentre r*b è il loro prodotto.

SDD POT e SDD LIN EXP rappresentano i risultati della regressione applicando la formula potenziale e la formula lineare alla combinazione di bande rosso * blu poiché, come mostrato dall'R2 del grafico Calibrazione, fornisce

un'approssimazione migliore. Infine SDD Wu è quanto ottenuto con i coefficienti di letteratura.

Le caselle sulle destra con *Regr* sono i coefficienti ottenuti dalle regressioni ed usati per il calcolo dei vari modelli.

Il Grafico 9 di calibrazione riporta in ascisse i valori di riflettanza espressi in sr⁻¹ ed in ordinate la trasparenza misurata in metri e permette di ricavare le regressioni lineari e potenziali altrimenti calcolate con procedimento dei minimi quadrati, e per ciascuna curva riporta il valore del coefficiente di determinazione R². La curva col miglior R² è la regressione lineare su operata su banda 1.

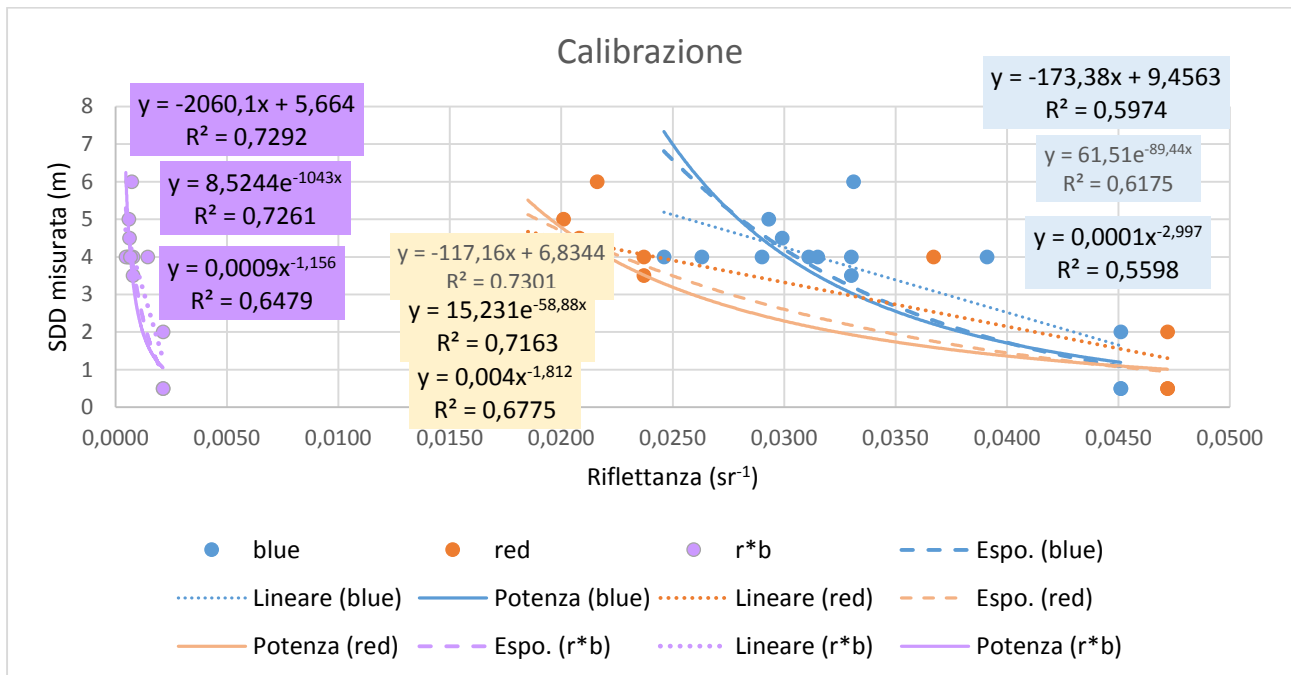


Grafico 9 Calibrazione Trasparenza Modis

Nel Grafico 10 viene mostrato il confronto tra la validazione ottenuta dalla regressione lineare di cui sopra e una taratura ai minimi quadrati con un'equazione potenziale del tipo $y = a \cdot y^b \cdot y^c$

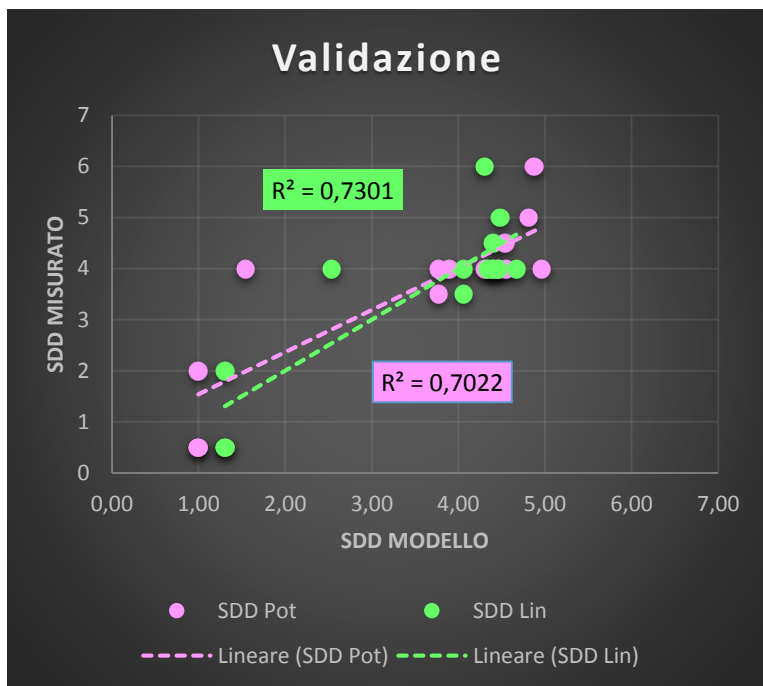


Grafico 10 Validazione trasparenza Modis

L'approssimazione migliore è quella ottenuta dalla regressione lineare, così come confermato dall'analisi statistica, riportata in Tabella 6.

PARAMETRO	SDD Pot	SDD Lin	SDD Wu
μ errore	0,62	0,64	1,35E+08
σ errore	0,63	0,46	1,35E+08
RMSD	0,87	0,78	2,25E+08

Tabella 6 Parametri statistici trasparenza Modis

Pertanto, l'equazione utilizzata per la mappatura di torbidità con Modis è:

$$\text{Trasparenza} = -117.16 \cdot (b1) + 6.8344$$

3.3.2.1.2 Landsat

Per la taratura della trasparenza sono state prese in esame le bande Landsat b1, b2, b3 e b4, e confrontate la combinazione riportata in letteratura da Kabbara e con quella riportata da Harna. Le diverse bande sono state combinate con una curva lineare, esponenziale e potenziale, al fine di stabilire il modello che meglio approssima i valori campionati.

	E	G	H	I	J	K	L	M	N	U
1	SDD in situ	b1	b2	b3	b4	Harna	SD mod LIN	SD mod POT	SD mod EXP	SD kab
2		6,5				(b1-b4)/(b3-b4)				
3		4	0,1166	0,0777	0,0476	0,0363	7,1062	3,46	2,24	3,25
4		1,5	0,1249	0,0907	0,0546	0,0604	11,1207	2,12	1,43	2,00
5		2	0,1204	0,0864	0,0555	0,0423	5,9167	1,95	1,35	1,88
6		4,5	0,1166	0,0756	0,0456	0,0393	12,2699	3,85	2,58	3,74
7		3,5	0,1128	0,0756	0,0476	0,0363	6,7699	3,46	2,24	3,25
8		4	0,1124	0,0712	0,0456	0,0371	8,8588	3,85	2,58	3,74
9		4	0,1118	0,0691	0,0406	0,0333	10,7534	4,80	3,78	5,29
10		4,5	0,1090	0,0712	0,0436	0,0333	7,3495	4,23	2,99	4,29
11		4	0,1128	0,0734	0,0446	0,0348	7,9592	4,04	2,78	4,01
12		4	0,1100	0,0712	0,0436	0,0318	6,6271	4,23	2,99	4,29
13						Media err	2,89	1,93	2,87	
14						SD err	1,42	0,95	1,52	
15						RMSD	1,90	1,58	1,89	

Figura 36 Taratura trasparenza con Landsat

Per lo studio della trasparenza si sono stati studiati sia il modello di Harna che di Kabbara, oltre all'esecuzione della taratura ai minimi quadrati per le altre bande.

SDD in situ rappresenta la serie di campionamenti eseguiti, b1, b2 b3 e b4 sono le riflettanze nelle varie bande, mentre SD mod LIN, SD mod POT, SD mod EXP e SD kab sono rispettivamente il risultato del calcolo dei modelli calibrati

per la trasparenza con modello lineare, potenziale, esponenziale nella banda b3 ed infine la trasparenza calcolata secondo il modello Kabbara, con coefficienti tarati ad hoc.

In Grafico 11 si riporta la calibrazione tra trasparenza in situ e riflettanza

Anche in questo caso più bande sono idonee alla ricerca dell'algoritmo, e la più indicata è la banda 3, utilizzata per il calcolo dei modelli validati.

Come per la torbidità con Landsat, la combinazione di bande di Harna non si è rivelata essere correlata con i dati di misure in situ.

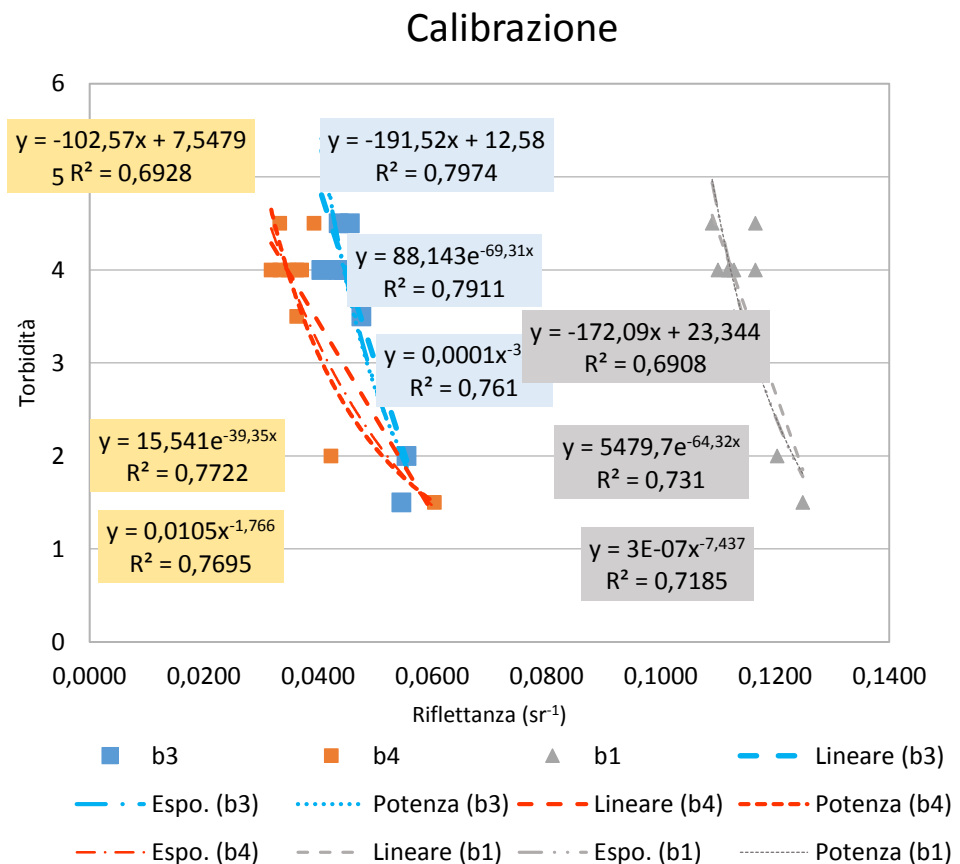
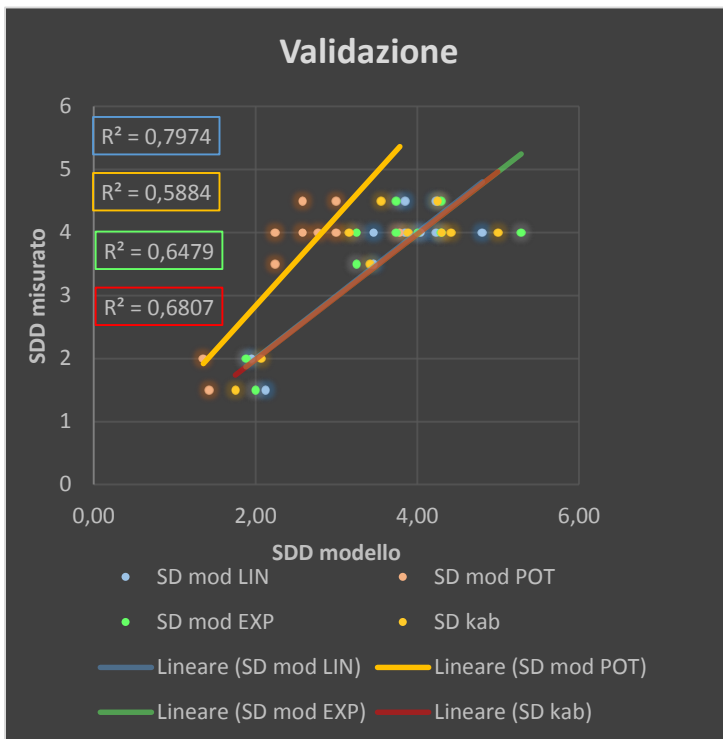


Grafico 11 Calibrazione trasparenza Landsat



Effettuando la validazione in Grafico 12 si nota che l’algoritmo che fornisce i risultati migliori, è quello lineare con R^2 di 0.79, pertanto nel nostro studio la trasparenza con Landsat è stata calcolata come:

$$SDD = -191.52 \cdot b3 + 12.58$$

Grafico 12 Validazione trasparenza Landsat

Parametro	SD mod LIN	SD mod POT	SD mod EXP	SD kabbara
μ errore	2.89	1.93	2.87	0.43
σ errore	1.42	0.95	1.52	0.36
RMSD	1.90	1.58	1.89	1.89

Tabella 7 Parametri statistici trasparenza Landsat

In Tabella 7 si riportano le statistiche che confermano i risultati ottenuti con la validazione.

3.3.2.1.3 Worldview

In Figura 37 si riporta il foglio di calcolo utilizzato per la taratura ai minimi quadrati: SD mis e SD mod rappresentano rispettivamente la trasparenza misurata in situ e la trasparenza calcolata mediante l’algoritmo prescelto. Per la taratura di trasparenza con Worldview2 sono state prese in esame tutte le bande da b1 a b8.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	TB mis	SDD mis	blue (477)	verde_b3	yellow (607)	red (658)	red edge_b6	near_ir_b7	TB mod	SD mod
2	0,48	4	1854	2953	1600	881	1300	1031	0,51	3,96
3	0,5	4,5	1825	2969	1536	848	1214	956	0,51	3,92
4	1,76	2	1864	3295	1654	827	1246	859	0,76	3,12
5	0,44	3,5	1795	2891	1504	816	1149	870	0,47	4,14
6	0,43	4	1668	2627	1300	677	913	634	0,34	4,98
7	0,46	4	1678	2611	1310	687	956	687	0,34	5,04
8	1,7	1,5	2080	3824	1955	988	1418	1138	1,44	2,15
9	0,55	6,5	1972	3264	1826	999	1579	1214	0,73	3,19

Figura 37 Foglio di calcolo taratura trasparenza con worldview2

Nel Grafico 13 Calibrazione trasparenza Worldview2 è mostrata per ciascuna banda del satellite solamente la regressione che ha restituito il coefficiente di correlazione più elevato allo scopo di favorire la leggibilità dello stesso. È importante notare che, a differenza di Modis e Landsat, nei grafici di calibrazione sono riportate sulle ascisse i valori di radianza invece che i valori di riflettanza, mentre sulle ordinate si trovano i valori di trasparenza. Nel nostro caso la banda che ha mostrato il coefficiente di correlazione più elevato è stata la banda 3 con un valore di 0.38.

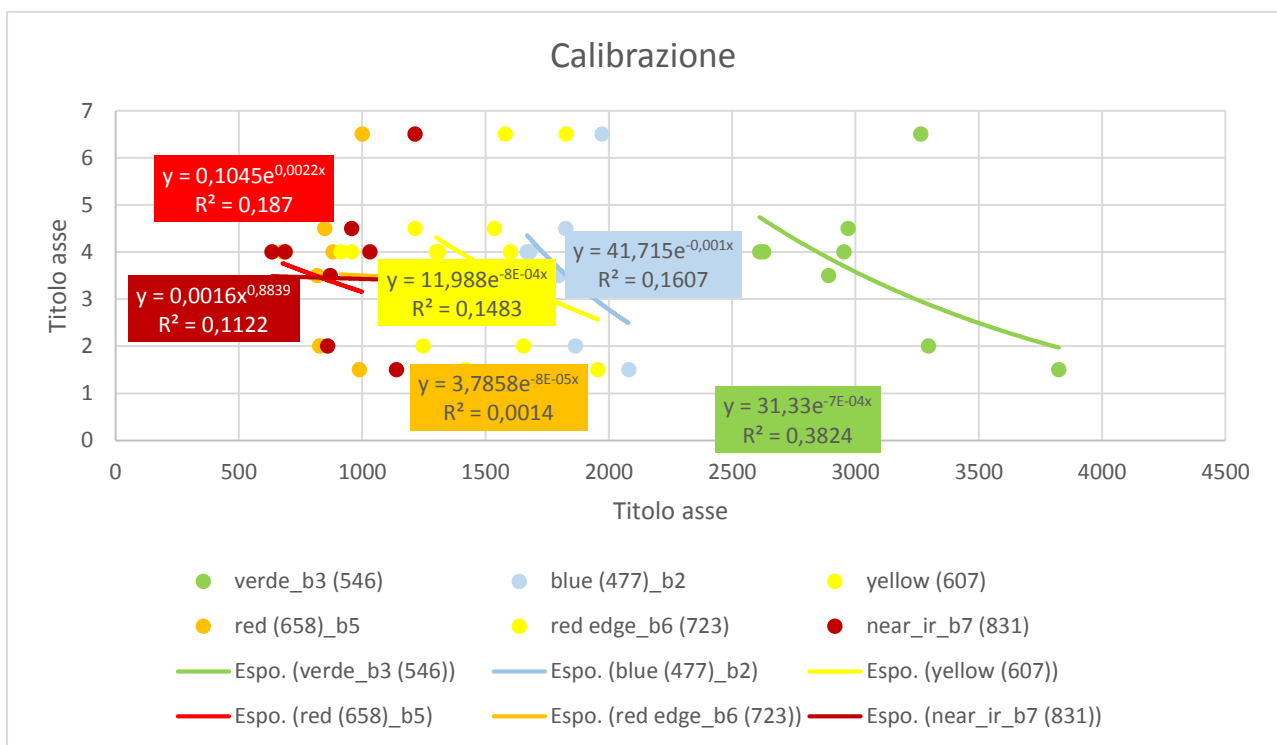


Grafico 13 Calibrazione trasparenza Worldview2

È importante notare come, nonostante il debole coefficiente di correlazione ottenuto in fase di calibrazione, si sia ottenuto in fase di validazione un coefficiente di correlazione di quasi il doppio in valore assoluto. Infatti nel Grafico 14 sono riportati rispettivamente in ascisse i valori di trasparenza calcolati mediante algoritmo ed in ordinate i valori di trasparenza campionati in situ. Come mostrato dal coefficiente di correlazione, si è potuto trovare una correlazione soddisfacente in modulo pari a 0.69.

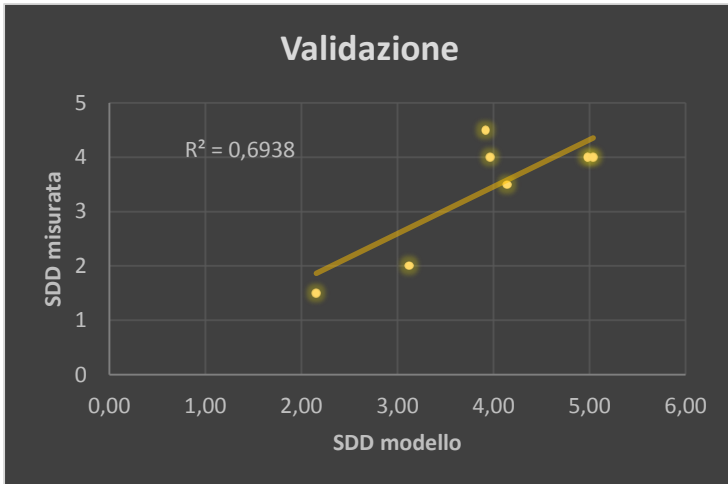


Grafico 14 Validazione trasparenza Worldview2

L'equazione utilizzata per worldview2 è:

$$SDD = 31.33 * e^{-7E-04*b3}$$

Si riporta infine l'analisi statistica dei parametri:

Parametro	Trasparenza
μ errore	1.05
σ errore	0.98
RMSD	1.95

Tabella 8 Parametri statistici trasparenza worldview

3.3.2.2 Risultati spazialmente distribuiti

3.3.2.2.1 Modis

Di seguito si riportano le serie dei dati telerilevati a luglio 2013 e settembre 2013, due giorni prima e due giorni dopo i campionamenti in situ del 24 luglio e del 23 settembre e la legenda, divisa in classi omogenee, comune a tutte le immagini seguenti. Le unità di misura sono quelle proprie della trasparenza espressa con metodo Disco di Secchi, in metri, la risoluzione spaziale è 250 metri.

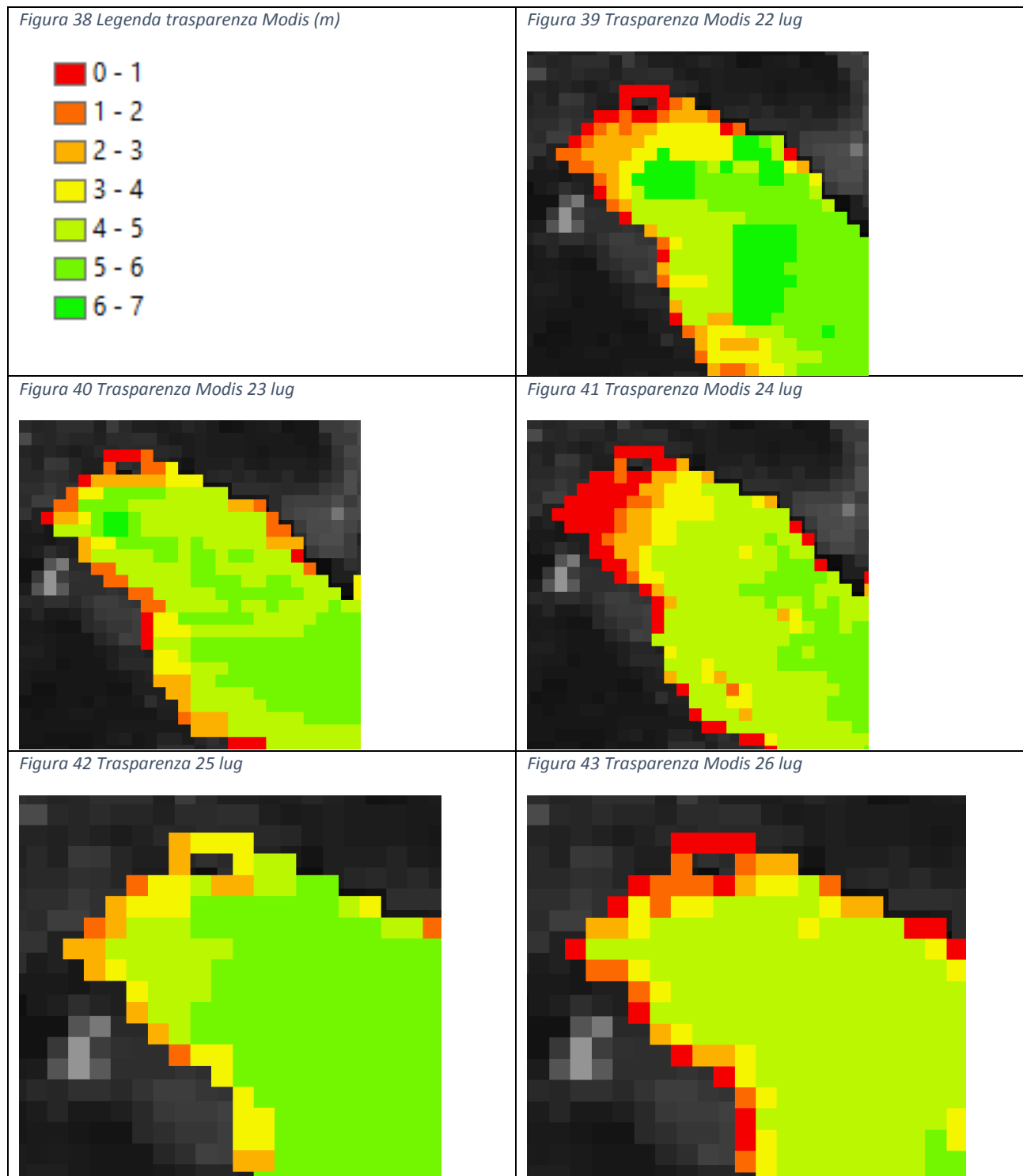


Figura 44 Legenda trasparenza Modis (m)

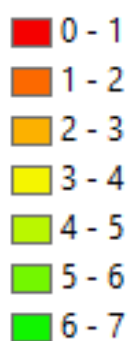


Figura 45 Trasparenza Modis 21 set

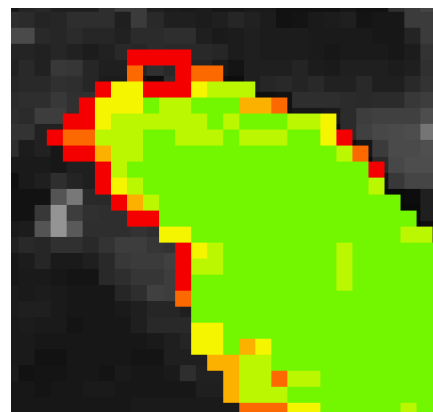


Figura 46 Trasparenza Modis 23 set

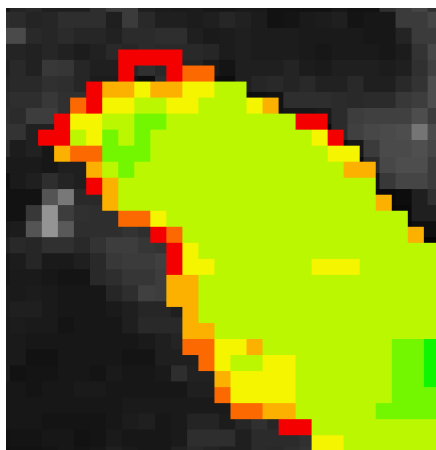
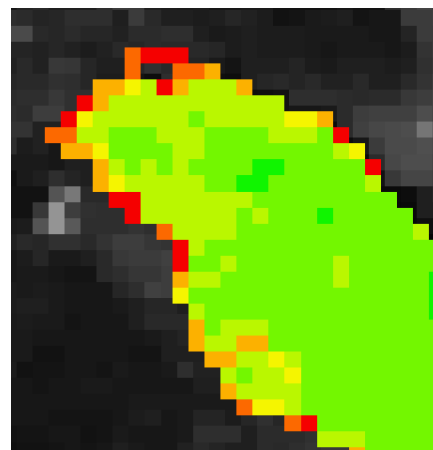


Figura 47 Trasparenza Modis 24 set



Dalle serie di immagini di luglio e settembre si possono fare le seguenti osservazioni:

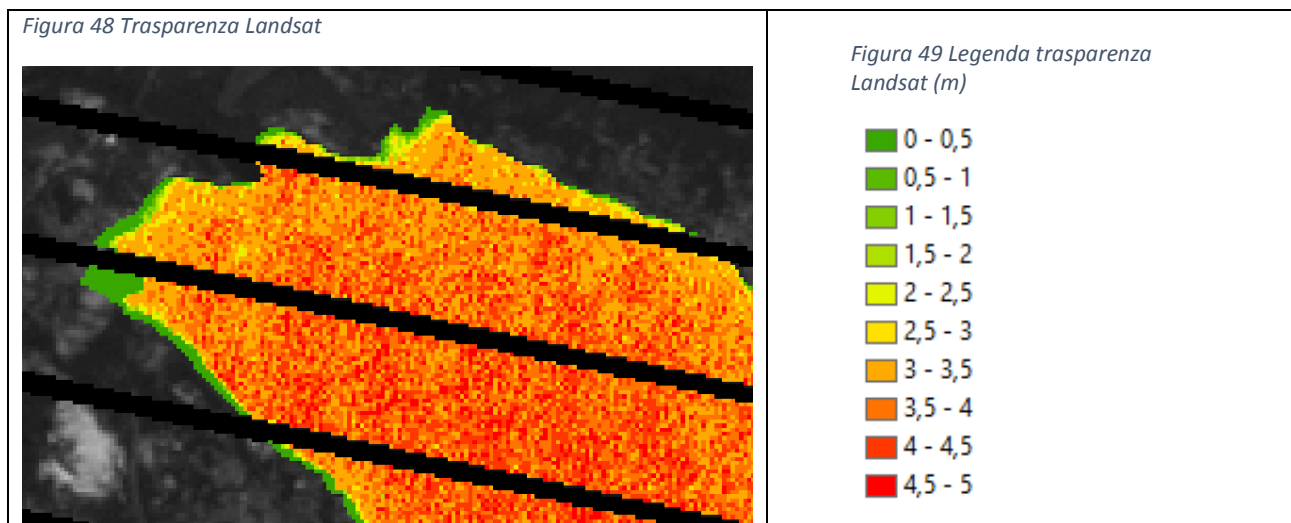
- Esistenza di un gradiente positivo di trasparenza dalla zona dell'estuario del fiume Toce verso la acque interne del bacino lacustre, come previsto dato l'effetto di trasporto ad opera del corso d'acqua: marcato nelle zone costiere e non rilevante nelle acque interne. Tale risultato è infatti inversamente proporzionale alla torbidità mappata nel paragrafo 3.3.1.2.1
- Differenze di riflettanza tra le immagini di luglio e settembre a causa della diversa stagione in cui le immagini sono state rilevate
- In entrambe le serie di luglio e settembre non si rileva una variabilità rilevante della trasparenza non avendo avuto luogo fenomeni meteorologici nei giorni precedenti o seguenti i rilievi in situ

3.3.2.2.2 Landsat

Anche per la trasparenza le striature in nero indicano mancanza di dati satellitari.

Come anche per il sensore Modis, dalla Figura 48 si può notare come la presenza di trasparenza mostri un gradiente positivo man mano che ci si allontana dalla costa, in special modo nell'area dell'estuario del fiume, come previsto dato l'effetto di trasporto fluviale. Data la grandezza del bacino, questi fenomeni si accentuano man mano che ci si inoltra nelle acque interne a causa della diluizione operata dal notevole volume d'acqua presente.

Essendo la trasparenza inversamente proporzionale alla torbidità, è corretto evidenziare come tali osservazioni abbiano dato un riscontro anche nella mappatura delle immagini.



3.3.2.2.3 Worldview

Anche per la trasparenza si confermano i risultati ottenuti nello studio della torbidità pertanto si nota facilmente il *plume* a maggior torbidità alla foce del fiume Toce, dovuto all'immissione da parte di quest'ultimo di acque più torbide entro le acque lacustri.

Come per la torbidità, anche nelle immagini seguenti si rileva che il gradiente di concentrazione di trasparenza, aumenta repentinamente dalle aree costiere verso le acque interne del bacino, per i fenomeni di trasporto fluviale che immettono materia nel bacino.

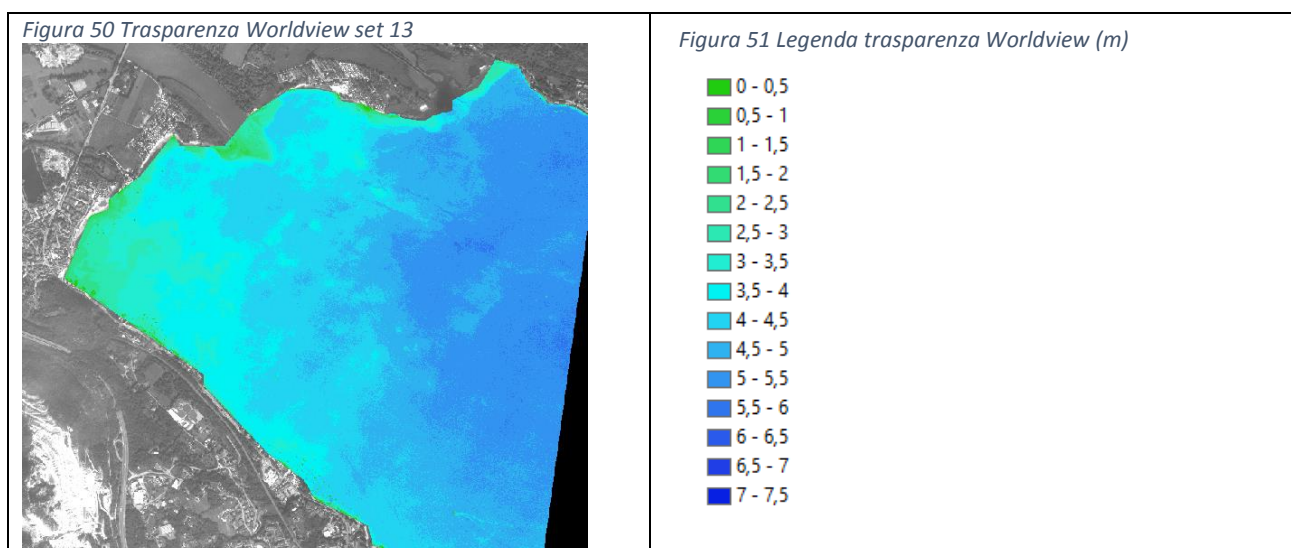


Figura 52 Trasparenza Worldview lug 2012

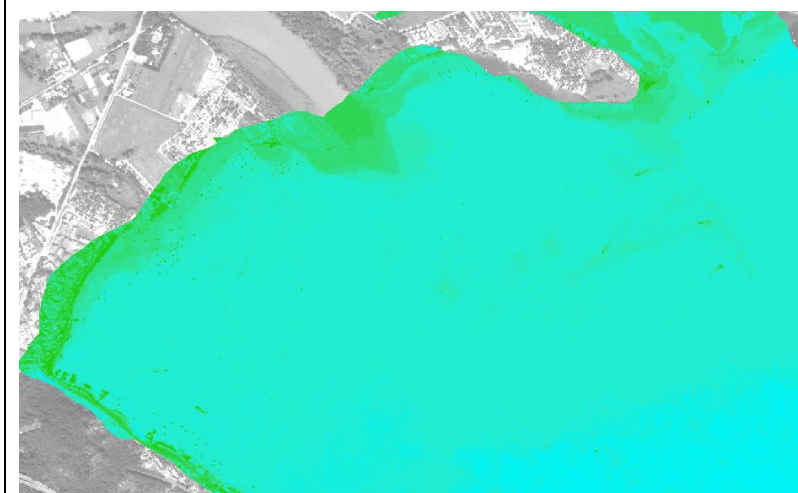
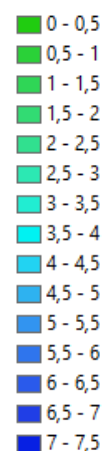


Figura 53 Legenda trasparenza worldview (m)



3.3.3 Solidi sospesi

3.3.3.1 Taratura

3.3.3.1.1 Modis

Per la taratura dei solidi sospesi con immagini Modis, sono state analizzate le due bande b3 e b4 e la loro combinazione b3/b4 di ciascuna è stata calcolata una curva esponenziale e lineare, al fine di stabilire il modello che meglio approssima i valori campionati.

	D	E	F	G	H	I
1	TSS camp	Dark b1	Dark b3	dark b4	b3/b4	TSS mod
2	1	0,0162	0,0201	0,0269	0,7472	1,13
3	1	0,0143	0,0186	0,0225	0,8267	1,63
4	1	0,0154	0,0186	0,0229	0,8122	1,53
5	3	0,0179	0,0255	0,0277	0,9206	2,39
6	2	0,0155	0,0253	0,0263	0,9620	2,80
7	2	0,0135	0,0254	0,0239	1,0628	3,99
8	3	0,0117	0,0143	0,0174	0,8218	1,59
9	1	0,0106	0,0142	0,0164	0,8659	1,92
10	0	0,0194	0,0195	0,0316	0,6171	0,57
11	3	0,0208	0,0224	0,0326	0,6871	0,84
12	1	0,0165	0,0182	0,0296	0,6149	0,57
13	0,5	0,0174	0,0201	0,0299	0,6722	0,78
14	1	0,0166	0,0179	0,0286	0,6259	0,60
15	3	0,0325	0,0296	0,0446	0,6637	0,74
16	2,5	0,0161	0,0312	0,0320	0,9750	2,93
17	2,5	0,0170	0,0317	0,0326	0,9724	2,90
18	1,5	0,0228	0,0348	0,0397	0,8766	2,01
19	3,5	0,0182	0,0185	0,0220	0,8409	1,73
20	4,5	0,0179	0,0179	0,0221	0,8100	1,51
21	2,5	0,0195	0,0195	0,0234	0,8333	1,67
22	4,5	0,0181	0,0164	0,0211	0,7773	1,31
23	2,5	0,0192	0,0192	0,0218	0,8807	2,04
24	1,5	0,0194	0,0193	0,0258	0,7481	1,14

Figura 54 Foglio di calcolo taratura TSS modis

In Figura 54 TSS camp rappresenta la misura dei solidi sospesi totali misurati in situ, dark b1, dark b3 3 dark b4 sono rispettivamente le riflettanze nelle bande b1, b3 e b4, b3/b4 il rapporto tra queste ultime due e TDD mod è il valore dei solidi sospesi totali ricavato dall'applicazione dell'algoritmo.

Il riporta in ascisse i valori di radianza espressi in sr^{-1} ed in ordinate la trasparenza misurata e permette di ricavare le regressioni lineari e potenziali altrimenti calcolate con procedimento dei minimi quadrati, e per ciascuna curva riporta il valore del coefficiente di determinazione R^2 .

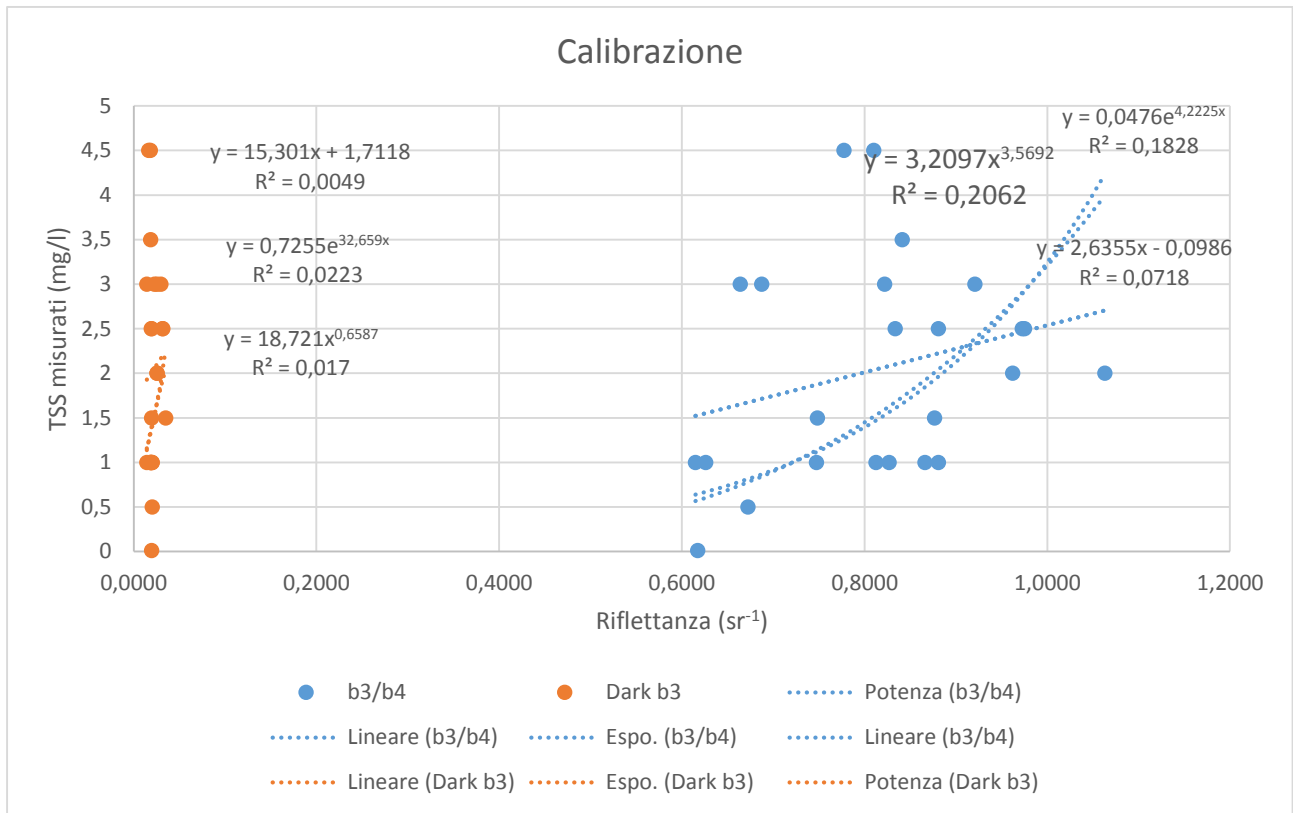
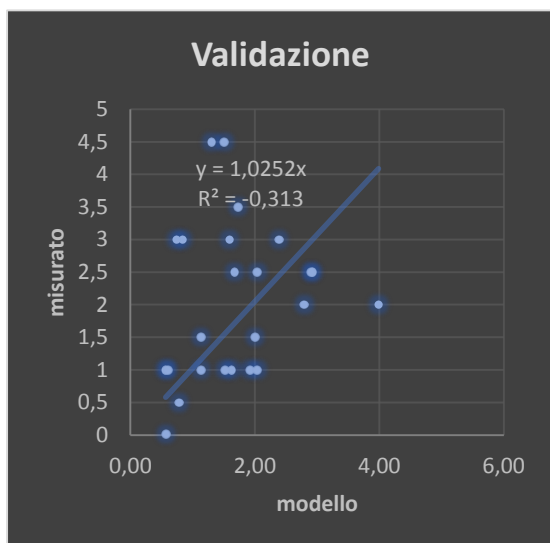


Grafico 15 Calibrazione Solidi sospesi totali Modis

Dalla calibrazione si evince che con alcuna banda né combinazione è stato possibile ricavare un algoritmo soddisfacente per ricavare i solidi sospesi.

A titolo di completezza si riporta il grafico di validazione calcolato a partire dalla combinazione b3/b4.



Data la non soddisfacente correlazione tra solidi sospesi misurati e algoritmo, non si è ritenuto di procedere alla mappatura degli stessi con satellite Modis.

Grafico 16 Validazione Solidi sospesi totali

3.3.3.1.2 Landsat

Nonostante il numero esiguo di misure disponibili è stato possibile ottenere un'ottima correlazione tra le misure al suolo e l' algoritmo ricavato dai dati telerilevati di riflettanza.

Anche in questo caso sono state prese in esame le bande Landsat b2 e b3, e confrontate con la combinazione di bande riportata in letteratura Harma. Per ciascuna banda è stata fatta una taratura ai minimi quadrati al fine di ottenere una curva lineare, una esponenziale ed una potenziale.

TSS in situ sono le misure al suolo, calibr harma rappresenta la combinazione di bande (b1-b4) / (b3-b4) del modello Harma di cui si è parlato nei paragrafi precedenti, mentre TSS mod harma, TSS mod EXP e TSS mod POT sono rispettivamente i modelli ricavati dall'applicazione dell'algoritmo con combinazione di bande harma, algoritmo esponenziale con banda b3 e algoritmo potenziale con banda b3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	TSS in situ	b1	b2	b3	b4	calibr harma	TSS mod Harma	TSS mod EXP	TSS mod POT	
2		3	0,1132	0,0669	0,0419	0,0214	4,4780	1,98	1,88	2,0
3		2	0,1239	0,0760	0,0503	0,0299	4,6078	1,88	2,52	2,6
4		2	0,1347	0,0821	0,0531	0,0341	5,2947	1,43	2,78	2,8
5		1	0,0763	0,0470	0,0251	0,0155	6,3333	0,95	1,05	1,0
6		1	0,0850	0,0509	0,0251	0,0155	7,2396	0,66	1,05	1,0
7		5	0,1023	0,0920	0,0648	0,0362	2,3112	4,70	4,18	3,7

Figura 55 Foglio di calcolo taratura TSS Landsat

Di seguito si riportano le calibrazioni eseguite sia per il modello harma che per il confronto banda b3 e b2 su due grafici separati, al fine di migliorarne la leggibilità. I risultati migliori in termini di calibratura sono stati ottenuti mediante combinazione di bande modello harma.

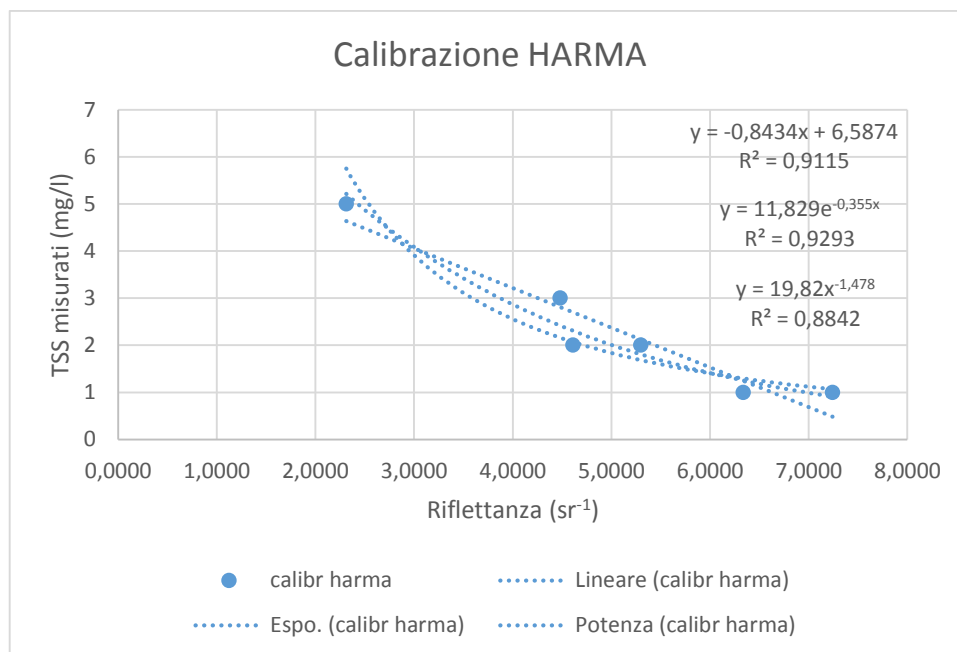


Grafico 17 Calibrazione TSS HARMA Landsat

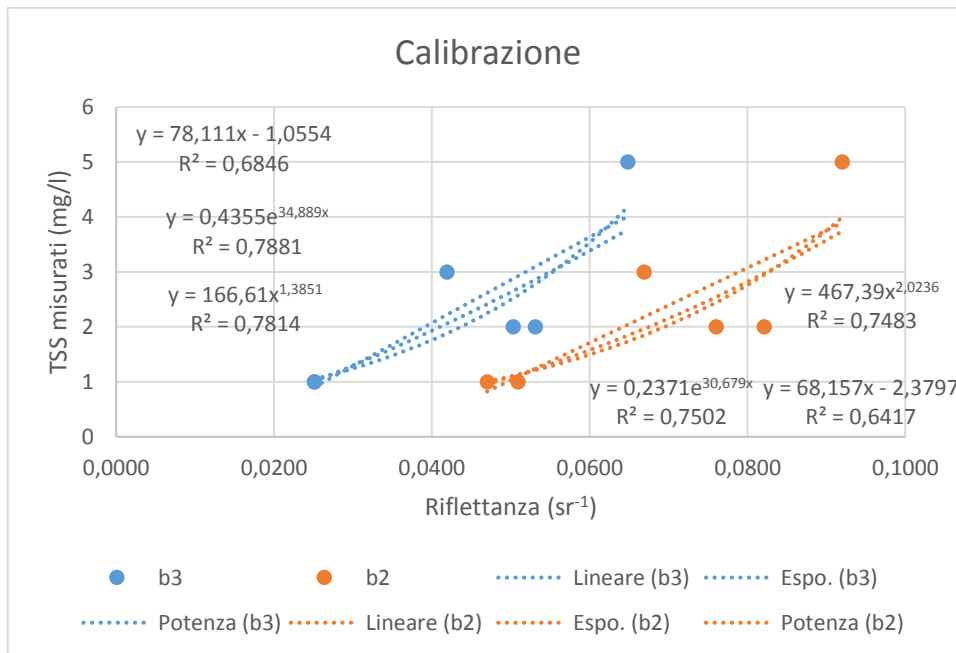


Grafico 18 Calibrazione TSS Landsat

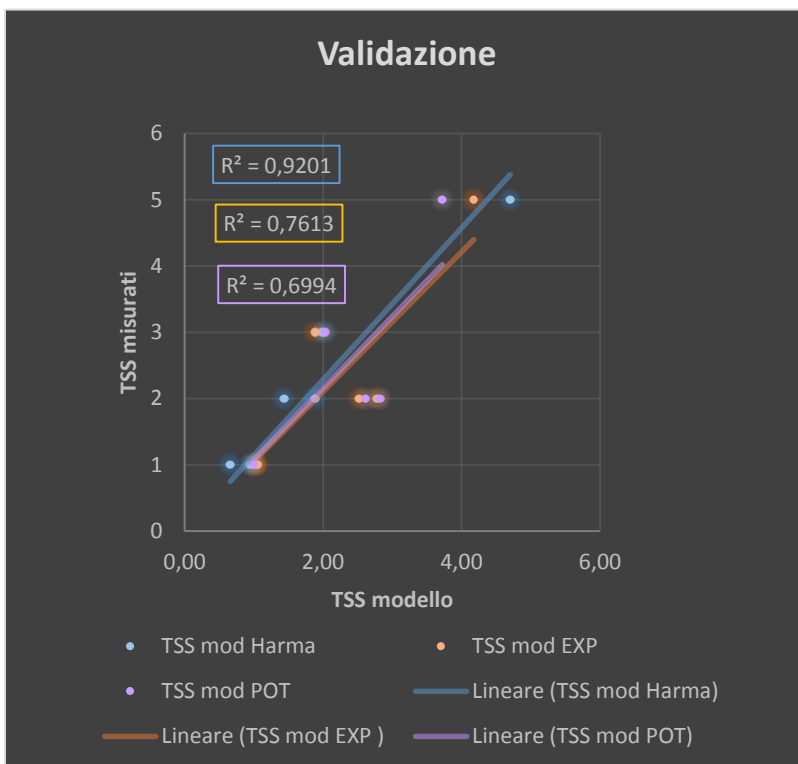


Grafico 19 Validazione TSS Landsat

I risultati ottenuti mostrano una forte correlazione di 0.92 dell'algoritmo calibrato mediante combinazione di bande modello Harma e TSS campionati.

L'equazione utilizzata per i TSS è dunque:

$$TSS = 11.829 * e^{-0.399*harma}$$

L'analisi statistica degli errori fornisce ulteriore riscontro della bontà dell'algoritmo impiegato.

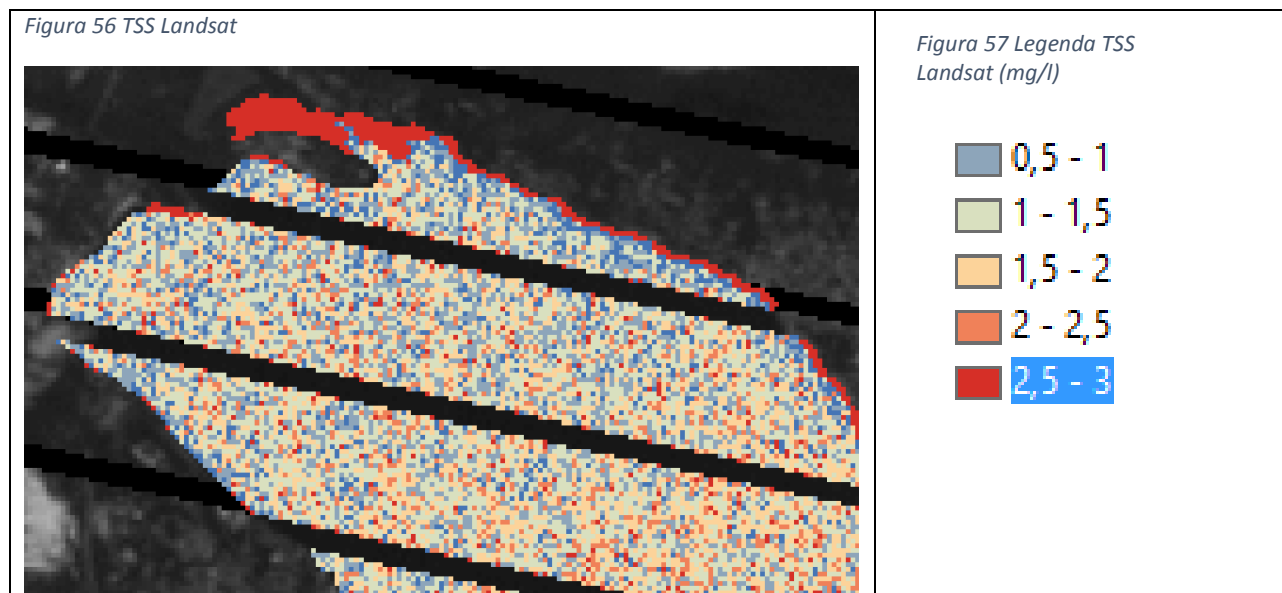
Parametro	TSS harma	SD mod EXP	SD mod POT
μ errore	0.40	0.56	0.60
σ errore	0.35	0.44	0.50
RMSD	1.39	1.50	1.48

Tabella 9 Parametri statistici TSS Landsat

3.3.3.2 Risultati spazialmente distribuiti

Anche per i solidi sospesi le striature rappresentate in nero indicano mancanza di dati satellitari. Da notare inoltre che le aree con solidi sospesi superiori a 2,5 mg/l qui rappresentate in rosso, sono in realtà delle aree in secca, pertanto il valore di riflettanze ne risulta alterato.

Dall'immagine inoltre si può notare che l'area in esame non denota una particolare presenza di solidi sospesi, anche in quelle zone dove sarebbe più lecito aspettarsi, ad esempio alla foce del fiume Toce.



3.3.4 Temperatura

3.3.4.1 Risultati spazialmente distribuiti

3.3.4.1.1 Modis

Le immagini termiche del sensore Modis non risultano adatte al monitoraggio di bacini interni seppur grandi come nel caso in esame, in quanto presentano una risoluzione spaziale grossolana, 1km, che non permette un'analisi di dettaglio quale sarebbe richiesta nello studio dei fenomeni termici.

Per questi motivi tale analisi non è stata svolta.

A titolo di esempio si riporta in Figura 58 l'immagine termica relativa al giorno 24 luglio 2013.



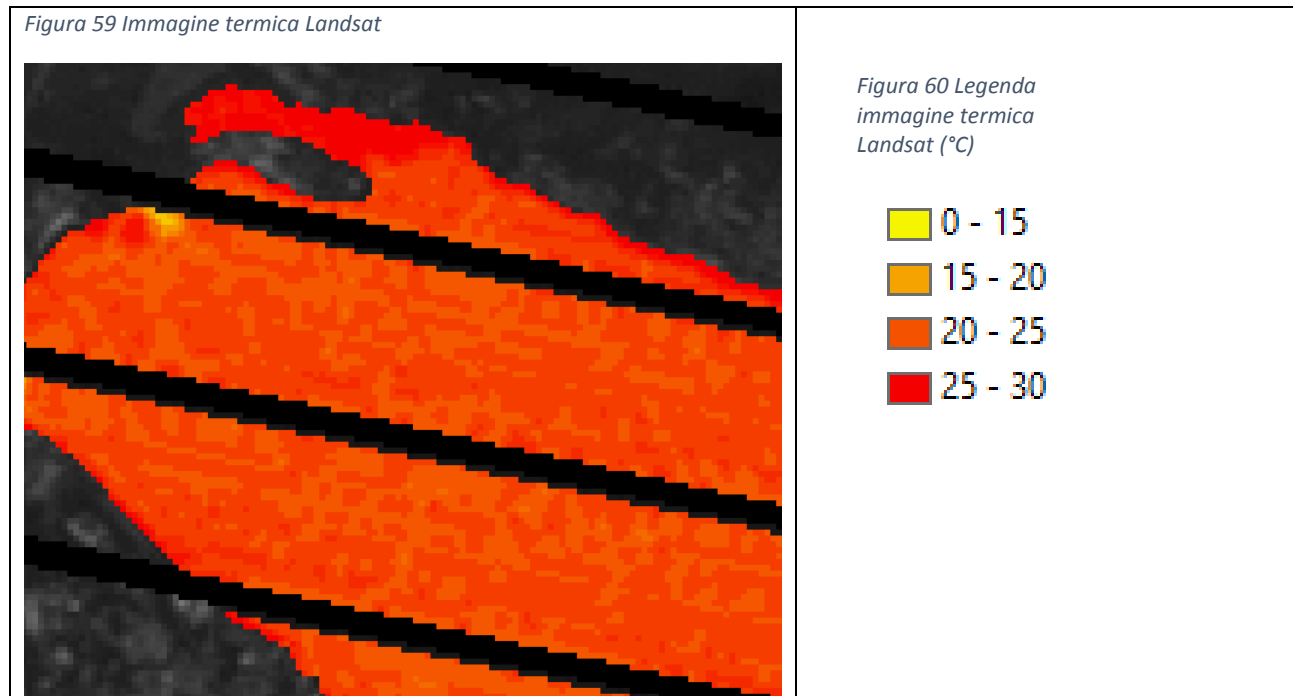
Figura 58 Immagine termica Modis 24 luglio 2013

3.3.4.1.2 Landsat

Si riporta infine in Figura 59 un'immagine termica rilevata da satellite, per la quale non è stato necessario alcun pre-processing, se non la conversione da K a °C, con risoluzione spaziale di 30m.

Le strisce nere sono i segmenti di dato mancante.

Dalla figura si nota bene che nella zona dell'estuario del Fiume Toce le acque sono notevolmente più fredde rispetto a quelle lacustri, ciò è dovuto al fatto che il lago ha accumulato energia termica durante la stagione estiva ed impiega molto più tempo a dissipare tale energia, rispetto alle acque correnti.



3.4 Confronto multi-scala e multi-satellite dei risultati

In questo paragrafo è affrontata la tematica del confronto tra i risultati ottenuti, per ogni parametro, dagli algoritmi presentati nell'elaborato, allo scopo di verificarne la consistenza analitica.

Il paragone è stato eseguito per i parametri di torbidità e di trasparenza, in quanto sono gli unici che compaiono in tutte le analisi eseguite.

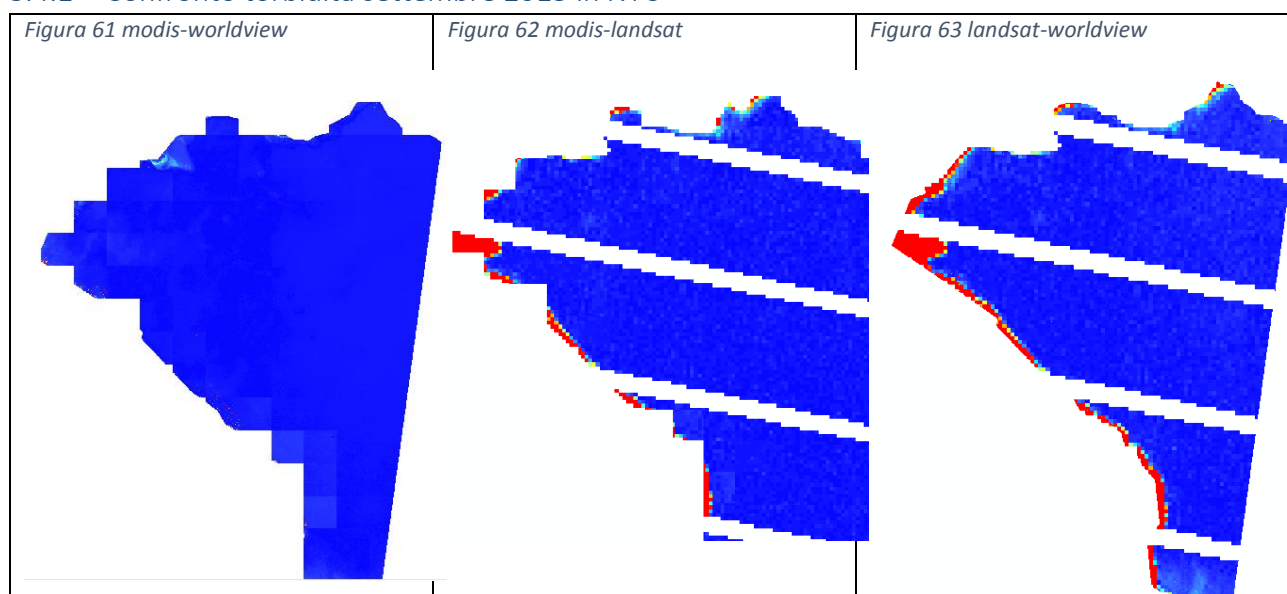
Nei paragrafi seguenti sono presentati i confronti per il periodo di settembre 2013:

- Modis/worldview
- Modis/landsat
- Landsat/worldview

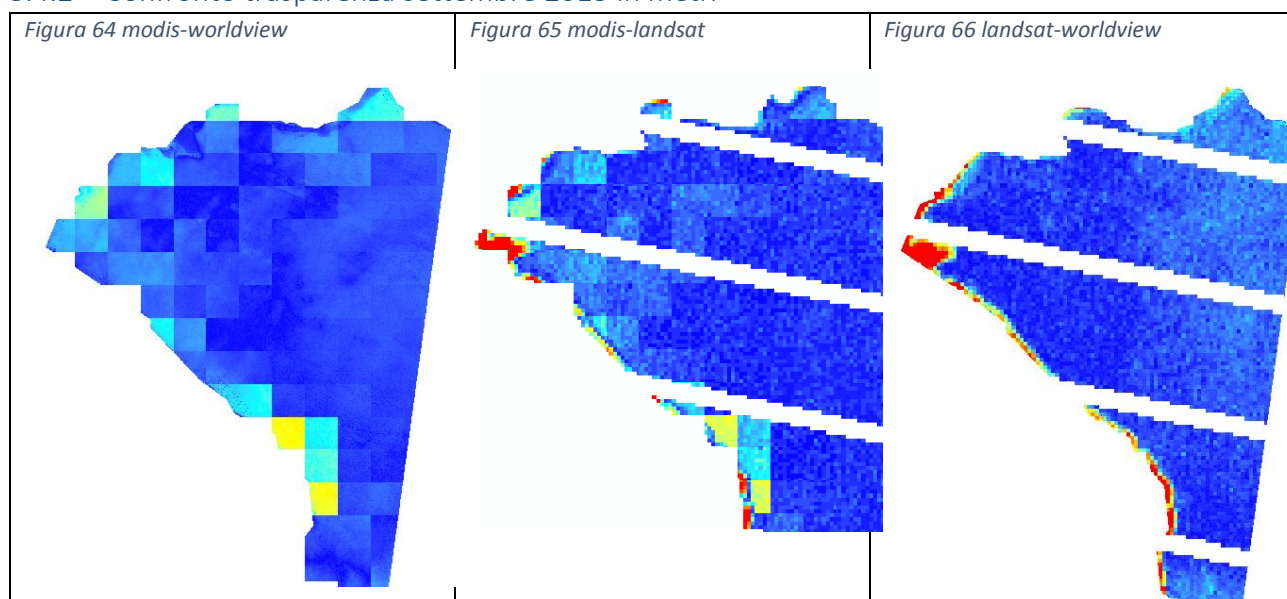
La formula utilizzata per il calcolo dell'errore è, per esempio:

$$\text{errore} = |\text{tb-modis} - \text{tb-worldview}|$$

3.4.1 Confronto torbidità settembre 2013 in NTU



3.4.2 Confronto trasparenza settembre 2013 in metri



Tutti i confronti sono stati rappresentati utilizzando la seguente scala:

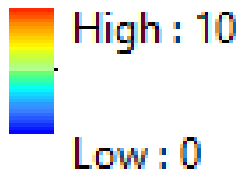


Figura 67 Scala confronto errori

Come evidenziato dalle restituzioni grafiche delle sovrastanti figure, si può vedere che l'errore commesso tra i vari algoritmi di computazione è risultato essere accettabile ai fini di una mappatura completa come proposto nelle premesse di questo elaborato.

È altresì chiaro che le aree sottocosta presentano dei margini di errore maggiore, ciò è dovuto al fatto che, a causa della non alta risoluzione delle immagini da Modis, risultano dei valori di riflettanza più o meno elevati poiché viene fatta una media di cella tra la parte di suolo e la parte lacustre.

Per questo motivo si può concludere che anche l'analisi dell'errore ha mostrato la robustezza degli algoritmi.

4 Conclusioni

Questo lavoro mostra la possibilità di utilizzo del sensore Modis e del sensore Landsat per il monitoraggio in continuo delle acque del lago Maggiore, risultato importante considerato il fatto che le risorse di immagini satellitari sono disponibili liberamente e largamente fruibili.

I principali svantaggi riscontrati sono stati: il sensore Modis presenta dei problemi di risoluzione spaziale nelle aree sottocosta poiché in quelle aree esegue una media spaziale tra la parte di bacino e la parte suolo non fornendo in quei tratti risultati affidabili; il satellite Landsat pur avendo una buona risoluzione spaziale ha un tempo di rivoluzione molto lungo che lo esclude dall'applicazione per il monitoraggio di fenomeni giornalieri; infine il satellite Worldview, pur essendo dotato di un'eccellente risoluzione spaziale è alquanto oneroso e lavora solo su commissione.

Sono stati tarati algoritmi per la stima di torbidità, trasparenza e solidi sospesi tramite calibrazione con i valori di radianza/riflettanza e campionamenti in situ.

Tali algoritmi hanno mostrato:

- Coefficiente di correlazione soddisfacente (eccetto Modis TSS)
- Robustezza nel confronto tra le mappature

Per questi motivi, si può concludere che è possibile un utilizzo per il monitoraggio dei parametri studiati.

Per completezza, in Tabella 10 si riporta un prospetto riassuntivo contenente gli algoritmi di conversione utilizzati per la mappatura dei vari parametri, riportante le equazioni ed il coefficiente di correlazione.

SATELLITE	PARAMETRO	EQUAZIONE	R ²
Modis	Torbidità	$TB = 0.3382 \cdot e^{(12.6 \cdot b1)}$	0.84
	Trasparenza	$SDD = -117.16 \cdot b1 + 6.8344$	0.73
	Solidi sospesi	non applicata	0.21
Landsat	Torbidità	$TB = 0.0037 \cdot e^{108.2 \cdot b3}$	0.92
	Trasparenza	$SDD = -191.52 \cdot b3 + 12.58$	0.79
	Solidi sospesi	$TSS = 11.829 * e^{-0.399 \cdot harna}$	0.92
Worldview2	Torbidità	$TB = 0.0146 * e^{0.0012 \cdot verde}$	0.64
	Trasparenza	$SDD = 31.33 * e^{-7E-04 \cdot verde}$	0.69
	Solidi sospesi	misure al suolo non eseguite	-

Tabella 10 Riassunto algoritmi

5 Bibliografia

1. Lassini F., Il dato satellitare per il monitoraggio della qualità delle acque costiere a seguito di eventi di pioggia. 2011
2. Claudia Giardino, Monica Pepe, Pietro Alessandro Brivio, Paolo Ghezzi, Eugenio Zilioli. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *Science of the total environment*, Volume 268, Issues 1–3, 14 March 2001, Pages 19–29.
3. Nijad Kabbaraa, Jean Benkhelilb, Mohamed Awadc, Vittorio Baraled, Monitoring water quality in the coastal area of Tripoli (Lebanon) using high-resolution satellite data, *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol 63, Issues 5, September 2008, Pages 488-495
4. Mancino, Nolè, Urbano, Amato, Ferrara. Assessing water quality by remote sensing in small lakes: the case study on Monticchio lakes in southern Italy. *iForest – Biogeosciences and forestry*, iForest 2009, Pages 154-161 2009
5. Härmä, Vepsäläinen, Hannonen, Pyhalhti, Kamari, Kallio, Eloheimo, Koponen. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *Science of the total environment*, Volume 268, 2001, Pages 107–121.
6. Zhiqiang Chen, Frank E. Muller-Karger, Chuanmin Hu. Remote sensing of water clarity in Tampa Bay. *Remote Sensing of Environment*, Volume 109, Issue 2, 30 July 2007, Pages 249–259.
7. Zhiqiang Chen, Chuanmin Hu, Frank Muller-Karger. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. *Remote Sensing of Environment*, Volume 109, Issue 2, 30 July 2007, Pages 207–220
8. Paul Lavery, Charitha Pattiaratchi, Alex Wyllie, Peter Hick. Water quality monitoring in estuarine waters using the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, Volume 46, Issue 3, December 1993, Pages 268–280.
9. GuofenG Wu , Jan De Leeuw , Andrew K. Skidmore , Herbert H. T. Prins & Yaolin Liu (2008) Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo–spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China, *International Journal of Remote Sensing*, 29:8, 2183-2198
10. F Pietro Alessandro Brivio, Claudia Giardino, Eugenio Zilioli, Validation of satellite data for quality assurance in lake monitoring applications, *Science of the Total Environment* ISSN 0048-9697 , vol. 268, no 1-3 (232 p.) (1 p.1/4), pp. 3-18, 2001
11. Claudia Giardino, Mariano Bresciani, Utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio della qualità delle acque, della vegetazione e dell'uso del suolo del Lago Trasimeno, Arpa Umbria, CNR-IREA, Progetto Ambientale Osservatorio Trasimeno, 2008.
12. Claudia Giardino, Alessandro Oggioni, Mariano Bresciani, Huimin Yan, Remote Sensing of Suspended Particulate Matter in Himalayan Lakes, ISSN 02764741, *Mountain Society*, Vol. 30, Issue 2, pag 157-168, 2010.