



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi Laurea Magistrale

**Osservazioni spaziali come
strumento di supporto nel campo
della Blue Economy.
Applicazioni e limitazioni dei dati
satellitari metoceanici.**

Relatori

Prof. Fabrizio STESINA

Ing. Giulia CERVELLI

Candidato

Andrea BISCIONE

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Ringraziamenti

Dedico questo lavoro di tesi, che conclama la chiusura di un quinquennio pieno di novità ed emozioni contrastanti, alla mia famiglia e a tutte le persone che ho incontrato durante il mio primo quarto di secolo di peripezie su questa roccia ricoperta d'acqua, che tutti noi chiamiamo Casa.

**"Libri, le migliori armi del mondo."
Doctor Who**

Sommario

La Blue Economy è un modello economico sostenibile che sfrutta le risorse naturali riutilizzabili dell'ambiente marino, come l'energia del vento, l'energia delle onde e l'energia termica, per la generazione di energia elettrica pulita. L'obiettivo è aumentare sempre di più l'uso di energia pulita a discapito di quella derivata dalle sostanze fossili. Per adempiere a questa sfida, risulta utile ottimizzare il design delle turbine eoliche, dei pannelli solari galleggianti e dei convertitori di energia meccanica delle onde. In particolare, è fondamentale la scelta dell'ottimale sito di locazione di tali strutture. Il mare è un ambiente sfidante, in termini di corrosività e presenza di avvenimenti avversi; da qui, nasce la necessità di monitorare e prevedere il comportamento del mare. I dati sullo stato del mare devono essere certificati e attualmente l'unico metodo validato sono le misurazioni in-situ. La strumentazione adoperata a questo scopo ha un costo elevato e i tempi per l'immissione in mare della strumentazione stessa sono un ostacolo. Inoltre, anche i tempi imposti per la raccolta dei dati a fini certificativi sono molto ampi (minimo due anni). Sorge, dunque, l'esigenza di ottimizzare il processo di raccolta di dati certificabili ottenendo una riduzione dei costi e accelerando il passaggio a un'economia totalmente green. Il lavoro di tesi si pone l'obiettivo di svolgere una prima analisi di fattibilità sull'uso di dati e immagini satellitari al fine di ottenere un database per le fasi di design, verifica e certificazione degli impianti off-shore. Sono state percorse due strade: la prima ha permesso di derivare la batimetria e l'intensità e direzione del vento usando immagini ottiche satellitari e immagini SAR satellitari; la seconda ha impiegato dati più elaborati, quali i parametri sullo stato del mare calcolati dal modello matematico ERA5 e misurati dal radar altimetro a bordo di un satellite, al fine di poterne eseguire un confronto con i parametri derivati.

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione | 7 |
| 1.1 | Analisi sulle caratteristiche delle onde del mare e sui venti | 8 |
| 1.2 | Scopo della tesi | 8 |
| 2 | Stato dell'arte | 11 |
| 2.1 | Metodi di acquisizione dei parametri sulle onde e sul vento | 11 |
| 2.1.1 | Misurazioni In-Situ | 11 |
| 2.1.2 | Metodi matematici | 12 |
| 2.1.3 | Misurazioni Satellitari | 14 |
| 2.2 | Strumentazione e sensoristica a bordo dei satelliti | 15 |
| 2.2.1 | Camere multispettrali | 16 |
| 2.2.2 | Synthetic Aperture Radar | 17 |
| 2.2.3 | Radar altimetri | 21 |
| 2.3 | Missioni Satellitari | 22 |
| 2.3.1 | Sentinel Satellite | 22 |
| 2.3.2 | Jason 2-3 | 27 |
| 2.3.3 | Costellazione cinese HaiYang | 28 |
| 2.3.4 | RadarSat | 29 |
| 2.3.5 | SMOS | 29 |
| 2.3.6 | Aeolus | 30 |
| 2.3.7 | Saral | 30 |
| 2.3.8 | Metop | 31 |
| 2.3.9 | GCOM - Global Change Observation Mission | 31 |
| 2.3.10 | Joint Polar Satellite Systems | 32 |
| 2.4 | Database | 33 |
| 2.5 | Data products | 34 |
| 3 | Metodi e tools | 39 |
| 3.1 | Workflow | 39 |
| 3.2 | Analisi Bibliografica delle missioni satellitari | 40 |
| 3.3 | Calcolo dei Revisit time e scelta dei satelliti | 42 |
| 3.3.1 | Pantelleria | 45 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4 | Processo di acquisizione dati satellitari | 49 |
| 3.5 | Analisi delle immagini SAR su SNAP | 52 |
| 3.5.1 | Introduzione SNAP | 52 |
| 3.5.2 | Pre - Processing delle immagini SAR | 52 |
| 3.5.3 | Stima del campo di velocità | 56 |
| 3.6 | Analisi delle immagini ottiche su SNAP | 61 |
| 3.7 | Sentinel 3 radar altimetro L2 data product | 68 |
| 3.8 | Output di ERA5 | 70 |
| 4 | Risultati e Discussione | 71 |
| 4.1 | Informazioni di contesto | 71 |
| 4.2 | Confronto tra dati satellitari e le altre metodologie | 71 |
| 5 | Conclusioni | 79 |
| A | Tabella data products "L2" e Parametri orbitali | 83 |
| | Bibliografia | 85 |

Capitolo 1

Introduzione

Il mare è da sempre una delle principali risorse naturali che la terra ci offre. Esso ha permesso in passato lo sviluppo e l'evoluzione del genere umano ed ora si sta affermando come un'importante fonte di energia rinnovabile. D'altro canto, la sua scarsa prevedibilità e corrosività hanno un notevole impatto sulle piattaforme, strumentazioni e sulle costruzioni che ne vengono a contatto. Da qui nasce la necessità di dover monitorare e prevedere il comportamento del mare per la selezione del sito di costruzione di un parco eolico o di un impianto off-shore Oil & Gas, per il design dei porti, ma anche per una gestione sicura ed efficace della navigazione marittima. In particolare, per quanto riguarda gli Off-shore Renewable Energy Plants si ha una visione più incentrata sull'efficienza della struttura. Sia per un convertitore di energia dalle onde (wave energy converter), che una turbina eolica (wind turbine), le principali caratteristiche necessarie sono l'energia potenziale legata all'altezza media delle onde e alle correnti marine, l'intensità e la direzione del vento, nonché gli stress meccanici da essi derivati. Quest'ultima considerazione incide notevolmente sul design dei porti [1] in quanto la capacità di mantenimento di un livello di sicurezza al suo interno è indispensabile. Attualmente queste informazioni vengono ricavate tramite strumentazioni in loco, le quali necessitano di iter burocratici sia per l'installazione, sia per l'utilizzo dei dati misurati. Al fine di ottenere la certificazione dei dati, bisogna avere una dataset di misurazioni su un arco temporale significativo, di almeno 2 anni. Questo comporta una dilatazione dei tempi di realizzazione dell'impianto offshore con un conseguente aumento dei costi legati alla ricerca e allo sviluppo dello stesso. I dati satellitari, vengono già utilizzate per la validazione delle misurazioni della strumentazione in-situ, ma non ancora per la certificazione dei progetti di design di impianti offshore. La finalità della tesi è di testare l'affidabilità dei dati satellitari e dei parametri derivabili per scopi certificativi del design di impianti offshore, andando a ridurre i tempi di acquisizione dei dati e quelli di certificazione.

1.1 Analisi sulle caratteristiche delle onde del mare e sui venti

Riuscire ad avere un continuo aggiornamento sulle condizioni del mare sta diventando più cruciale per poter monitorare i cambiamenti ambientali, fare previsioni sugli stati di mare e progettare e mantenere strutture offshore. Il comportamento del mare può essere descritto attraverso l'uso di molteplici fattori e metriche. Le principali sono le seguenti:

- Altezza significativa delle onde, l'altezza media del terzo più alto di un gruppo di onde registrate in un certo punto e ordinate per altezza crescente. Questo parametro è molto utile per il design dei wave energy converter;
- Velocità del vento, in termini di intensità, in quanto parametro cardine per il design di impianti offshore, dato che va ad impattare sulla quantità di energia elettrica generabile ma anche sui carichi indotti sulla struttura degli impianti;
- Direzione del vento, in quanto in fase di design degli impianti offshore è importante analizzare la direzione preferenziale, ovvero la direzione dominante in termini di intensità della velocità del vento;

Sulla base di queste primarie informazioni, annettendo ulteriori caratteristiche come il periodo medio dell'onda e la sua direzione, ma anche il livello di salinità e di pressione a livello del mare è possibile andare a derivare tutte le informazioni necessarie, in primis, all'analisi di fattibilità dell'impianto e successivamente alla verifica e certificazione degli stessi. Dato che tali procedure si basano sui dati relativi allo stato del mare, è inevitabile che ci sia una garanzia sulla loro affidabilità. Tali dati possono essere misurati, con strumentazione in-situ oppure attraverso l'uso di strumentazione a bordo di satelliti orbitanti intorno alla terra. Conoscendo le relazioni che modellizzano il comportamento delle onde del mare è possibile calcolarne l'andamento. Inoltre, alcune proprietà, possono essere derivate dalle misurazioni applicando dei metodi semi-empirici.

1.2 Scopo della tesi

Attualmente, l'uso dei metadati satellitari [2] per scopi certificativi relativi ad una proposta di design di una turbina eolica, porto o per la navigazione sicura, non è ampiamente diffuso. Infatti, per tali scopi vengono usate principalmente le misurazioni in-situ ottenute da sensori installati nel luogo di interesse. Tale strumentazione, seppur molto precisa, presenta diverse criticità. La ricerca si pone l'obiettivo di dimostrare la fattibilità e l'efficacia sull'uso delle costellazioni satellitari, in ottica di risparmio dei costi di installazione e di manutenzione della strumentazione in-situ e

in termini di riduzione dei tempi di ottenimento dei dati necessari alla certificazione delle boe in mare. L'attenzione è puntata sulla capacità dei satelliti di interesse, di fornire una copertura globale e di poter ottenere i dati L1/L2 gratuitamente e di elaborarli estraendo nuove informazioni. Il soddisfacimento dei requisiti sulla risoluzione temporale sarà oggetto di verifica del progetto, andando ad analizzare il revisit time, ovvero il tempo trascorso tra le osservazioni dello stesso punto sulla Terra da parte di uno o più satelliti.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Metodi di acquisizione dei parametri sulle onde e sul vento

I metadati oceanici sono fondamentali per la scelta del sito di locazione di un parco eolico off-shore, di convertitori energetici che sfruttano le correnti oceaniche, ma anche per la costruzione di un porto. I principali metadati da ottenere sono legati al vento, le onde e le maree. Inoltre, la conoscenza di ulteriori informazioni quali la salinità del mare, il livello di temperatura sulla superficie dell'acqua, le sfumature cromatiche e le maggiori rotte migratorie di uccelli e della fauna marina permettono di aggiungere nuovi criteri per il design e le attività di monitoraggio di impianti off-shore. Queste informazioni possono essere ottenute tramite la presenza in un sito specifico di una piattaforma mobile/fissa con a bordo della sensoristica oppure con dei metodi matematici. Infine, vengono utilizzate anche le costellazioni satellitari per l'osservazione della terra.

2.1.1 Misurazioni In-Situ

Le piattaforme per il monitoraggio dello stato del mare [4] sia mobili che fisse, presentano diversi sensori montati a bordo che servono alla raccolta completa dei parametri. Al fine di misurare l'intensità e la direzione del vento si adopera l'Anemometro in figura 2.1. Tale strumento si basa su un concetto di funzionamento elementare, ovvero è formato da un albero centrale al quale con dei raggi ad esso perpendicolari sono agganciate delle coppette. Quest'ultime in funzione dell'intensità del vento si mettono in rotazione andando a far ruotare di conseguenza anche l'albero centrale, deducendone così dal suo andamento il valore. La direzione del vento viene, invece, dedotta attraverso l'utilizzo della banderuola. Da un lato il progresso tecnologico ha reso più robusti gli anemometri agli eventi avversi, mentre dall'altra parte l'ambiente esterno (mare aperto) risulta molto stressante e questo

si riflette sui costi di manutenzione, ma anche sulla necessità di dover comunicare i dati dalla piattaforma off-shore a quella in-shore. Le torri meteorologiche sia in-shore che off-shore sono molto più complesse e costose degli anemometri ma in cambio hanno una sensibilità maggiore e una varietà di strumenti incorporati elevata. Infatti, misurano l'intensità, la direzione del vento, la turbolenza del vento, ma anche temperatura e pressione a livello locale.



Figura 2.1: Anemometro capace di misurare intensità e direzione del vento, @credit Digitron, <https://www.digitron-italia.com/it/meteorologia/anemometro-bluetooth-allarme-vento.html>

Le condizioni del mare, quali la significant wave height, il periodo e la direzione dell'onda, possono essere rilevate tramite sensori siti su piattaforme galleggianti (boe) [fig. 2.2] oppure sotto la superficie del mare. Le loro misurazioni sono molto affidabili, ma su uno spazio molto ristretto. È un dato puntuale in corrispondenza della boa sulla superficie libera del mare o in profondità. Per quest'ultima tipologia si ha un limite alla profondità di immersione dello strumento ed in più non vi è possibilità di comunicazione dei dati in strutture in-shore, se non attraverso un recupero periodico manuale dei dati. Altre tipologie non presentano tale criticità, infatti si possono utilizzare dei sistemi SatCom (Satelliti di comunicazione) per l'invio dei dati alle facility di terra. Rimane comunque la limitata vita operativa, strettamente legata al numero di batterie installate, e la necessità dell'ormeggio ergo un ulteriore vincolo sulla profondità di installazione. Per le misurazioni a profondità maggiore è possibile usare i Radar che sono di due tipi: Sensori Diretti ed Indiretti. Un radar molto utilizzato è il LIDAR che fornisce una mappatura tridimensionale della superficie [fig. 2.2].

2.1.2 Metodi matematici

La strumentazione in-situ ha un l'elevato costo sia di acquisizione che di manutenzione delle boe. Inoltre, ha anche dei lunghi tempi burocratici per quanto concerne

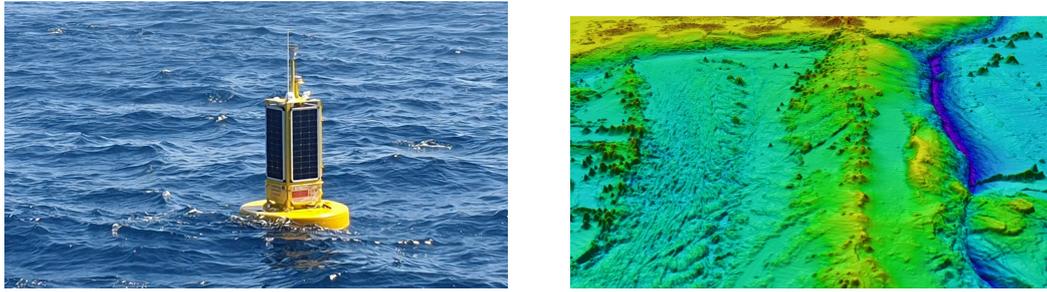


Figura 2.2: Boa ondometrica a sinistra, @credit Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, <https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/notizie-e-novita-normative/notizie-ispra/2021/03/al-via-il-progetto-i-wavenet> e Mappatura tridimensionale rilevata con LIDAR a destra, @credit GEBCO, <https://www.gebco.net/>

la certificazione e messa in opera della strumentazione stessa. Questi aspetti aggiunti alla limitata capacità spaziale fanno nascere l'esigenza di avere un altro metodo che copra un'area maggiore in tempi minori. La soluzione è l'utilizzo di metodi matematici come quelli oceanici ed atmosferici del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) del programma europeo Copernicus [5]. Uno dei database disponibili e più utilizzato è l'ERA5 [6] : Esso fornisce delle serie temporali ambientali come l'intensità e direzione del vento, altezza significativa delle onde, periodo delle onde, direzione delle onde, temperatura superficiale del mare, pressione e temperatura dell'aria. Fornisce un livello di informazioni molto completo, ma con una risoluzione spaziale molto ridotta; ovvero crea una griglia avente una risoluzione spaziale pari a 50 km x 50 km che non permette degli studi approfonditi di design delle strutture off-shore. Inoltre, ERA5 non tiene conto dell'interazione con il fondale marino, dunque lungo le zone vicino la costa è utile applicare metodi matematici regionali. I risultati di questo modello danno un'informazione di massima, mentre per poter andare avanti con le analisi bisogna applicare ulteriori metodi che permettono di ottenere il raffinamento della griglia. Per aumentare la correttezza dell'informazione ERA5 combina i dati del modello matematico con le osservazioni globali all'interno di database specifici. Da notare che l'acquisizione dei dati è gratuita.

Come precedentemente descritto, si ha la necessità di avere un dato con una risoluzione spaziale e temporale più elevata. Uno dei modelli matematici di downscaling delle informazioni delle onde per le zone costiere è il metodo SWAN (Simulating wave near-shore) [7]. Più nel dettaglio, è un modello d'onda di terza generazione, sviluppato presso la Delft University of Technology, che calcola le onde casuali generate dal vento a cresta corta nelle regioni costiere e nelle acque interne. Il modello [8] richiede informazioni batimetriche, condizioni iniziali, condizioni al contorno e condizioni di forzatura atmosferica (campi di pressione e vento) e

forzatura oceanica (campi di corrente e livelli di marea).

2.1.3 Misurazioni Satellitari

I satelliti sono degli oggetti che orbitano intorno ad un corpo celeste [fig. 2.3]. Per ottenere un'orbita stabile, ovvero per evitare la caduta sul corpo centrale oppure fuggire da esso bisogna mantenere un equilibrio tra due forze. Da una parte vi è l'attrazione verso il centro di massa del corpo più massivo "forza di gravitazione universale", dall'altra parte il satellite è in movimento ergo ha una velocità tangenziale rispetto al centro del corpo massivo non nulla. Da qui è possibile ricavare l'equazione della conica che rappresenta l'orbita la quale ha le seguenti proprietà:

- In assenza di perturbazioni esterne il satellite percorre ciclicamente la stessa orbita
- Ogni orbita può essere caratterizzata dai parametri kepleriani, ovvero inclinazione, eccentricità, periodo orbitale, ascensione retta del nodo ascendente, argomento del perigeo e l'anomalia vera.

$$r = \frac{h_2}{\mu \times (1 + e \times \cos\theta)} \quad (2.1)$$

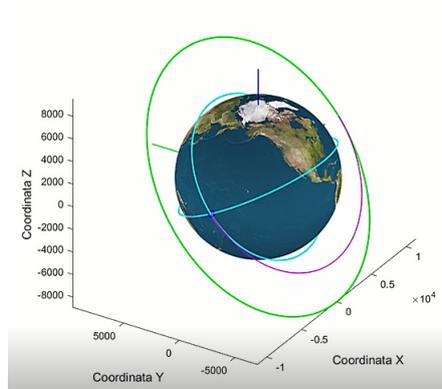


Figura 2.3: Low Earth Orbit intorno alla Terra

Nel cosmo sono presenti innumerevoli satelliti naturali e alcuni satelliti artificiali dalla fine degli anni 50' con l'immissione in orbita dello Sputnik 1 che riuscì per la prima volta a fornire dati sulla ionosfera e sulla densità dell'atmosfera alta. In questi decenni l'industria legata ai satelliti si è notevolmente sviluppata. L'avanzamento tecnologico ha ampliato l'utilizzo dei satelliti su diversi fronti, dalle missioni scientifiche come l'osservazione terrestre e gli studi dei principali corpi celesti del sistema solare ai satelliti di comunicazione ed infine l'utilizzo militare.

Recentemente siamo entrati in una nuova era dell'uso dell'ambiente spaziale: la "new space economy". Questo concetto si basa su un'apertura del mercato spaziale anche ad enti non governativi, ma l'attenzione è puntata sulla sostenibilità delle future missioni spaziali. L'utilizzo maggiore di componenti COTS (Commercial Off the Shelf component) e l'introduzione di procedure specifiche di dismissione del satellite, ma anche la scelta nell'utilizzo di costellazioni di piccoli satelliti "cube-sat", suddividendo le mansioni tra di loro sono alcuni esempi del nuovo approccio all'ambiente spaziale.

Negli ultimi anni, la maggiore consapevolezza sui fenomeni legati al cambiamento climatico e al peggioramento della qualità dell'aria hanno spinto la realizzazione di missioni satellitari in grado di monitorare tali cambiamenti.

Ai fini di questo progetto, la tipologia di satelliti trattata è quella per l'osservazione terrestre. Attraverso diversi sensori a bordo del satellite vengono mappate le principali proprietà del nostro pianeta. Sono disponibili le immagini rgb per le analisi cromatiche e quelle nell'infrarosso, correlabili alla temperatura del corpo osservato, mentre le caratteristiche atmosferiche (composizione, densità, etc...) vengono misurate con degli spettrometri.

2.2 Strumentazione e sensoristica a bordo dei satelliti

I satelliti per l'osservazione terrestre, vengono chiamati anche "remote sensing" perchè sfruttano il concetto di telerilevamento, ovvero la capacità di estrarre delle informazioni di alcuni oggetti raccogliendo ed analizzando i dati senza che vi sia un contatto diretto tra l'oggetto da osservare e lo strumento. I satelliti di questa categoria sono costituiti dal:

- payload, ovvero l'insieme dei sensori che ci permettono di osservare l'oggetto di interesse.
- platform, tutto ciò che supporta l'intero satellite ed in particolare il payload, fornendo potenza elettrica ai vari sottosistemi, un controllo termico ed un mantenimento e controllo dell'assetto e dell'orbita. Inoltre, è presente un sistema di gestione e scambio di dati sia scientifici che di housekeeping.

I payload di osservazione della terra sono i seguenti:

- Camera multispettrale,
- SAR "Synthetic Aperture Radar" ad immagini,
- SAR Altimetro ad onde radio.

Da notare che i SAR, sia ad immagini che altimetro, appartengono alla famiglia dei sensori attivi mentre la camera multispettrale appartiene alla tipologia di sensori passivi.

Nei successivi paragrafi verranno analizzate le principali caratteristiche dei payload per il remote sensing sopracitati.

2.2.1 Camere multispettrali

Le camere multispettrali sfruttano l'energia sottoforma di radiazione emessa da altri corpi, come il sole o la terra al fine di misurare la batimetria, ossia la morfologia in termini di profondità del fondale marino. Tale parametro è fondamentale per la scelta del sito di locazione di un impianto offshore, in quanto è presente un range di profondità ottimale e un livello limite sulla variabilità del fondale marino. L'illuminazione della scena ha origini esterne allo strumento. Infatti, lavorano nello spettro elettromagnetico che parte dal visibile fino all'infrarosso. I dati raccolti sono il frutto dell'interazione tra l'oggetto da osservare e la radiazione elettromagnetica del sole o del pianeta stesso. Da sottolineare che la presenza dell'atmosfera sul pianeta terra gioca un ruolo fondamentale, ovvero possono essere identificati dei range di lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico che vengono bloccate dall'atmosfera terrestre, dette finestre atmosferiche. Alla luce di ciò è noto che la maggior parte dello spettro elettromagnetico del sole passa nel range del visibile, ma in parte passano anche i raggi ultravioletti, una parte dell'infrarosso e tutta la parte delle onde a radiofrequenza [fig. 2.4].

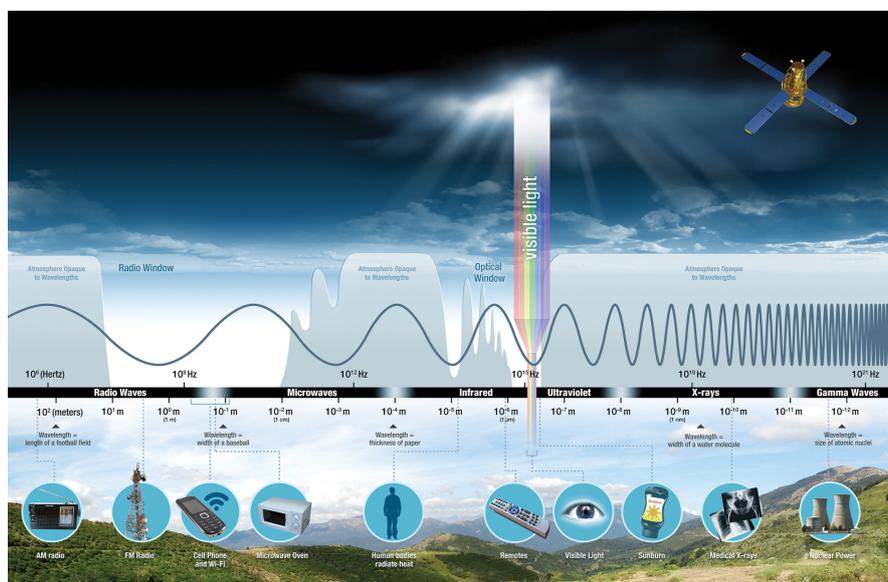


Figura 2.4: Spettro elettromagnetico della radiazione solare e relative finestre atmosferiche, credit Media INAF

Le camere multispettrali, hanno tre componenti principali [fig. 2.5]:

- Collettore delle radiazioni, ovvero l'ottica;
- Un detector;
- La parte meccanica di puntamento e movimentazione del payload secondo diverse tipologie di scansione della scena.

L'ottica può essere formata da una serie di lenti opportunamente posizionate che vanno a raccogliere e focalizzare la radiazione elettromagnetica riflessa. Un'altra tipologia di ottica sfrutta una serie di specchi che raccolgono e focalizzano la radiazione elettromagnetica rifratta.



Figura 2.5: Schema semplificato della struttura di una camera multispettrale

I fotoni vengono convogliati dall'ottica e arrivano al CCD (Charged Coupled Device), che dopo essere venuto a contatto con la radiazione subisce un cambiamento di stato, ovvero avvengono delle variazioni chimico-fisiche. Infatti, il CCD è formato da tanti piccoli elementi detti pixel che possono essere fotoimpressionati, ossia cambiano le loro caratteristiche in funzione della radiazione che li colpisce.

Il segnale di ogni pixel del detector viene prima amplificato e poi campionato e difatto si prende la radiazione e la si suddivide nel tempo, dopodichè si preleva l'informazione così trasformata. Infine, viene effettuata la conversione dell'informazione da analogica a digitale.

Sono presenti anche un sistema di gestione della potenza elettrica ed uno di controllo, detto processore.

Da notare che per le camere che usano l'infrarosso, bisogna usare dei detector dedicati che correlano la forza del segnale raccolto alla legge di stefan-boltzmann.

2.2.2 Synthetic Aperture Radar

I Radar sono dei sensori operanti nel range delle frequenze tra 1 GHz e 18 GHz [9]. Inoltre, sono attivi, ovvero il sensore non sfrutta la riflessione della radiazione solare sugli oggetti, ma è in grado di prodursi la sua radiazione elettromagnetica e di rilevare il segnale di ritorno dalla terra. Radar [10] significa RAdio Detection and Ranging e si basa sull'emissione di un'onda elettromagnetica e sulla successiva ricezione degli echi relativi alla retrodiffusione, ovvero "backscatters echoes".

L'antenna che trasmette il segnale è la stessa che poi va a ricevere il segnale di ritorno. Le lunghezze d'onda utilizzate sono le microonde ed essendo sopra il centimetro non sono sensibili all'atmosfera e alle nuvole. Questo permette di osservare ciò che accade sulla superficie con qualsiasi livello di copertura delle nuvole al di sopra. Inoltre, mantiene inalterate le performance sia durante il giorno che la notte dato che sfrutta una fonte di illuminazione indipendente. L'applicazione dei radar a bordo dei satelliti partì nel 1991 con il primo satellite dell'ESA chiamato ERS [11]. Un'importante caratteristica dei radar è la tipologia di polarizzazione dell'onda elettromagnetica che viene usata, sia in trasmissione che in ricezione, dato che vengono adottate delle onde coerenti [12], dunque onde in grado di mantenere la stessa relazione di fase durante la propagazione della stessa. La polarizzazione corrisponde alla direzione del vettore del campo elettrico [13] che è sempre ortogonale al vettore magnetico. Ne caso di onda polarizzata linearmente, abbiamo due casi:

- Polarizzazione verticale [V], quando il vettore del campo elettrico è sempre contenuto dal piano di incidenza, che è identificato dalla direzione di propagazione dell'onda e dalla normale alla superficie di osservazione,
- Polarizzazione orizzontale [H], quando il vettore del campo elettrico è sempre ortogonale al piano di incidenza.

La differenza principale tra i radar e le camere ottiche è l'uso di onde coerenti nel primo caso e la presenza di molteplici tipologie di onde non coerenti prodotte dal sole nel secondo caso. L'antenna che serve a trasmettere e a ricevere il segnale è caratterizzata dalla sua apertura:

$$\theta = \frac{\lambda}{L} \quad (2.2)$$

Dove θ è l'apertura angolare, che definita dal rapporto della lunghezza d'onda utilizzata e la lunghezza caratteristica dell'antenna. Per ottenere la risoluzione bisogna moltiplicare il theta con la quota del satellite. In funzione della banda utilizzate possiamo ottenere delle risoluzioni spaziali più o meno fini. Il metodo di acquisizione delle immagini dei radar è il seguente:

1. Viene emesso l'impulso che viaggiando raggiunge la superficie con una certa distribuzione all'interno di un'area,
2. Il segnale viene diffuso in tutte le direzioni e parte di esso raggiunge il satellite,
3. I segnali di backscatter si classificano in base al tempo trascorso.

La frequenza con la quale vengono generati gli impulsi PRF (Pulse Repetition Frequences) è fondamentale per la caratterizzazione del SAR, dato che ogni impulso rappresenta una linea dell'immagine. La distanza tra due linee di immagine consecutive è proporzionale al PRF. Ci sono due direzioni fondamentali per un'antenna:

- Range direction, che corrisponde alla direzione di propagazione dell'onda,
- Azimuth direction che segue la traiettoria del satellite.

Noto il PRF e la velocità del satellite è possibile ottenere la dimensione dei pixel:

$$PixelSize = \frac{V}{PRF} 1001 [14] \quad (2.3)$$

Importante distinguere la dimensioni dei pixel con la risoluzione spaziale quando si usano i radar. Per le camere ottiche la risoluzione spaziale da definizione è proprio la capacità di distinguere due oggetti vicini tra di loro, ergo se ho una dimensione dei pixel maggiore della risoluzione spaziale, avrò come unico effetto un'immagine degradata. Sotto un'altra luce, si può osservare che non ho bisogno di una risoluzione così fine. Nei Radar la risoluzione spaziale è molto maggiore della dimensione dei pixel.

Se ci focalizziamo sulla direzione trasversale, possiamo definire ground range resolution, la quale suddivide l'intera scena, ovvero la swath distance

$$GRD = \frac{ct}{2sen\theta} 1001 [14] \quad (2.4)$$

GRD è legato alla durata dell'impulso (t), alla velocità della luce (c) e all'angolo di incidenza. La dimensione dei pixel in questa direzione dipende dalla frequenza di campionamento, mentre nella dimensione geografica dei pixel interviene l'angolo di incidenza. Con i radar classici la più piccola risoluzione spaziale non è abbastanza per un'ottima analisi. Con l'avvento dei Radar ad apertura sintetica è stato possibile aumentare la risoluzione spaziale. L'apertura delle antenne dei radar sono ampie, ergo lo stesso oggetto viene osservato più volte per tempi lunghi. I radar ad apertura sintetica [15] processano il segnale di ritorno come se ci fosse un'unica grande antenna e dato che la risoluzione spaziale, come detto precedentemente, è direttamente proporzionale alla lunghezza dell'antenna, si ha un effetto finale di incremento della risoluzione spaziale.

Applicando un metodo semiempirico al coefficiente di retrodiffusione è possibile derivare l'intensità e la direzione del vento, fondamentale per stimare la redditività di un impianto offshore e progettare secondo i carichi del vento, ossia le forze agenti sulla struttura stessa dell'impianto offshore.

Tornando alla polarizzazione, sono possibile 4 combinazioni di utilizzo del segnale acquisito [tabella 2.1].

Le strutture verticali interagiscono molto con i segnali polarizzati verticalmente, mentre le strutture piatte come la superficie del mare interagiscono molto con i segnali polarizzati orizzontalmente.

Oltre alla polarizzazione, la potenza ricevuta dall'antenna incide sulla qualità del segnale stesso secondo la seguente relazione:

$$dPr = \frac{PeGe}{4\pi R^2} \frac{RCS}{4\pi} \frac{Gr\lambda^2}{4R^2\pi} \quad (2.5)$$

| Segnale inviato | Segnale di ritorno |
|-----------------|--------------------|
| V | V |
| H | H |
| V | H |
| H | V |

Tabella 2.1: Combinazioni possibili del segnale

Si ha un legame con delle costanti del sensore, come il guadagno dell'antenna ricevente e trasmittente e parametri dimensionali. L'unico parametro variabile è RCS, ovvero Radar Cross Section, che è l'equivalente della riflettanza nel campo delle camere ottiche. RCS è l'area trasversale che viene vista dal radar, ovvero la capacità di un corpo di essere più o meno trasparente alle onde elettromagnetiche. Infatti, possiamo avere un corpo molto voluminoso ma con RCS piccola ed un corpo piccolo con RCS grande dato che riflette molto le onde radio. RCS per definizione è un'area, ma si preferisce gestirla come grandezza adimensionale, dunque si ottiene il radar backscattering coefficient.

$$\sigma_0 = \frac{RCS}{d\Sigma} \quad (2.6)$$

Inoltre, questo coefficiente, data la sua alta variabilità, si preferisce gestirlo in dB, ovvero applicando il logaritmo.

Detto ciò, è importante focalizzarci sul come il segnale interagisce con una superficie naturale. Ci sono principalmente due modi di interazione:

- Surface scattering,
- Volume Scattering.

Il Surface scattering avviene quando c'è interazione tra un'interfaccia, ovvero tra uno strato ed un altro, come può essere l'aria e la superficie terrestre/acqua. Quando sono presenti la vegetazione, neve o ghiaccio allora si parla di volume scattering, dato che sono presenti molti punti di diffusione ed ognuno interagisce singolarmente con l'onda elettromagnetica incidente. Concentrandosi sugli effetti nell'ambito di nostro interesse, ovvero l'oceano, possiamo correlare il backscatter coefficient con la rugosità della superficie, in questo caso il pelo libero del mare. Infatti, nel caso ideale di superficie completamente liscia si ha che tutta la radiazione incidente riflette tutta lungo la sua direzione speculare. Se la superficie presenta una piccola rugosità allora, oltre alla componente speculare avremmo anche una piccola diffusione del segnale. Se la rugosità è molto alta non avremo più una direzione preferenziale, ma il segnale verrà riflesso su tutte le direzioni con conseguente aumento dell'intensità del segnale ricevuto. Da qui possiamo correlare la rugosità con la deviazione standard, tenendo conto della lunghezza d'onda del segnale incidente.

2.2.3 Radar altimetri

L'altimetro è uno strumento che misura le distanze ed è in grado di derivarne l'intensità e la direzione del vento ma anche caratterizzare il comportamento delle onde del mare. In particolare, l'andamento delle onde del mare è fondamentale per valutare i carichi sulla struttura portante dell'impianto offshore. Emette onde radio in forma pulsata in direzione del NADIR, questi segnali vengono diffusi quando vanno a contatto con gli oggetti sul terreno e successivamente viene ricevuto l'eco del segnale. Tenendo conto del tempo trascorso tra la trasmissione e la ricezione del segnale, è possibile calcolare la distanza tra il satellite e gli oggetti colpiti. In funzione della superficie colpita, avremo una diversa forma dell'eco di ritorno del segnale. Tramite un diagramma che lega il tempo percorso e la potenza del segnale ricevuto è possibile dedurre la tipologia di superficie colpita. Generalmente la curva presenta un andamento piatto, ma non nullo nel primo intervallo di tempo e questo è dovuto alla presenza di rumore. Una volta che l'onda sferica interseca la superficie, sia ha un repentino aumento della potenza ricevuta. La pendenza con la quale la curva sale è legata alla rugosità della superficie. Possiamo analizzare anche la parte finale della curva, in quanto se siamo in presenza di una superficie piatta avremo una riduzione repentina della potenza del segnale di ritorno. Se siamo in presenza di oggetti volumetrici allora la parte finale della curva sarà un plateau. Oltre alle distanze è possibile derivare le velocità andando ad analizzare una serie di rilevazioni altimetriche. Possono essere le variazioni del terreno, dei ghiacciai, ma anche l'intensità e la direzione del vento e per quanto riguarda gli oceani anche le caratteristiche morfologiche del mare come l'altezza media delle onde e l'anomalia media. La forma del segnale di ritorno può essere analizzata nel discreto attraverso l'uso di istogrammi. Da qui vediamo che la forma dipende dalle condizioni meteorologiche. Infatti, è possibile ricavare informazioni sul vento attraverso la rugosità del mare, ma anche sulla temperatura e sulle slavine. Tuttavia è difficile distinguere l'identità precisa dei fenomeni che formano un determinato eco di ritorno. Per un fascio singolo si ha:

$$D = 2h \tan \theta/2 \quad (2.7)$$

Con theta l'apertura angolare dell'antenna e h la quota del satellite.

Per un fascio pulsato si ha:

$$r = \sqrt{hc\tau} \quad (2.8)$$

Con c velocità della luce e tau la durata dell'impulso.

Per un fascio limitato dall'effetto doppler si ha:

$$\delta X = h \frac{\lambda}{2Nv} * PRF \quad (2.9)$$

PRF (Pulse Repetition Frequency), lambda è la lunghezza d'onda del segnale, N è il numero di segnale generati e v è la velocità.

2.3 Missioni Satellitari

Dal lancio dello Sputnik 1 ad oggi sono state molteplici le missioni compiute dai vari paesi nel mondo. Si stima, infatti, che attualmente ci siano più di 5000 satelliti attivi intorno alla terra e più di 10000 detriti spaziali più grandi di 20 cm. Per i nostri fini ci concentreremo sui satelliti per l'osservazione terrestre. In particolare, andremo ad introdurre le caratteristiche principali di tali missioni, descrivendone la tipologia d'orbita e gli strumenti a bordo. La costellazione di satelliti più innovativa e che fornisce dati a tutta la popolazione in modo gratuito è la famiglia dei Sentinel del programma europeo Copernicus.

2.3.1 Sentinel Satellite

La costellazione Sentinel ricopre svariate funzioni operative, in quanto ogni satellite possiede della strumentazione differente a bordo, che rende l'intera missione molto completa ai fini dell'osservazione terrestre. In sintesi, come descritto sul sito ufficiale [16] abbiamo :

- Sentinel 1: Synthetic aperture radar in banda C,
- Sentinel 2: MSI Camera multispettrale passiva,
- Sentinel 3: OLCI Spettrometro ad immagini, push-broom, SLSTR radiometro ad immagini conico, SRAL SAR altimetro a doppia frequenza,
- Sentinel 4: Camera multispettrale con bande nell'UV(Ultravioletto)-VIS e NIR (vicino infrarosso),
- Sentinel 5: Spettrometro ad immagini, per l'analisi della composizione dell'atmosfera,
- Sentinel 6: Poseidon4 un SAR altimetro ed un radiometro a microonde per un miglioramento delle performance nelle zone costiere.

La missione Sentinel 1 [fig. 2.6] è formata da una costellazione di due satelliti, 1A e 1B che percorrono un'orbita sunsincrona sullo stesso piano orbitale. Tale orbita permette al satellite di seguire il movimento del sole, ergo è sempre illuminato dalla luce solare. Inoltre, la sua orbita è inclinata di 98° e questo gli permette di avere una copertura quasi globale della terra. La missione è in grado di fornire svariati servizi [17]:

1. Sorveglianza e monitoraggio degli oceani, incluso l'identificazione di navi e delle loro perdite di carburante,
2. Supporto umanitario e situazioni di crisi,



Figura 2.6: Sentinel 1, credit: ESA

3. Monitoraggio dei ghiacciai,
4. Identificazione e classificazione della vegetazione.

Focalizzandoci sulla strumentazione a bordo, sul SAR, possiamo elencarne le seguenti proprietà:

- Opera sulla singola banda C con frequenza centrale pari a 5.405 GHz,
- Dotata di un'antenna a scansione rapida sia in azimuth che in elevazione, con una capacità di archiviazione dati pari a 1.4 Gbyte e di download in banda X di 520Mbit/s.
- Supporta due diverse polarizzazioni, lineare verticale e lineare orizzontale, che se combinate in trasmissione e ricezione generano 4 segnali diversi.

Inoltre, come reso noto da Copernicus [18] la strumentazione è in grado di acquisire i dati tramite più modi operativi [fig. 2.7]:

- Wave mode (WV)
- Extra-wide swath (EW)
- Stripmap (SM)
- Interferometric wide swath (IW)

Stripmap rende possibile un proseguimento coerente dell'acquisizione dati con le missioni satellitari ERS e ENVISAT che non sono più operative. In particolare ha una risoluzione di 5x5 m con una swath distance pari a 80 km. IW [fig. 2.8] ha sia una swath distance elevata (circa 250 km), ma anche una buona risoluzione spaziale (circa 20 m). Oltre a ruotare l'antenna lungo la direzione trasversale, viene ruotata elettricamente anche lungo la direzione azimuthale. EW permette di avere revisit time minori, ma perdendo in risoluzione spaziale (40 m). Wave

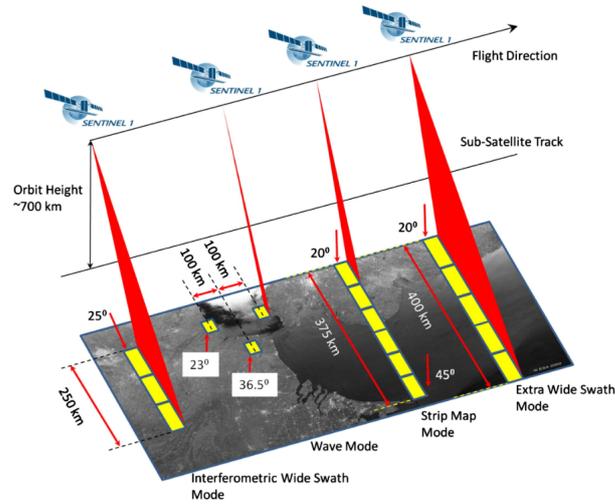


Figure 1: SENTINEL-1 Modes

Figura 2.7: Modi di acquisizione del Sentinel 1

mode, combinata al modello globale delle onde, permette di ottenere informazioni sull'altezza e il periodo delle onde. L'immagine è formata da più immagini da 20x20 km prese su due diversi angoli di incidenza.

Da notare che il Revisit time di un singolo satellite è di 12 giorni, mentre la costellazione permette di avere il dato sulla stessa porzione di terra dopo soli 6 giorni.

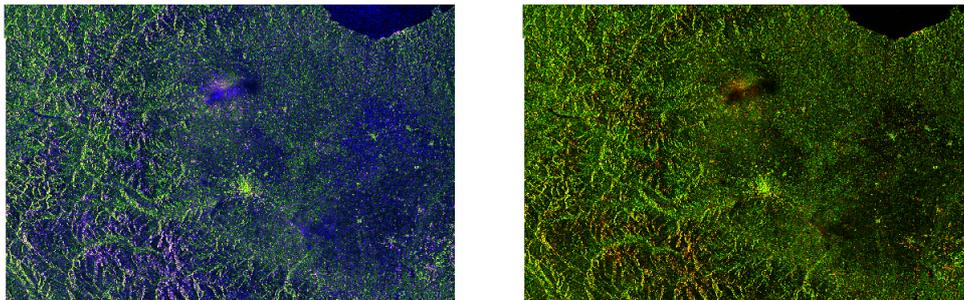


Figura 2.8: Immagini generate dal SAR a bordo del Sentinel 1

Sentinel 2 [fig. 2.9] è formata da due satelliti sullo stesso piano orbitale, sfasate di 180°. L'orbita è quasi polare e questo fornisce una copertura quasi globale. La sua strumentazione copre diverse bande, dal visibile all'infrarosso, e questo gli permette di identificare e classificare le variazioni del suolo. Per singola immagine ha una swadth distance di 290 km e un periodo di revisit time per singolo satellite



Figura 2.9: Sentinel 2, credit : ESA

di 10 giorni all'equatore, mentre si dimezza con due satelliti e si ha un ulteriore dimezzamento se si considerano le latitudini medie (circa $40^\circ - 50^\circ$).

In particolare, ha presente a bordo una camera multispettrale avente 13 bande con differenti risoluzioni spaziali. Fornisce la continuità del dato misurato dalle precedenti missioni spaziali SPOT e LANDSAT.

Da notare che l'ottenimento dei dati in singole bande, viene eseguito da componenti dedicate della strumentazione. In questo modo vengono usati piani focali diversi per ogni banda, nonché detector diversi per quanto riguarda i segnali nel range del visibile e dell'infrarosso.

Il payload di osservazione sfrutta il meccanismo push-broom per l'acquisizione dei dati. Si hanno dieci canali per le lunghezze d'onda del VNIR e due per le lunghezze d'onda nello SWIR. Con questa strumentazione è possibile ottenere immagini RGB. Selezionando, invece, la banda dell'infrarosso al posto del rosso è possibile ottenere un'immagine a falsi colori che tiene conto della proprietà termica della scena osservata.

La figura 2.10 riporta un esempio delle immagini generabili con le misurazioni in diverse bande del sentinel 2.



Figura 2.10: Immagini generate dalla camera multispettrale del sentinel 2; rgb di Torino a sinistra e a falsi colori a destra

Sentinel 3 (A e B) [fig. 2.11] hanno un'orbita sun-sincrona polare con uno sfasamento di 180° tra di loro. Il singolo satellite presenta un revisit time di 4 giorni, mentre viene dimezzato se consideriamo entrambi i satelliti. Lo scopo principale di questa missione è quello di misurare la topografia del mare, la batimetria, la temperatura del mare e i valori di intensità e direzione del vento. Una breve descrizione della strumentazione viene riportata come segue:

- Radar altimetro: Opera in doppia frequenza (Ku e C) al fine di avere un dato corretto dalla presenza delle nuvole,
- OLCI: Spettrometro ad immagini con 21 bande, dall'UV all'infrarosso. Riesce a classificare diverse tipologie di alghe e phytoplankton in base alla colorazione dell'oceano. Ha una swath distance di 1270 km e una risoluzione spaziale di 300 m,
- SLSTR: L'utilizzo dell'infrarosso, sia vicino che lontano, gli permette di ottenere una mappatura della temperatura sia sulla terra ferma che sugli oceani. Ha una swath distance di 140 km al NADIR e 750 all'indietro con una risoluzione spaziale di 500 m.

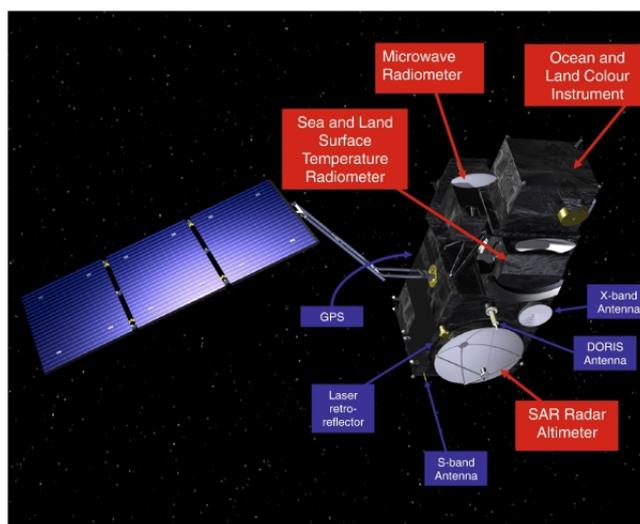


Figura 2.11: Sentinel 3 , credit: ESA

Sentinel 4 e 5 hanno come scopo principale quello di monitorare la qualità dell'aria e l'andamento degli inquinanti sopra l'Europa. Inoltre, vengono tenute sotto osservazione le varie sostanze che hanno un impatto sul clima (Gas serra principalmente). In accordo con quanto esplicitato sull'handbook ufficiale [19], le sostanze monitorabili sono le seguenti:

- Diossido di azoto,

- Ozono sia troposferico che stratosferico,
- Diossidi di zolfo,
- Formaldeide e gliossale,
- Monossido di carbonio,
- Metano.



Figura 2.12: Sentinel 6 , credit: ESA

Sentinel 6 [fig. 2.12] è in grado di misurare le principali caratteristiche degli oceani, in quanto è stato progettato per monitorare l'andamento del livello del mare a causa del riscaldamento globale sta aumentando. Il POSEIDON 4 a bordo permette misurazioni precise del SSH e del SWH (rispettivamente Sea Surface Height e Significant Wave Height). Ha un PRF (Pulsed Repetition Frequency) di 9 KHz, 3 volte maggiore del Jason-3. Essendo un singolo satellite, dato che è stato messo in orbita operativa di recente, ha un revisit time di 10 giorni, maggiore rispetto alle altre costellazioni sentinel.

2.3.2 Jason 2-3

Un'altra missione satellitare in grado di offrire dati di interesse sul monitoraggio degli oceani è il Jason.

Jason 2 e Jason 3 sono una coppia di satelliti che percorrono un'orbita sun-sincrona su un piano orbitale inclinato di 66° . Oltre alle misurazioni in ambito marittimo, le sue informazioni estrapolate sono di grande interesse per il monitoraggio degli effetti del cambiamento del clima. Il payload a bordo è il POSEIDON-3B, un radar altimetro in grado di misurare costantemente la distanza tra il satellite

in orbita e il geoide (terra standard), ma anche dati scientifici come l'altezza media delle onde e la velocità dei venti, che è correlata alla rugosità del mare o comunque delle superfici. Inoltre, il singolo satellite permette di avere un revisit time di 10 giorni mentre la serie lo dimezza a 5.

2.3.3 Costellazione cinese HaiYang

I satelliti HaiYang sono due serie di satelliti per il monitoraggio degli oceani in relazione al cambiamento climatico, per usi di previsione e per prevenire i disastri ambientali. In particolare, loro misurano i parametri relativi al moto dinamico del mare e i cambiamenti delle condizioni nominali. La strumentazione a bordo è in grado di misurare con alta precisione e con un elevato revisit time (anche meno di un giorno) i seguenti parametri:

- SST : Sea surface temperature
- MSH : Marine surface Height
- WV : Wind vector

Da notare come si possono raggiungere valori di revisit time così bassi (mezza giornata) grazie alla presenza di quattro satelliti sullo stesso piano orbitale sfasati di 90° . Il Payload principale è un radar altimetro a doppia frequenza (banda Ku e C) in grado di ottenere le seguenti informazioni:

- Parametri relativi alla superficie del mare con precisione minore di otto cm.
- Range di misurazione dell'altezza significativa delle onde compresa tra i 0.5 m e i 20 m.

Entrambe le serie (Haiyang 1 A-B-C-D e Haiyang 2 A-B-C-D) percorrono un'orbita sun-sincrona con inclinazione pari a 98° garantendo una copertura globale.

Ai fini applicativi dei dati misurati dalla costellazione cinese è fondamentale conoscere i modi operativi [20]:

1. Misurazione del bias del rumore: viene misurato il rumore e da qui il bias del radar altimetro; questo serve a scegliere un threshold per l'acquisizione e tracking da utilizzare come correzione degli echi di ritorno.
2. Calibrazione interna: ogni 30 s campiona i dati di calibrazione che andranno a supporto dei pacchetti di dati scientifici.
3. Acquisition mode: la fase precedente al tracking, ove l'eco ricevuto viene associato con la sua tracking window.
4. Tracking mode: la misurazione vera e propria del satellite.

5. Bus communication: viene costruito il pacchetto scientifico completo, con il dato misurato, ma anche informazioni sull'orbita, temporali e flag.
6. Trasmissione dati: i dati vengono impacchettati ed immagazzinati nello storage, dal quale verranno trasmessi alle stazioni di terra.

2.3.4 RadarSat

RadarSat [21] é una serie di due satelliti identici posizionati su un'orbita sunsincrona inclinata di 98° . La strumentazione a bordo è un radar ad apertura sintetica a singola frequenza pari a 5.3 GHz. Inoltre, come già descritto nel capitolo 2.2, il SAR può essere usato sotto qualsiasi condizione meteo, dato che è trasparente alle nuvole, e quindi anche in presenza di neve e pioggia. Utilizza la polarizzazione lineare, sia verticale che orizzontale, al fine di poter operare sia sulla terra ferma che sulle superfici piatte come gli oceani. Inoltre, i suoi modi operativi sono [28]:

- ScanSar wide and narrow,
- Wide,
- Fine,
- Standard,
- Extended high and low.

Tutti i modi operativi tranne l'extended high and low sono sia a singola che doppia frequenza. La missione prevede i seguenti obiettivi:

- Gestione disastri,
- Monitoraggio degli oceani, ghiacciai e zone costiere,
- Agricoltura e studio delle foreste,
- Cartografia e idrologia.

In generale, anche le missioni precedentemente descritte possono essere utilizzate negli ambiti sopracitati, in maniera più o meno accurata ed efficiente.

2.3.5 SMOS

Soil Moisture and Ocean Salinity permette appunto di monitorare l'umidità del suolo e la salinità del mare in relazione alle continue variazioni del ciclo dell'acqua. Inoltre, la sua strumentazione è in grado di monitorare le principali caratteristiche topografiche degli oceani a livello globale. La sua orbita è circolare, sun-sincrona

ed inclinata di 98° . Il payload scientifico è il MIRAS, ovvero un SAR, ma a differenza di quelli precedentemente descritti, questa è la variante passiva (sfrutta l'illuminazione del sole) interferometrica. Infatti, otteniamo dati in 2D nello spettro delle microonde, in particolare nella banda L. Il sensore è costituito da una parte centrale e tre braccia a cui sono integrati 69 ricevitori.

2.3.6 Aeolus

LO scopo di Aeolus è quello di mappare i venti su scala globale a differenti quote, più precisamente partendo dai 100 m sopra il livello del mare fino a 30 km. La strumentazione a bordo comprende un LIDAR ad effetto doppler in grado di mappare la cella di Hadley, Ferrel e le celle polari. Anche se è presente un singolo satellite, la combinazione ottimale della risoluzione spaziale e i suoi parametri orbitali permette di avere un revisit time di soli sette giorni. Le misurazioni del vento su scala globale contribuiscono ai seguenti obiettivi [29]:

- Migliorano l'accuratezza dei modelli di previsione del tempo,
- Aiutano a chiarire i fenomeni dietro le dinamiche dell'atmosfera,
- Forniscono ulteriori informazioni legate al cambiamento climatico,
- Migliorano la gestione della capacità energetica dei venti.

ALADIN è un lidar che opera nella regione dell'ultravioletto. Il suo particolare puntamento permette di ricevere quasi su tutta l'orbita un segnale in grado di estrapolare dei valori corretti della componente orizzontale est-ovest del vento.

Il sensore lidar calcola la differenza tra la frequenza dell'impulso inviato con quello ricevuto, alterato dall'effetto doppler. Associando anche la variabile tempo è possibile determinare il vento a varie quote.

2.3.7 Saral

Il satellite [22] fa parte di una missione congiunta tra il CNES (Centre national d'études spatiales) e il ISRO (Indian Space Research Organisation), e il suo scopo è quello di colmare il gap tra il Jason 3 e il Sentinel 3. L'integrazione e la fusione dei dati di queste tre missioni satellitari permette di ottenere una misurazione più accurata, precisa e valida [23]. Inoltre, è in grado di estrapolare sia direttamente che indirettamente informazioni sulla topografia del mare e sulle ricircolazioni oceaniche.

La sua orbita è sun-sincrona, polare ed inclinata di 98° . Il payload per l'osservazione terrestre è un radar altimetro a singola frequenza (35,75 GHz), ovvero la banda Ka. Oltre alla frequenza principale, è possibile utilizzare una seconda frequenza al fine di correggere il dato dall'influenza che risente il segnale passando

attraverso la troposfera umida. Data l'unicità della banda utilizzata, con scopi di monitoraggio degli oceani, è utile introdurre una descrizione breve della struttura del sensore:

- Antenna adibita alla ricezione del segnale su più frequenze,
- Solid state power amplifier in banda Ka,
- Low noise amplifier in banda Ka,
- Strumento di calibrazione,
- Duplexer.

2.3.8 Metop

Il payload del Metop è l'ASCAT, uno scatterometro specializzato nella misurazione dell'intensità e direzione del vento. Due gruppi di tre antenne misurano la retrodiffusione elettromagnetica risultante dalla ruvidità superficiale dell'oceano causata dal vento, in due strisce larghe 500 km, su ciascun lato della traccia a terra del satellite. Le tre direzioni sono necessarie per risolvere l'ambiguità della direzione del vento. Metop B e C orbitano sullo stesso piano orbitale, sfasati di 180 °, ed in particolare l'orbita è sun-sincrona, polare ed inclinata di circa 98 °. Lo scatterometro è uno strumento molto simile ai radar, ovvero si ha un segnale inviato e si ha la ricezione del segnale retrodiffuso.

2.3.9 GCOM - Global Change Observation Mission

Come descritto sul sito dell'agenzia spaziale giapponese "JAXA", la missione ha come scopo quello di costruire un rete di satelliti che consentano un'osservazione continua della terra al fine di poter monitorare in tempo reale l'andamento del cambiamento climatico. Attualmente la serie è composta da i seguenti satelliti, aventi strumentazione differente:

- GCOM-Water Shizuku "Una goccia d'acqua" [24] : sito in un'orbita sun-sincrona, polare ed inclinata di 98 ° permette una copertura globale. Permette di osservare i cambiamenti nella circolazione del mare, in particolare l'AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) riesce a misurare le precipitazioni, il contenuto di vapore acqueo, intensità e direzione del vento sugli oceani, topografia del mare e temperatura superficiale del mare.
- GCOM-Climate Shikisai "Colorazione" [25]: anch'esso sito nella stessa orbita del Shizuku, ma sfasato di 180 °, ha come scopo l'osservazione dei cambiamenti climatici. La sua strumentazione scientifica a bordo è il SGLI "Second

Generation Global Imager". I suoi sensori sono in grado di monitorare il ciclo del carbonio, fenomeno peculiare sugli effetti del cambiamento climatico. Inoltre, attraverso il radiative budget è in grado di ottenere la radiative force, che è il bilancio netto tra la radiazione assorbita e quella riflessa dalla terra. Questo parametro è influenzato dalle nuvole, dalla vegetazione, dal colore del mare, dalla presenza di aerosol e dalla quantità di ghiaccio e neve.

AMSR2 del Shizuku è un radiometro a scansione operante nel range delle microonde, in particolare su sei bande differenti che partono da una frequenza di 7 GHz ad e arrivano ad una di 89 GHz. La sua grande antenna e il suo sofisticato metodo di steering gli permettono di inviare degli impulsi ogni 1.5 s e di mappare su ogni immagine circa 1450 km di scena. Questo gli permette di avere una copertura globale in soli due giorni. Inoltre, anche se viaggia ad una quota di 700 km i sensori riescono ad avere dati molto accurati, come quella della temperatura superficiale del mare che è di solo 0.5 ° K. SGLI del Shikisai è una camera multispettrale che opera su più bande, in particolare dalla banda dell'ultravioletto a quella dell'infrarosso termico (380 nm - 1200 nm). Può inoltre svolgere funzioni di polarimetria e grazie allo steering del detector dedicato alla parte termica dello spettro elettromagnetico, è possibile avere una misurazione sia in avanti che indietro di tali bande (NIR e TIR). La sua copertura globale è simile al GCOM-W Shizuku, ma con un range relativo alla risoluzione spaziale più elevata, essendo un sensore ottico, infatti va dai 250 m al kilometro.

2.3.10 Joint Polar Satellite Systems

JPSS è un consorzio formato dalle seguenti missioni satellitari:

- NOAA 15/16/17/18/19/20,
- Suomi SNPP.

Avendo la possibilità di fare un'integrazione e fusione dei dati ottenuti con i diversi satelliti, data la previa coerenza del dato raccolto sia in base alla risoluzione spaziale che temporale, ma anche radiometrica, è possibile disporre di un database di immagini con revisit time minore. L'unione di questi satelliti è stata, infatti, scelta per avere un miglioramento del revisit time al fine di ottenere un maggiore numero di determinati parametri nella stessa unità di tempo. Sono presenti diversi sensori, quali:

- Camere multispettrali nel range del visibile e infrarosso,
- Sounder infrarosso, per una mappatura 3D della temperatura della superficie osservata,
- Camere iperspettrali per l'analisi della composizione dell'atmosfera.

2.4 Database

Le misurazioni satellitari, una volta trasmesse alle ground station, vengono dapprima processate e poi raccolte in database usufruibili dai clienti. Da questi è possibile scaricare i dati di nostro interesse.

I principali fornitori di dati satellitari sono i seguenti:

- Sentinel Open Access Hub : è la piattaforma contenente i dati relativi alle missioni sentinel 1,2,3. L'utilizzo di questo database è completamente gratuito e i dati scaricati possono essere modificati ed elaborati e le informazioni ricavate possono essere pubblicate. Sulla piattaforma è possibile usufruire del servizio di scaricamento di immagini on-demand, ovvero in base alle necessità è possibile selezionare determinate immagini oppure posso scegliere di connettere il proprio server/cloud con delle API, definite da Copernicus, al database.
- China Ocean Satellite Data Service Center: è la piattaforma dedicata ai satelliti della serie HaiYang dell'agenzia spaziale cinese. Il loro servizio permette di inviare previa iscrizione con un account personale una richiesta di acquisizione di pacchetti di dati. Dopo il processamento della richiesta da parte dell'ente preposto, verrà comunicato in primis l'esito, dato che non tutti i dati presenti nel database sono aperti a tutta la popolazione in modo gratuito, e a valle di ciò verrà inviato il pacchetto di dati di interesse.
- ENVISAT Open Access Hub: è la piattaforma gestita da EUMETSAT che raccoglie i dati di svariate missioni satellitari. Ha le stesse funzionalità del Sentinel Open Access Hub, infatti si possono scaricare i dati sia in modo automatico che manuale, generando una lista di dati visualizzabili su una GUI dedicata.
- AVISO plus: è la piattaforma di proprietà del CNES "Centre national d'études spatiales", facente parte l'agenzia spaziale francese. Il suo database è uno dei più forniti in termini di missioni satellitari, ma presenta alcune peculiarità nell'utilizzo pratico, in quanto anche se l'utilizzo dei dati è gratuito, è presente una forte sicurezza nell'acquisizione dati ed in funzione dello scopo e della carica ricoperta è presente un limite sui dati scaricabili. Inoltre, molte missioni satellitari disponibili sono sovrapponibili con il database ENVISAT. A valle di queste considerazioni, il download dei dati è stato eseguito partendo dal database ENVISAT.

La tabella seguente associa le diverse missioni satellitari con i database dove è possibile scaricare i relativi dati:

| | |
|------------------------------------|---------------------|
| Dissemination service | |
| Sentinel 1 - 2 - 3 | Open Access Hub |
| Sentinel 4 - 5 - 6 | ENVISAT Access Hub |
| Jason 3 | ENVISAT Access Hub |
| SARAL | ENVISAT Access Hub |
| METOP | ENVISAT Access Hub |
| HAIYANG | ENVISAT Access Hub |
| ERS 1 - 2 | ENVISAT Access Hub |
| SMOS | earth ESA EOGateway |
| AEOLUS | earth ESA EOGateway |
| SARAL e altri satelliti della NASA | Podac JPL Nasa |

2.5 Data products

I dati contenuti nei database possono essere scaricati in differenti livelli di elaborazione, ossia dal dato grezzo all'informazione estrapolata applicando diversi algoritmi atti a rendere il dato utile per il cliente finale della piattaforma. Per quanto riguarda i dati satellitari, la classificazione del dato in base al livello di elaborazione fornita è la seguente:

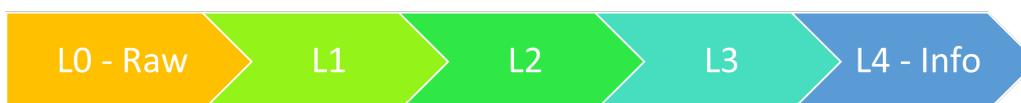


Figura 2.13: Classificazione dei dati satellitari

Generalmente la codifica sopracitata indica [26]:

- L0: Il dato è grezzo e corrisponde a quello di telemetria, ovvero i parametri misurati direttamente dal sensore. Vengono solo applicati degli algoritmi basici per l'eliminazione degli artefatti di comunicazione ed inoltre, i pacchetti non idonei vengono rimossi.
- L1: Il dato grezzo viene elaborato andando ad applicare algoritmi in grado di correggere le misurazioni dagli effetti strumentali. Sensori diversi necessitano di correzioni differenti; per esempio il dato grezzo dell'OLCI viene corretto sia radiometricamente che calibrato e gli vengono aggiunte informazioni sulla geolocalizzazione e su una classificazione preliminare dei pixel (land/water/cloud masks).
- L2: Vengono corretti gli effetti geofisici dovuti per esempio alla non esatta sfericità della terra, non omogenea distribuzione della massa del globo terrestre. Inoltre, vengono suddivisi i dati per le applicazioni terrestri da quelle marine.

- L3: Vengono chiamate "Gridded observation". La loro caratteristica è l'organizzazione del dato su una griglia, utile per l'applicazione di algoritmi di intelligenza artificiale. Il prodotto è composto dall'unione di tutti i passaggi compiuti dal satellite, quindi si utilizzano più orbite per generare una singola immagine.
- L4: Anche detto "Gridded model output", è una tipologia di dato estremamente elaborata. In funzione del parametro da derivare vengono applicati modelli matematici diversi che possono essere anche semi-empirici.

I database descritti nel capitolo 2.4, tranne qualche eccezione (Aeolus e SMOS) forniscono gratuitamente il dato solo con il livello di elaborazione L1 e L2. In aggiunta a quanto sopra descritto, è possibile approfondire la natura del dato L2. In particolare, può essere ulteriormente classificato in:

- OGDR (operational) : è disponibile con una latenza di 3-5 ore. Si tratta di un prodotto non convalidato che utilizza le orbite calcolate dal Navigatore DORIS di bordo (DIODE) e che non contiene tutte le correzioni ambientali/geofisiche.
- IGDR (Interim): è disponibile con una latenza inferiore a 1,5 giorni. Si noti che questo non è un prodotto completamente convalidato, sebbene utilizzi un'orbita preliminare e include tutte le correzioni ambientali/geofisiche (preliminari per alcune di esse)
- GDR (geophysical data record): è un prodotto completamente convalidato che utilizza un'orbita precisa e le migliori correzioni ambientali/geofisiche. Questo prodotto è disponibile per ciclo ripetuto con una latenza di 40 giorni.

Ogni missione satellitare ha una strumentazione diversa, e anche i dati generati sono diversi. L'unica proprietà che rimane invariata è il modo di impacchettamento e gestione del dato, in quanto standard. La loro formattazione segue uno dei principali standard scientifici ossia, i dati sono forniti tramite file in formato NetCDF. Esso ha le seguenti caratteristiche [27]:

1. Autodescrittivo: contiene tutte le informazioni sui dati al suo interno,
2. Portable: la sua visione è compatibile con device differenti,
3. Scalabile: il dato nella sua interezza è facilmente frammentabile e il sottoinsieme che ne deriva risulta leggibile,
4. Estendibile: possono essere aggiunte ulteriori porzioni di dati alla struttura base senza dover ricreare l'intero pacchetto,

5. Condivisibile: il dato può essere letto e modificato da più utenti contemporaneamente,
6. Archiviabile: i software che leggono il dato mantengono la retrocompatibilità con le versioni precedenti, ovvero il dato sarà sempre leggibile, indipendentemente dalla versione utilizzata.

In particolare, i dati raccolti dalle missioni sentinel sono di altissimo interesse scientifico e con il più alto grado di innovazione tecnologica. Al fine di poter identificare nel dettaglio le informazioni contenute nei pacchetti in formato NetCDF, è possibile utilizzare una libreria dedicata di Matlab.

Detto ciò, oltre alle informazioni comuni a tutte le missioni satellitari, ovvero longitudine, latitudine, numero orbite e flag di varia natura, sono presenti per il Sentinel 1 i seguenti parametri:

- Ampiezza dell'eco di ritorno in polarizzazione VV e VH,
- Intensità dell'eco di ritorno in polarizzazione VV e VH

I segnali sono raccolti su tredici bande diverse che coprono la parte dello spettro elettromagnetico che va dal visibile all'infrarosso.

Il Sentinel 3 ha a bordo più di un payload scientifico: OLCI, SLSTR e Radar altimetro. Ognuno di questi presenta dati misurati diversi.

- OLCI L1: I prodotti includono misurazioni radiometriche Top-Of-Atmosphere (TOA) in 21 bande spettrali (400–1020 nm), corrette radiometricamente, calibrate e caratterizzate spettralmente. Sono orto-geolocalizzati (coordinate di latitudine e longitudine, altitudine) e contengono posizione e puntamento, punti di riferimento e classificazione preliminare dei pixel.
- OLCI L2: I prodotti sono costituiti da quantità geofisiche derivate dal prodotto L1. Le informazioni marine e terrestri sono generate separatamente.
- SLSTR L1: Sea surface temperature/Land monitoring/fire radiative power
- SLSTR L2: Includono temperature di luminosità e TOA Radiances orto-geolocalizzate e ricampionate sulla griglia del prodotto.
- Radar altimetro L1: Prodotti per bande Ku e C a 20 Hz corretti dagli effetti strumentali.
- Radar altimetro L2: Parametri delle bande Ku e C a 1 Hz e 20 Hz che ritracciano le stime dell'oceano aperto, zone costiere e ghiaccio marino, corretto per gli effetti geofisici. Sono presenti Sea surface Heights, Significant wave height, Sea surface wind speed, tides height.

Il Sentinel 6 ha una strumentazione molto specifica per il monitoraggio degli oceani. Il servizio di condivisione dei dati satellitari classifica ulteriormente i dati in funzione della loro criticità, rispetto al tempo trascorso dall'acquisizione dell'immagine alla disponibilità effettiva dell'utente.

- Near Real Time: Il dato viene fornito entro tre ore dall'acquisizione del dato,
- Short Time Critical: Il dato viene reso disponibile entro le 12-24 ore,
- Non critical Time: Il dato può essere inserito nel database entro 21 giorni dopo l'acquisizione del dato.

Si ha la possibilità di sviscerare nel dettaglio le missioni satellitari Sentinel 3 e 6 e trovare i seguenti parametri all'interno del file NetCDF:

SWH_ocean_01_ku: corrected 'ocean' significant waveheight 1 e 20 Hz Ku-C band.
 swh_ocean_rms_01_ku: rms del SWH
 ssha_01_ku: sea surface height anomaly (sea surface height above sea level)
 wind_speed_mod_u_01: U component of the model wind vector
 wind_speed_mod_v_01: V component of the model wind vector
 sig0_ocean_01_ku: backscatter coefficient

Tabella 2.2: Sentinel 3 Radar Altimetro

| | |
|-------------------------------|------------------------------|
| LST: Land surface temperature | SST: Sea surface temperature |
|-------------------------------|------------------------------|

Tabella 2.3: Sentinel 3 SLSTR

swh_ocean: corrected ocean significant wave height
 swh_ocean_rms: standard deviation of the ocean significant waveheight
 ssha: sea_surface_height_above_sea_level
 wind_speed_mod_u: U component of the model wind vector (eastward wind_speed)
 wind_speed_mod_v: V component of the model wind vector (northward wind_speed)
 sig0_ocean: corrected ocean backscatter coefficient

Tabella 2.4: Sentinel 6 Poseidon 4

In calce alla tesi, nella sezione appendici, è presente una tabella riassuntiva sui data products di tutti i satelliti descritti nella sezione 2.4.

Capitolo 3

Metodi e tools

3.1 Workflow

La prima fase del lavoro di tesi è una analisi bibliografica delle possibili missioni satellitari in grado di fornire dati di nostro interesse, ovvero dati riguardanti lo stato del mare e del vento al di sopra. Questo comporta la necessità di dover selezionare un numero ristretto di satelliti. Per un'analisi preliminare di fattibilità sull'uso dei metadata satellitari, la disponibilità nell'avere una maggiore quantità di dati e molteplicità del dato stesso, dato che abbiamo a disposizione più satelliti, deve essere analizzata nel dettaglio al fine di minimizzare il calcolo computazionale, mantenendo i requisiti spazio-temporali accettabili. A tal proposito, sono stati analizzate le missioni satellitari in base al loro valore di revisit time e di risoluzione spaziale. Il Revisit time è la frequenza di osservazione di una data porzione di terra. Scelta la costellazione di riferimento, si procede con l'acquisizione dei dati di interesse. I principali parametri da considerare per la scelta delle missioni satellitari da selezionare sono i seguenti:

1. Risoluzione spaziale della strumentazione a bordo;
2. Revisit time alla latitudine di Pantelleria;
3. Disponibilità di dati accessibili a tutti, gratuiti e modificabili;
4. Disponibilità di un software dedicato per l'analisi dei dati della missione.

La ricerca ha adottato il seguente approccio:

1. Acquisizione e analisi delle immagini SAR del Sentinel 1, in particolare il calcolo dell'intensità e direzione del vento partendo dal Coefficiente di retro-diffusione,

2. Acquisizione e analisi delle immagini ottiche del Sentinel 2, in particolare il calcolo della batimetria partendo dalle informazioni combinate delle 13 bande dello spettro elettromagnetico,
3. Confronto tra i parametri precedentemente ricavati con i dati misurati dal radar altimetro della missione Sentinel 3 e dal metodo matematico ERA5.

Il processo integrale può essere descritto come segue:

1. Analisi bibliografica: Studio di tutte le missioni attive per l'osservazione terrestre al fine di ottenere un database contenente l'insieme delle missioni satellitari con la strumentazione utile alle misurazioni oceaniche (SAR, Camera multispettrale e Radar altimetro);
2. Analisi della risoluzione temporale, anche chiamata revisit time, al fine di selezionare la missione satellitare più performante. L'analisi viene svolta con il software STK (System Tool Kit), in grado di combinare le diverse missioni satellitari;
3. Acquisizione dati: Download dei dati satellitari attraverso l'utilizzo di piattaforme per la diffusione dei dati satellitari, in particolare sono state acquisite immagini SAR per la derivazione del campo di velocità, immagini ottiche per la derivazione della batimetria e dati più elaborati del radar altimetro;
4. Analisi delle immagini SAR in ambiente SNAP (SeNtinel Application Platform), Software dedicato alle analisi di immagini delle missioni satellitari Sentinel, in particolare del Sentinel 1, 2, 3. Tramite le funzionalità e i plug-in all'interno di SNAP è possibile applicare filtri e calcolare nuove variabili;
5. Analisi delle immagini ottiche su SNAP per il calcolo della stima della batimetria, ovvero la morfologia del fondale marino, correlando le bande nel range del visibile con l'infrarosso;
6. Acquisizione dati ERA5 e Sentinel 3, in particolare l'intensità e direzione del vento e l'altezza significativa delle onde;
7. Confronto tra le diverse metodologie, ossia tra i parametri derivati e quelli misurati.

3.2 Analisi Bibliografica delle missioni satellitari

L'introduzione sui satelliti e sulle principali missioni satellitari per il monitoraggio degli oceani è stata illustrata nel capitolo 2.3. Con questo paragrafo si vuole approfondire le caratteristiche dei satelliti andando a schematizzare i fattori chiave per la possibile selezione.

Tali caratteristiche sono le seguenti:

- Risoluzione spaziale,
- Revisit time,
- Policy sui dati.

Le caratteristiche dei satelliti sono mostrate nella tabella 3.1:

| Satellite | Strumentazione | Risoluzione Spaziale [m] | Revisit time [giorni] | Data Policy |
|------------|----------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------|
| Sentinel 1 | SAR | 20 | 6 | Open data |
| Sentinel 2 | MSI | 60 | 5 | Open data |
| Sentinel 3 | Altimetro SAR | 300 | 1,5 | Open data |
| Sentinel 6 | POSEIDON 4 | 300 | 9,56 | Open data |
| JASON 2/3 | POSEIDON 3 | 1000 | 8,4 | Open data |
| SARAL | ALTIKA | 2000 | 3,5 | Open data |
| METOP | ASCAT | 1000 | 24,5 | "Essential use" |
| Aeolus | ALADIN | 30000 | 6,46 | Open data |
| SMOS | MIRAS | 50000 | 28,38 | Open data |
| CFOSAT | SWIM/SCA | 25000 | 29,8 | Open data |
| Hai - Yang | Radar alt, SAR | 1100 | 0.43 | "Copyright" |
| RADARSAT | SAR | 100 | 11,75 | Open data |
| OCEANSAT | Camera ottica | 1000 | 1,55 | Open data |

Tabella 3.1: Principali caratteristiche delle missioni satellitari

Si può notare come, ad eccezione della costellazione HaiYang dove i dati sono scaricabili, ma il copyright appartiene al governo cinese, tutte le altre missioni aerospaziali sono accessibili gratuitamente e modificabili. La risoluzione spaziale e quella temporale dei singoli satelliti e variano in funzione dell'orbita e del sensore installato, in particolare abbiamo:

- Fattori che influiscono sulla risoluzione spaziale:
 1. Quota del satellite,
 2. Banda dello spettro EO del sensore,
 3. Modo operativo dello strumento,
 4. Sensore attivo vs sensore passivo.
- Fattori che influiscono sul revisit time:
 1. Quota del satellite,

2. Swadth distance del sensore,
3. Tipologia dell'orbita,
4. Solo puntamento al NADIR oppure puntamento anche nel piano trasversale all'avanzamento del satellite.

Nel prossimo capitolo saranno visualizzate le missioni satellitari attraverso l'uso del Systems Tool Kit STK e verranno analizzati il Revisit time dei singoli satelliti e delle costellazioni possibili, ovvero l'unione di più serie di satelliti appartenenti a missioni satellitari differenti.

3.3 Calcolo dei Revisit time e scelta dei satelliti

Al fine di poter analizzare i vari revisit time, si può adoperare il software "System Tool Kit" dove è possibile gestire analisi di sistemi complessi nell'ambito dell'aeronautica, applicazioni spaziali e altro ancora. STK permette di inserire in un ambiente virtuale multiparametro i satelliti di nostro interesse. Inoltre, è possibile visualizzare sia una vista della terra in tre dimensione che in due dimensioni. La vista 3D è molto importante per avere una visione più chiara ed immediata del comportamento del satellite. La vista 2D è in grado di poter descrivere l'andamento nel tempo dei satelliti attraverso la loro Ground Track, ossia il luogo dei punti dato dall'intersezione del raggio vettore e la superficie terrestre.

All'interno di STK bisogna inserire i seguenti passaggi:

1. Inserire i parametri descrittivi dell'orbita di un satellite.
2. Inserirli nell'apposito box dedicato alla generazioni di satelliti.

I parametri orbitali classici sono i più utilizzati per l'identificazione di un'orbita. Per i satelliti attivi, ovvero che svolgono appieno le loro funzioni scientifiche, è presente un sito [31] con i TLE "two line Element", ovvero una scrittura pensata che raccoglie i dati fondamentali per la caratterizzazione di un'orbita. Come suggerisce il nome, la struttura di un TLE sono due righe suddivise in colonne. La linea zero è formata da 24 caratteri e sono associati al nome completo del satellite nel sistema norad satcat. In particolare STK richiede:

- Semiasse maggiore o periodo orbitale,
- eccentricità e anomalia vera e argomento del perigeo,
- inclinazione e ascensione retta del nodo ascendente.

Un esempio di TLE è il seguente: SENTINEL-3A

| Colonna | Descrizione |
|----------|---|
| 1 | Line Number of Element Data |
| 3 to 7 | Satellite Number |
| 8 | Classification (U=Unclassified) |
| 10 to 11 | International Designator (Last two digits of launch year) |
| 12 to 14 | International Designator (Launch number of the year) |
| 15-17 | International Designator (Piece of the launch) |
| 19-20 | Epoch Year (Last two digits of year) |
| 21-32 | Epoch (Day of the year and fractional portion of the day) |
| 34-43 | First Time Derivative of the Mean Motion |
| 45-52 | Second Time Derivative of Mean Motion (Leading decimal point assumed) |
| 54-61 | BSTAR drag term (Leading decimal point assumed) |
| 63 | Ephemeris type |
| 65-68 | Element number |
| 69 | Checksum (Modulo 10) |
| | (Letters, blanks, periods, plus signs = 0; minus signs = 1) |

Tabella 3.2: Linea uno del TLE (Two Line Element)

| Column | Description |
|---------|---|
| 1 | Line Number of Element Data |
| 3 to 7 | Satellite Number |
| 9 to 16 | Inclination [Degrees] |
| 18-25 | Right Ascension of the Ascending Node [Degrees] |
| 27-33 | Eccentricity (Leading decimal point assumed) |
| 35-42 | Argument of Perigee [Degrees] |
| 44-51 | Mean Anomaly [Degrees] |
| 53-63 | Mean Motion [Revs per day] |
| 64-68 | Revolution number at epoch [Revs] |
| 69 | Checksum (Modulo 10) |

Tabella 3.3: Linea due del TLE (Two Line Element)

- 1 41335U 16011A 22125.14114974 .00000098 00000+0 58332-4 0 9999 2 41335
98.6248 193.0742 0001227 100.6479 259.4839 14.26738261323592

Nell'appendice vengono mostrati i parametri orbitali dei satelliti. Una volta inseriti i satelliti nell'ambiente di STK, bisogna impostare le condizioni per il calcolo del revisit time.

All'interno di questa piattaforma è possibile vedere in real-time il passaggio dei vari satelliti sull'area target e avere un impatto diretto di quelli che sono i parametri orbitali sull'orbita reale. Si può notare come la maggior parte dei satelliti percorre

un'orbita sun-sincrona, quasi polare ed inclinata di circa 98° [fig. 3.1]. Le missioni satellitari che comprendono una serie di satelliti sono state identificate su STK come costellazioni.

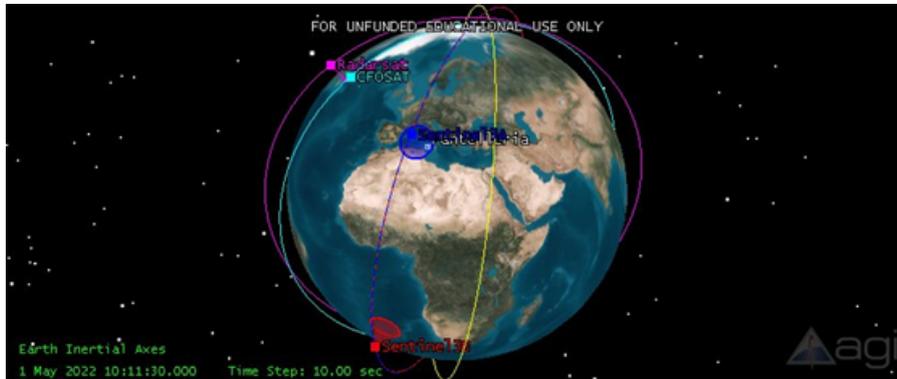


Figura 3.1: Orbite satellitari in STK

Il diagramma sottostante [fig. 3.2] mostra le principali tappe da seguire per il calcolo del revisit time.

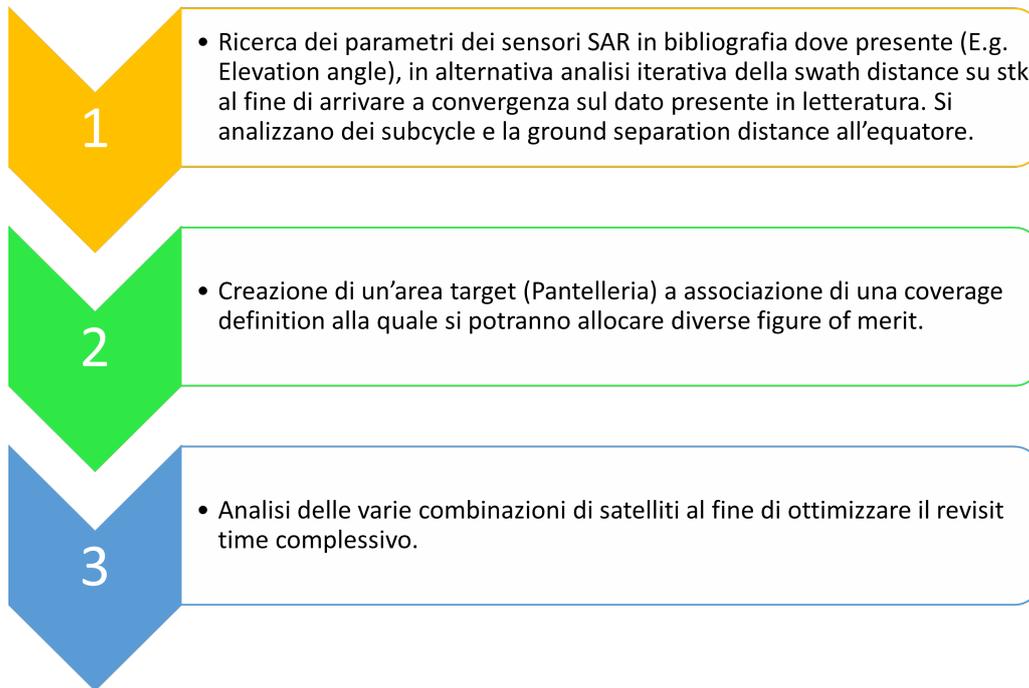


Figura 3.2: Workflow per l'analisi del revisit time su STK

Dopo avere caratterizzato le orbite di tutte le missioni satellitari coinvolte, bisogna ricercare le caratteristiche della strumentazione a bordo dei diversi satelliti,

in particolare quelle proprietà che influiscono sulla porzione di terra illuminata con una singola immagine (Possibilità di rotazione dell'antenna, tipologia di sensore, quota, Elevation Angle). Per un singolo satellite questi parametri determinano la bontà del revisit time. Infatti, un satellite a circa 800 km di quota su un'orbita sun-sincrona, polare ed inclinata di circa 98° ha un revisit time di circa un mese, giorno più giorno meno. Questo è facilmente calcolabile sapendo il periodo di una singola orbita e lo sfasamento temporale con la velocità di rotazione della terra. Se inseriamo un'ulteriore variabile, lo steering dell'antenna, possiamo, in funzione del grado di rotazione dell'antenna e della banda utilizzata, diminuire di molto il revisit time, anche fino a pochi giorni. Ovviamente, anche l'innovazione tecnologica della strumentazione a bordo dei satelliti ha permesso un miglioramento delle performance, per esempio il Sentinel 6 ha equipaggiato il POSEIDON 4, ovvero la quarta versione del POSEIDON. Nel caso non fossero presenti tutti i dati necessari alla caratterizzazione della sensoristica del satellite, si rende necessario andare ad impostare dei valori iniziali di guess sui parametri mancanti (Elevation angle e) e con questi valori andare a calcolare la ground separation distance all'equatore. Questa è un parametro che tiene conto della maggiore distanza monodimensionale lungo un parallelo, in questo caso l'equatore, tra un'orbita ed un'altra dopo la propagazione di un determinato numero di orbite del satellite. Facendo un matching tra il GSD "Ground separation distance" ottenuto su STK e quello in letteratura, si va ad iterare il processo finché non si raggiunge la convergenza.

La GSD è fortemente correlata alla latitudine della scena osservata. Questo vale anche per il Revisit time. Un'ulteriore variabile è anche la capacità dell'intera infrastruttura che gestisce l'afflusso dei dati delle missioni satellitari di raccogliere, elaborare e distribuire agli utenti finali i dati nel minor tempo possibile in tutte le aree geografiche del pianeta.

Riferimento standard nell'ambito delle missioni satellitari in generale, ed in particolare in quello delle osservazioni terrestri, è il parallelo dell'equatore. Quest'asse, in un sistema di riferimento bidimensionale, viene utilizzato per il calcolo di molti parametri, come standard di confronto per missioni differenti.

Data l'importanza della posizione dell'area osservata, in termini di latitudine, è importante specificare il luogo di interesse della ricerca.

3.3.1 Pantelleria

Al fine di avere un riscontro reale sull'utilizzo a scopo certificativo dei dati satellitari, è importante esaminare un case study. Questo ci permette di eseguire dei confronti tra le varie metodologie per la misurazione delle onde e del vento. Pantelleria [fig. 3.3] è un comune italiano che ricopre l'intera isola omonima, ed è situata nel Mar Mediterraneo tra la costa meridionale della Sicilia e settentrionale della Tunisia, in particolare alla latitudine $36^\circ 49' 44'' 40$ Nord e longitudine $11^\circ 56' 35'' 88$



Figura 3.3: Vista Pantelleria, @ credit <https://www.comunepantelleria.it/gallerie/pantelleria/>

Est . La sua particolare posizione geografica permette ai venti provenienti dall'europa occidentale, in particolare dai flussi provenienti dallo stretto di Gibilterra di arrivare indisturbati fino a Pantelleria, dato che non sono presenti zone continentali o isole nel mezzo. Sebbene l'intensità energetica media dei venti alle latitudini del Mar Mediterraneo non raggiunge i livelli che si hanno nel Mar Baltico, il flusso dei venti su Pantelleria ha un andamento più libero e regolare. Inoltre, proprio l'intensità della velocità del vento non elevata riduce la probabilità di accadimento di eventi estremi che potrebbero danneggiare la strumentazione e le pale eoliche delle wind farm oppure rendere difficile la gestione delle navi ancorate nei porti. Il sito di Pantelleria è stato scelto in quanto è una località caratterizzata da un'elevata risorsa energetica ondosa e ventosa. In particolare, l'assenza di limitazioni geografiche consente alle onde e al vento di mantenere elevata la loro energia. Come molte isole e località costiere, lo sfruttamento del mare come risorsa rinnovabile è vantaggioso e consente la transizione energetica dell'isola abbattendo i consumi di carburanti fossili.

Nota la posizione geografica alla quale bisogna calcolare il revisit time dei vari satelliti e combinazioni di missioni satellitari, si procede su STK a creare il seguente setting:

1. Creazione di un'area target di 1 km x 1 km, con coordinate geografiche nel centro dell'isola di Pantelleria,

2. Generazione di una Coverage definition da associare all'area target, che da ora in avanti chiameremo "Pantelleria",
3. Allocazione alla coverage definition di una o più Figure of Merit, ovvero il Revisit time, Simple coverage, etc.

La creazione dell'area target consiste in un passaggio molto semplice. Nell'apposito box bisogna indicare le coordinate del punto centrale dove verrà creata l'area e l'indicazione della forma da creare, in questo caso un rettangolo.

Successivamente, viene generata la coverage definition, che altro non è che una griglia di punti fitta a piacere, dove verranno calcolate le figure of merit associate. Nel nostro caso in esame, ovvero Pantelleria, la granularità della griglia è stata definita in modo tale che almeno un singolo punto della griglia si sovrapponesse alla boa che misura le condizioni dello stato del mare vicino la costa di Pantelleria. Inoltre, è utile avere dei punti di griglia non troppo distanti tra di loro e questo comporta un maggiore numero minimo dei punti di griglia, ergo uno sforzo computazionale maggiore.

Come ultimo step bisogna generare la figure of merit e associarla alla coverage definition. La figure of merit è il Revisit time. Deve essere caratterizzata come segue:

1. Indicare la finestra temporale all'interno della quale vengono registrate le orbite,
2. Nella window della coverage definition bisogna indicare quale satellite sarà utilizzato per il calcolo del revisit time.

Il calcolo del revisit time è stato effettuato per ogni singolo satellite, serie di satelliti della stessa missione satellitare e alle seguenti combinazioni di satelliti aventi strumentazione affine:

- Sentinel 3 A + Sentinel 3 B + Sentinel 6,
- Sentinel 3 A + Sentinel 3 B + Jason 2 + Jason 3,
- HaiYang serie 1 + HaiYang serie 2,
- Sentinel 3 A + Sentinel 3 B + Sentinel 2
- SARAL + Aeolus + SMOS

Si può notare come i revisit time maggiori sono associati ai singoli satelliti aventi strumentazione non in grado di ruotare l'antenna del sensore, ovvero con il puntamento del sensore solo al NADIR. Con l'aggiunta del satellite gemello, per le missioni composte da due satelliti sullo stesso piano orbitale, ma con uno sfasamento, si ottiene un dimezzamento del revisit time, in quanto si hanno più

| Satellite | Revisit time ufficiale [Giorni] | Revisit time STK [Giorni] |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Sentinel 1 A - C | 6 | 5,86 |
| Sentinel 2 A - B | 5 | 4,75 |
| Sentinel 3 A | 4 | 3,52 |
| Sentinel 3 B | 3 | 2,54 |
| Sentinel 6 | 10 | 9,56 |
| Jason 2 | 10 | 12,35 |
| Jason 3 | 10 | 8,97 |
| SMOS | 30 | 28,38 |
| Aeolus | 7 | 6,46 |
| SARAL | 4 | 3,51 |
| METOP B | 29 | 28,38 |
| METOP C | 29 | 26,44 |
| CFOSAT | 30 | 29,8 |
| Radarsat | 12 | 11,75 |
| Oceansat | 2 | 1,55 |
| Hai - Yang 2 A - B - C - D | 3 | 2,44 |

Tabella 3.4: Revisit time associato alle singole missioni satellitari

| Costellazione | Revisit time ufficiale | Revisit time STK [giorni] |
|--------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Sentinel 3 A + 3B | minore di 2 giorni | 1,54 |
| Jason 2 + Jason 3 | N/A | 8,37 |
| Sentinel 3 A + 3B + 6 | N/A | 1,36 |
| Sentinel 3 A +3B + Jason 2 e 3 | N/A | 1,54 |
| Hai - Yang serie 1 | minore di 2 giorni | 1,06 |
| Hai - Yang serie 2 | minore di 1 giorno | 0,67 |
| Hai - Yang serie 1 + serie 2 | N/A | 0,43 |
| Metop B + C | N/A | 24,39 |
| SARAL + AEOLUS + SMOS | N/A | 3,49 |

Tabella 3.5: Revisit time associato alla combinazione di diverse missioni satellitari

passaggi sopra la stessa area geografica nello stesso arco temporale. Da queste considerazioni, si può dedurre che le seguenti caratteristiche migliorano il revisit time, a parità di tipologia di orbita alla quale il satellite è inserito:

- Presenza di steering dell'antenna del sensore,
- Presenza di più satelliti sullo stesso piano orbitale, sfasati opportunamente.

Dal risultato dell'analisi del revisit time relativo alle combinazioni di missioni satellitari differenti se ne deduce che non sempre conviene accoppiare determinate

missioni satellitari, infatti non tutte le missioni satellitari se combinate tra di loro apportano un miglioramento del revisit time rispetto a quello dei singoli satelliti. Visti tali risultati e facendo un'analisi di correlazione con i parametri orbitali dei satelliti, ovvero l'orbita stessa, si può affermare che:

- Più satelliti sullo stesso piano orbitale apportano un miglioramento netto del revisit time,
- Più i piani orbitali, dunque le orbite dei satelliti, differiscono tra di loro e più il miglioramento del revisit time viene a mancare.

Inoltre, come riportato nella tabella 3.2, in letteratura non sono presenti valori di revisit time associati all'utilizzo di più missioni satellitari differenti come una unica costellazione, al fine di avere più immagini della stessa porzione di terra nello stesso arco temporale.

I satelliti sentinel risultano i migliori satelliti con accesso gratuito e senza copyright, sia dal punto di vista del revisit time che della risoluzione spaziale.

Anche se con l'unione dei sentinel con altre missioni satellitari si riesce a migliorare il revisit time, questo comporta una complicazione nella gestione dei dati satellitari da dover utilizzare, in quanto bisogna omogeneizzare i dati, che in questa prima analisi di fattibilità non viene compensata.

Queste considerazioni hanno portato alla selezione delle seguenti missioni satellitari:

- Sentinel 1, avente il SAR, per la derivazione del campo di velocità del vento (intensità e direzione);
- Sentinel 2, avente il MSI, per il calcolo della batimetria;
- Sentinel 3, avente il Radar altimetro, per la misurazione dell'intensità della velocità del vento e dell'altezza significativa delle onde come dato L2.

Selezionate le missioni satellitari di interesse per la ricerca, si rende necessario al fine di poter utilizzare i dati stessi, l'acquisizione dei dati dalle relative piattaforme che si basano sul database della missione satellitare "Copernicus". Nella sezione seguente verrà dettagliato il processo di download dei dati.

3.4 Processo di acquisizione dati satellitari

L'acquisizione dei dati è uno step fondamentale della ricerca. In primis bisogna capirne l'utilizzo specifico all'interno del progetto di ricerca, in quanto va a plasmare i requisiti dell'analisi. Queste considerazioni ci portano alle seguenti affermazioni:

- Poche immagini sono sufficienti per una prima analisi di performance del metodo, in quanto si deve testarne inizialmente il metodo.

- La valutazione statistica dei parametri può essere svolta su un arco temporale minimo che varia in funzione delle missioni satellitari scelte, in particolare del revisit time. Con i satelliti della missione Sentinel la finestra temporale minima è di 3 mesi mentre quella adoperata è di 5 mesi con una possibilità di estensione oltre a i due anni.

Da qui possiamo dedurre che non c'è la necessità di avere un flusso continuo di dati o comunque un database ampio da dover gestire. Questo ci permette di:

- Optare per la modalità di download dei dati manuale, ovvero attraverso l'utilizzo di un'interfaccia grafica interattiva tra utente e servizio, in poche parole una GUI "Graphics User Interface",
- Lavorare con una quantità limitata di dati, ergo di poter gestire tutto il processo su un laptop e non doversi affidare ad un sistema di storage dati di tipo cloud.

Per completezza di informazione, è utile introdurre l'altro metodo di gestione dati, ovvero l'utilizzo delle API insieme a sistemi di storage dei dati su server "cloud". Questo metodo sfrutta dei canali di comunicazione tra il database che contiene i dati di interesse con il server di storage temporaneo dei dati, attraverso le API. Queste sono simili come funzionamento a delle antenne che trasmettono un segnale; in questo caso delle richieste di raggiungimento di una porzione specifica del database. Una volta stabilito il collegamento, avverrà il download sul cloud. Questo metodo è molto utile quando si devono gestire grosse quantità di dati e con una frequenza di aggiornamento del dato elevata.

Rispetto al metodo selezionato per l'analisi di fattibilità, dato che le missioni satellitari selezionate appartengono tutte al programma copernicus, e in particolare ai satelliti sentinel, è possibile utilizzare Open Access Hub: GUI dedicata ai satelliti Sentinel.

La GUI si presenta con un layout molto snello e semplice da capire. In primis, l'interfaccia grafica mostra la superficie 2D, dove sarà possibile indicare l'area di interesse da scaricare. Questo è molto utile, perchè ci permette di andare ad eseguire un'azione di filtraggio delle orbite compiute dai satelliti. Così facendo, possiamo ottenere, de facto, solo le orbite che intersecano l'area delimitata su un certo arco temporale definito.

L'area di ricerca di nostro interesse è l'isola di Pantelleria.

Dalla barra di ricerca dove è possibile applicare i seguenti filtri:

1. Scegliere la missione satellitare,
2. Scegliere la finestra temporale,
3. Scartare determinate orbite,

4. Scegliere il tipo di prodotto, ovvero lo strumento di interesse,
5. Scegliere il modo operativo del sensore,
6. Scegliere il livello del data product.

É possibile avere ulteriori informazioni riguardanti i prodotti rilevati, dunque eseguire una analisi di selezione delle immagini [fig. 3.4] , andando a scegliere l'orbita di interesse. La seguente figura mostra un'anteprima dell'immagine scaricabile:

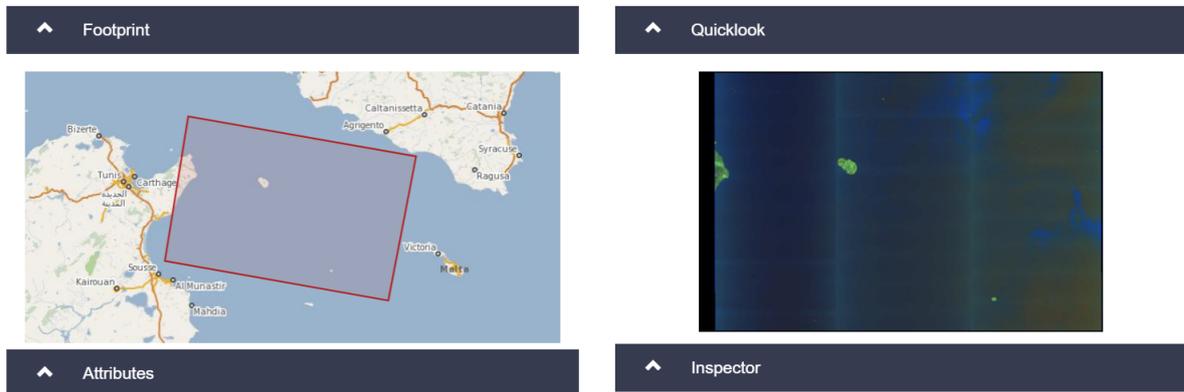


Figura 3.4: Anteprima dell'immagine, credit <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Ai fini dell'analisi, sono stati scaricati una serie temporale di circa 5 mesi del SAR del Sentinel 1, Radar altimetro del Sentinel 3, mentre è stata utilizzata una singola immagine del OLCI del sentinel 3 e del MSI del sentinel 2 per l'analisi della batimetria, in quanto presenta tempi variazionali molto lunghi, ovvero i cambiamenti legati alla morfologia del fondale marino sono dell'ordine dei millenni.

In funzione della tipologia di sensore scelto, il dato singolo occupa una dimensione diversa, in particolare:

- Radar altimetro S3: 20 - 50 MByte,
- OLCI S3: 400 - 600 MByte,
- SAR S1: 700 1400 Mbyte,
- MSI S2: 500 - 1000 Mbyte.

Già solo un'analisi con una serie temporale di cinque mesi comporta un effort per quanto riguarda lo storage dei dati abbastanza oneroso, in quanto si devono scaricare circa 30 GByte di dati, solo per il SAR e l'altimetro.

3.5 Analisi delle immagini SAR su SNAP

Ottenuti i dati di nostro interesse, al fine di poter derivare le informazioni utili ai fini della ricerca, bisogna poter visualizzare in modo efficace ed efficiente il dato. Sono presenti svariati toolbox e software in grado di gestire il metadato satellitare, come per esempio QGIS, ArcGIS, Matlab e Python. Inoltre, per alcune missioni satellitari, comprese i Sentinel, hanno a supporto dell'utente che deve effettuare analisi di immagini, dei software dedicati alle loro singole missioni. Per quanto riguarda i satelliti Sentinel ed in particolare per i sentinel 1,2,3 è stato reso disponibile dal programma copernicus un toolbox dedicato chiamato SNAP, "SeNtinel Application Platform".

3.5.1 Introduzione SNAP

SeNtinel Application Platform è un toolbox creato dall'ESA all'interno del programma Copernicus dedicato alla visualizzazione, modifica e analisi delle immagini dei Sentinel 1,2,3. Inoltre, è compatibile con altre missioni satellitari, che adoperano le camere multispettrali ottiche e i SAR. Le caratteristiche principali della piattaforma SNAP sono le seguenti [32]:

- Architettura compatibile con gli altri toolbox dell'ESA,
- Possibilità di creare grafi, ovvero una catena di azioni personalizzata,
- Capacità avanzata nella gestione e sovrapposizione di diversi layer su una stessa immagine,
- Applicazioni di filtri molto accurati, come l'eliminazione del rumore o l'ortorettifica.
- Possibilità di creare nuove bande usando espressioni matematiche.

3.5.2 Pre - Processing delle immagini SAR

Noto l'ambiente "SNAP", è importante specificare lo scopo specifico di questa sezione. Possiamo definirlo andando ad identificare la missione satellitare, la strumentazione, la tipologia di dato scelta e le informazioni da dover ricavare con SNAP.

| Satellite | Instrument | Data products | Parametri da ricavare |
|----------------|------------|---------------|---------------------------------|
| Sentinel 1 A,C | SAR | GRD IW L1 | Intensità e direzione del vento |

Tabella 3.6: contesto iniziale, dato di partenza vs informazione utile

Al fine di poter ottenere il campo di velocità intorno alla costa dell'isola di pantelleria ed in particolare vicino ai siti di installazione delle boe atte a misurare lo stato del mare, bisogna seguire i seguenti step all'interno del toolbox SNAP:

1. Importare il pacchetto/ i pacchetti dati su SNAP,
2. Pre-processing delle immagini, al fine di ottenere gli input puliti e corretti per la successiva fase,
3. Stima dell'intensità e direzione del vento.

Il daato contiene:

- annotazione, file che riportano delle note aggiuntive relative ai metodi di calibrazione;
- misure, visualizzazione grafica del parametro misurato;
- anteprima, file contenente il collegamento al product preview;
- supporto, schemi in formato xml di supporto all'uso del dato satellitare;
- file pdf di convalida del dato;
- manifest.safe contenente le informazioni che servono a SNAP per la lettura del dato satellitare.

L'import del dato su SNAP viene semplicemente ottenuto eseguendo un drag and drop del singolo file manifest.safe all'interno dell'ambiente SNAP.

Dopo aver importato correttamente il dato con un livello di elaborazione L1, è possibile, in funzione della tipologia di immagine importata, visualizzare determinate bande e loro combinazioni. Per quanto riguarda le immagini SAR [34], dove le bande presenti sono le seguenti:

- Amplitude VH, Intensity VH, Amplitude VV, Intensity VV.

Si ha la possibilità di visualizzare le singole bande ma anche combinazioni di esse nel formato rgb oppure a falsi colori, che per quanto riguarda i dati SAR sono [fig. 3.5]:

- Dual pol ratio intensity VV+VH, ossia l'utilizzo dell'intensità VV come banda Rossa, L'intensità VH come banda verde e il rapporto tra le due intensità (VV/VH) come banda blu;
- Daul pol multiple intensity VV+VH, la banda rossa e verde sono analoghe al formato precedente, mentre la banda blu è definita dalla moltiplicazione delle intensità VV e VH;

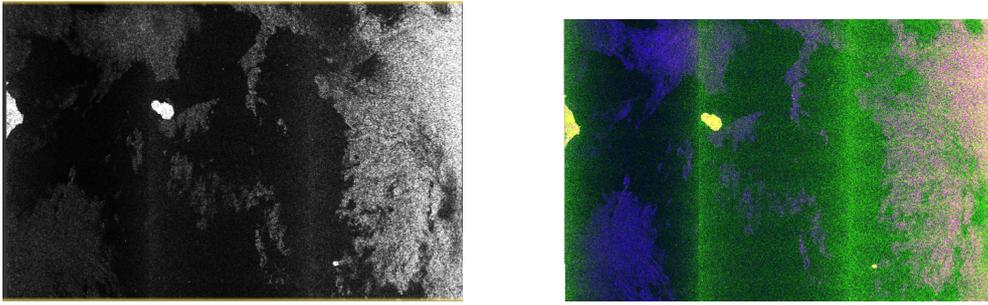


Figura 3.5: Intensità del segnale in singola banda VV a sinistra, Dual pol ratio intensity VV+VH a destra

- Dual pol difference intensity VV+VH, quest'ultima ha come banda blu la differenza tra le intensità VV e VH.

Come già precedentemente introdotto, l'immagine con il suo livello di elaborazione attuale (L1) non permette la buona riuscita di un'applicazione del metodo semi-empirico che derivi l'intensità e la direzione del vento. Infatti, bisogna applicare dei filtri che puliscano l'immagine, ovvero tolgano gli artefatti e lascino soltanto i pixel contenenti un valore appropriato per la variabile scelta. Dopodiché al fine di applicare il metodo semi-empirico la variabile di input deve essere il coefficiente di retrodiffusione, meglio conosciuto come backscatter coefficient. De facto bisogna calcolare anche questo parametro prima di poter ottenere le informazioni sul vento. Tutte queste operazioni compongono la fase di pre-processing dell'immagine.

Trattandosi di un'immagine SAR, bisogna adottare il seguente processo di pre-processing standard, come esplicitato nel corso tenuto dal Latvian Technology in Space [35]:

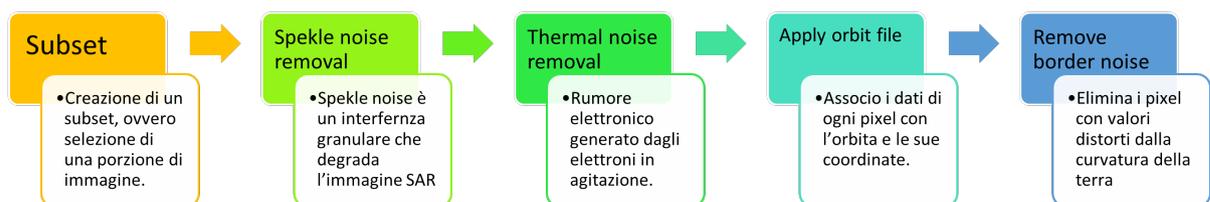


Figura 3.6: Workflow del pre-processing dell'immagine SAR

La generazione di un subset, ovvero della selezione di una porzione di area ristretta dell'immagine ci permette di avere un focus sul sito di interesse, in quanto l'area coperta dall'intera scena ripresa dal SAR è troppo grande ai fini dell'analisi. Inoltre, riducendo la dimensione dell'immagine andremo a ridurre notevolmente lo sforzo computazionale necessario per il calcolo dell'intensità e direzione del vento che verrà applicato.

All'interno dell'ambiente SNAP, per ottenere un subset bisogna cliccare su:

1. Raster e poi su subset e qui selezionare l'area di interesse attraverso le coordinate geografiche oppure il numero identificativo dei pixel.

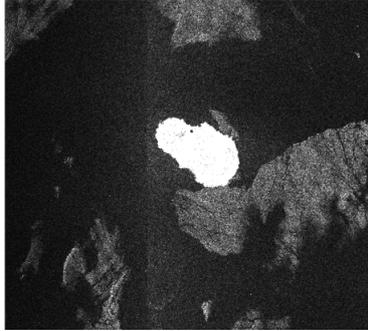


Figura 3.7: Subset dell'immagine SAR di Pantelleria

L'immagine ridotta [fig. 3.7] mantiene lo stesso livello di risoluzione spaziale del file originale.

Prima di poter calcolare l'intensità e direzione del vento, dobbiamo applicare dei filtri che rimuovano il rumore di speckle. Questa tipologia di rumore è interferometrica granulare ed è presente in ogni immagine generata da un radar, e ovviamente anche dal synthetic aperture radar. Le macchie sono causate dall'interferenza costruttiva e distruttiva casuale delle onde di ritorno sfasate ma coerenti sparse dagli scatter elementari all'interno di ciascuna cella di risoluzione. In questa prima fase stiamo valutando una singola immagine SAR, ergo possiamo applicare il seguente filtro:

- Single product speckle filter [fig. 3.8].

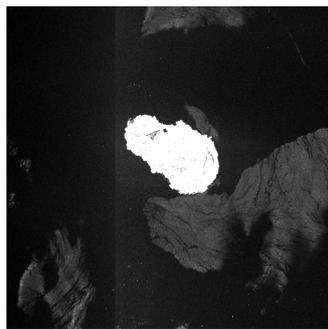


Figura 3.8: Immagine SAR Pantelleria senza speckle noise

Questo filtro applica un approccio spaziale, ovvero crea un'immagine andando a variare i valori dei pixel con delle medie dei valori dei pixel adiacenti al pixel target dell'immagine originale.

Successivamente si dovrà ridurre quanto più possibile il rumore termico, ovvero il rumore elettronico intrinsecamente presente all'interno dei conduttori in equilibrio, in quanto ci sono elettroni in movimento.

All'interno di SNAP si può ridurre andando a selezionare:

- Radar → radiometric → S1 Thermal noise removal [fig. 3.9]

Il passaggio successivo alla rimozione del rumore termico è quello di andare ad identificare ed eliminare i pixel deformati dalla curvatura terrestre.

All'interno dell'ambiente SNAP è possibile applicare tale filtro nel seguente modo:

- Radar → Sentinel 1 TOPS → S1 remove GDR border noise [fig. 3.9]

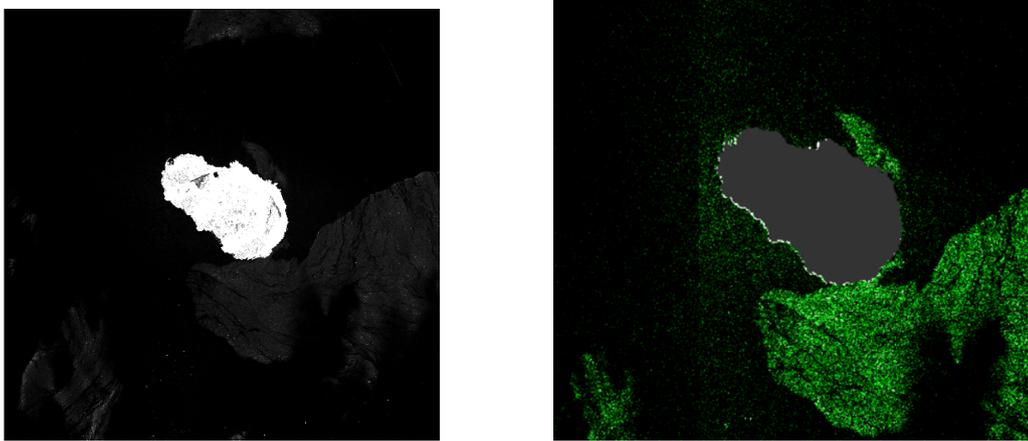


Figura 3.9: Immagine SAR con la rimozione del rumore termico applicata (sinistra) e Immagine SAR Pantelleria a falsi colori alla fine del pre-processing (destra)

3.5.3 Stima del campo di velocità

A questo punto l'immagine è sufficientemente "pulita" per la fase finale, ovvero il calcolo dell'intensità e direzione del vento.

Seguendo il plug-in dedicato, ovvero il Wind field estimation che è utilizzabile seguendo la seguente procedura:

- Radar → SAR applications → Ocean applications → Wind field estimation.

Il Wind field estimation plug-in è composto dalle seguenti operazioni:

Land-Sea Mask è una particolare tipologia di maschera in grado di identificare e classificare i pixel appartenenti al mare e quelli alla terra. Inoltre, in base allo



Figura 3.10: Workflow wind field estimation

scopo finale è possibile eliminare i pixel appartenenti alla terra o al mare. Nel caso in esame sono stati eliminati, ovvero resi neri i pixel appartenenti alla terra "Land".

Il passaggio della Calibrazione è uno dei passaggi più importanti per la buona riuscita del metodo semi-empirico utilizzato per la derivazione dell'intensità e direzione del vento. Questo passaggio ci permette di ottenere il coefficiente di retrodiffusione, ovvero il backscatter coefficient [33].

Da notare, come la polarizzazione VV sia molto più efficiente nel calcolo del campo di velocità in quanto come già descritto nel capitolo 2.2.2 le superfici piane come l'oceano sono più affini alla polarizzazione verticale.

Seguendo la procedura appena descritta è possibile ottenere una nuova immagine avente la banda relativa all'intensità e la direzione del vento. Da notare, come con questo metodo non è possibile conoscere il verso del vento ma solo la direzione, infatti andando ad aggiungere il layer relativo alle informazioni del vento sull'immagine che visualizza il backscatter coefficient, possiamo notare la presenza di frecce con due punte (direzione ma non verso) ed un valore numerico in metri al secondo.

Se vogliamo ottenere anche informazioni sul verso del vento sarà necessario effettuare una data fusion e integration con i dati presi dall'ERA5. Così facendo si può fare un confronto tra i due dati e selezionare il verso giusto, cosa che non si può sapere se si ha a disposizione solo il dato ricavato con l'immagine satellitare del Sentinel 1 SAR.

Il campo di velocità calcolato è il seguente:

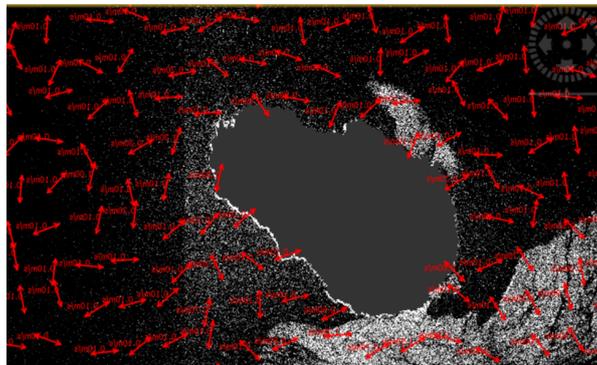


Figura 3.11: Wind field, intensità e direzione del vento di una singola immagine SAR del satellite Sentinel 1

L'andamento dell'intensità e direzione del vento [fig. 3.11] è stato calcolato su una griglia di punti con una distanza relativa di 2 km, ergo l'informazione sul campo di velocità è nota ogni 2 km. Questo valore di risoluzione spaziale del dato è frutto di un processo di iterazione. Il punto di partenza è stata una griglia con punti distanziati di 100m, ma il calcolo per l'ottenimento del campo di velocità veniva interrotto dato che la matrice su cui si basa il metodo stesso risultava singolare. Il processo è stato iterato più volte finché non si è raggiunta la minima risoluzione spaziale che consentisse il calcolo dell'intensità e direzione del vento, ovvero 2 km.

Una volta aver testato l'efficacia del metodo su una singola immagine SAR, è possibile eseguire una analisi temporale, ovvero su una serie di immagini sfalsate nel tempo della stessa porzione di terra, nel caso in esame è Pantelleria.

Serie Temporale

L'analisi su una serie temporale di immagini ci permette di quantificare paramaetri di tipo statistico, quali il:

- Valore massimo dell'intensità del vento ogni 2 km,
- Valore minimo dell'intensità del vento ogni 2 km,
- Media dell'intensità del vento ogni 2 km,
- Deviazione standard "STD" dell'intensità del vento ogni 2 km.

Come arco temporale di ricerca, dato l'elevato peso delle singole immagini, è stato scelto un periodo di 5 mesi, più precisamente da febbraio 2022 a giugno 2022, ovvero 15 immagini, dato che in base all'angolazione, alcune immagini sono state scartate.

In primis bisogna scaricare ed importare le immagini, ripercorrendo i passaggi descritti nella sezione 3.5.1. A questo punto bisogna effettuare per ogni singola immagine, il relativo pre-processing, ovvero l'applicazione dei filtri per togliere il thermal noise, spekle noise, etc.. come descritto nella sezione 3.5.2.

L'attivazione delle singole azioni di filtraggio, al fine di ottenere l'immagine pronta per le fasi successive del metodo, se fatta manualmente, come adoperato per una singola immagine, renderebbe i tempi di preprocessing estremamente lunghi e ripetitivi.

Per questo motivo, SNAP è in grado di generare dei grafi, ovvero un sistema architetturale in grado di collegare le singole azioni di filtraggio ed eseguirle una consecutivamente all'altra.

A tale scopo è stato costruito il seguente grafo [fig. 3.12] contenente:

1. Generazione del Subset di interesse,
2. Riduzione del spekle noise,

3. Riduzione del thermal noise,
4. Applicazione delle informazioni dell'orbita sui pixel dell'immagine,
5. Eliminazione dei pixel del bordo

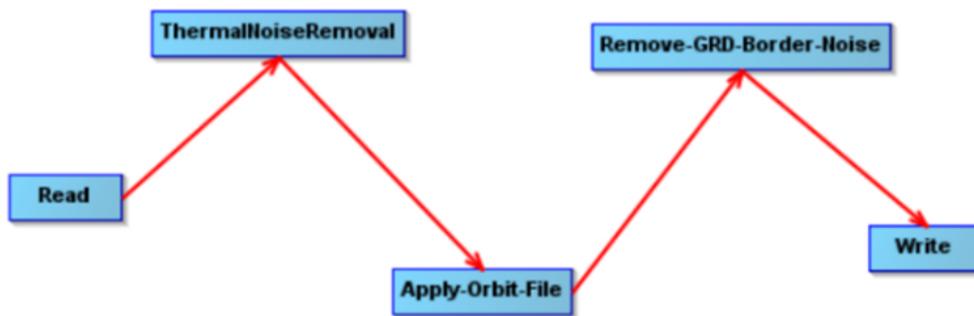


Figura 3.12: Grafo per il pre-processing in SNAP

Il grafo si può generare nel seguente modo:

- Graph builder, con il tasto destro si apre una finestra con i filtri applicabili e tramite l'interfaccia grafica è possibile collegare i blocchi con le frecce di collegamento.

A questo punto, non basta aver generato il proprio grafo personalizzato, ma bisogna applicarlo in un unico step all'intero dataset.

Per fare ciò è possibile andare all'interno del Batch mode, ove c'è la possibilità di inserire più di un immagine tramite il tasto plus, oppure insert all open products. Dopodichè basterà indicare il grafo da dover applicare all'intero dataset e farne eseguire il calcolo.

Una volta ottenute le immagini "pulite", si deve procedere al calcolo del campo del vento (intensità e direzione). Questo passaggio viene effettuato sempre con la modalità batch, ovvero si inseriscono tutte le immagini pulite e ad esse si applica il grafo predefinito relativo alla stima del campo di velocità del vento, ovvero il Wind Field Estimation graph.

Analisi statistica

A questo punto abbiamo un totale di quindici immagini aventi una singola banda contenente i valori del backscatter coefficient e un layer contenente i risultati della stima dell'intensità e direzione del vento [fig. 3.13, 3.14, 3.15].

Su SNAP la procedura per poter correlare le informazioni da un punto di vista temporale è la seguente:

1. Creare un singolo prodotto avente 15 bande, ovvero ogni singola banda di ogni singola immagine viene estratta e collocata in un unico prodotto.
2. Applicare delle funzioni che prendono le diverse bande di un singolo prodotto e ne calcolano i parametri statistici usando il backscatter coefficient, ovvero massimo, minimo, media e deviazione standard,
3. Con queste nuove bande è possibile attraverso il batch mode, andare a ricalcolare il campo di velocità del vento, inserendo il grafo dedicato.

I risultati dell'analisi statistica sulla serie temporale sono i seguenti:

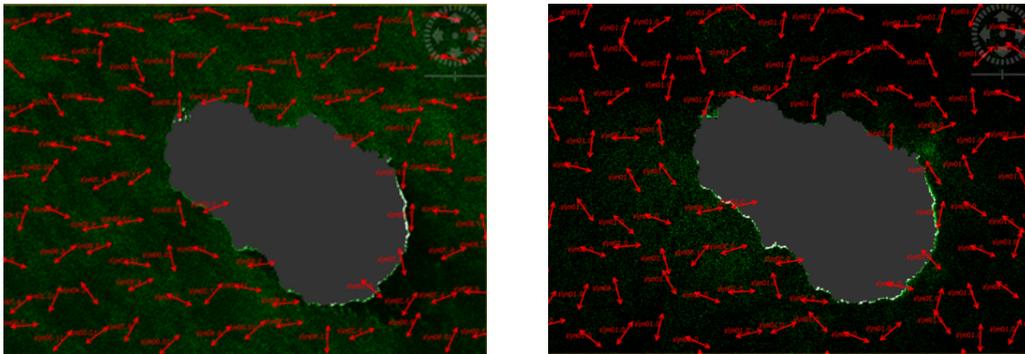


Figura 3.13: Massimo (sinistra) e Minimo (destra) temporale del campo di velocità del vento

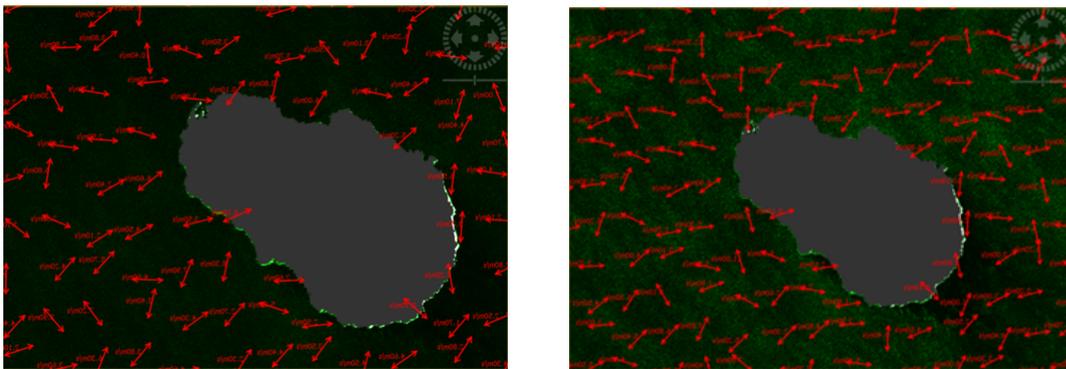


Figura 3.14: Media (sinistra) e Deviazione standard (destra) temporale del campo di velocità del vento

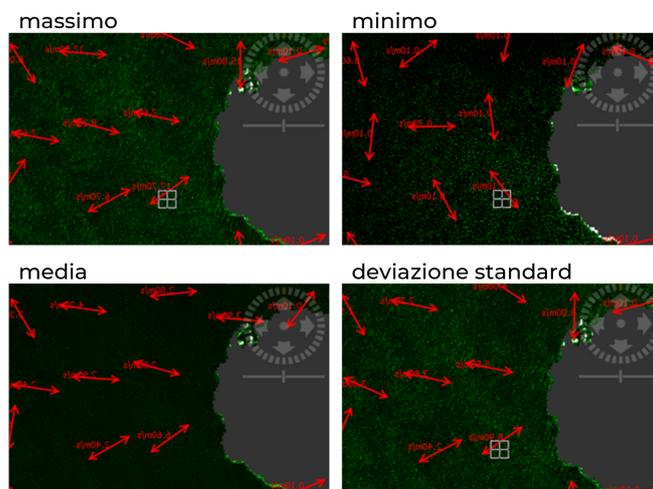


Figura 3.15: Dettaglio del sito di localazione delle boe di misurazione dello stato del mare

3.6 Analisi delle immagini ottiche su SNAP

Le immagini ottiche vengono spesso utilizzate per l'identificazione e la classificazione della flora sia terrestre che marina, come le diverse tipologie di arbusti e di vegetazione oppure la presenza di diverse tipologie di alghe. Questo è possibile grazie alla capacità dello strumento di captare la luce riflessa del sole nelle bande del visibile ma anche nell'infrarosso. La combinazione e la creazione di diversi indici, attraverso formule matematiche, permette di suddividere e classificare la diversa tipologia di flora. Oltre a questo utilizzo, è possibile attraverso operazioni di derivazione, ottenere informazioni sulla Batimetria, ovvero sul livello di profondità del fondale marino, sfruttando i dati contenuti nei pixel dell'immagine ottica.

La missione satellitare scelta è la seguente:

- Sentinel 2, MSI.

Come già descritto nel capitolo 2.3.1 lo strumento MSI (Multispettral instrument) è in grado di raccogliere il segnale su 13 bande, dal visibile all'infrarosso.

Il download del pacchetto dei dati è analogo alla missione satellitare sentinel 1, ergo si eseguono gli stessi step. L'unica eccezione è la seguente:

- Il livello di nuvole che copre l'immagine ottica: è un parametro fondamentale per una buona analisi della batimetria. Infatti, sulla piattaforma Open Access Hub è possibile filtrare le immagini con il loro livello di copertura delle nuvole, ovvero selezionare solo le immagini aventi una loro porzione coperta dalle nuvole molto ridotta.

Il pacchetto dei dati contiene i seguenti file:

- AUX DATA, file di supporto alla visualizzazione del dato;
- Datastrip, informazioni sulla qualità radiometrica e geometrica;
- Granule, contenitore delle immagini;
- HTML, immagini a corredo pubblicate online;
- Rep info, descrive la struttura fisica del pacchetto dati;
- Manifest.safe, file da importare su SNAP per visualizzare l'immagine.

Anche per quanto riguarda i primi passi con il software SNAP si rimanda alla descrizione nel capitolo 3.5.1.

A questo punto è possibile visualizzare le bande "rgb" singolarmente e anche la banda nell'infrarosso [fig. 3.16].

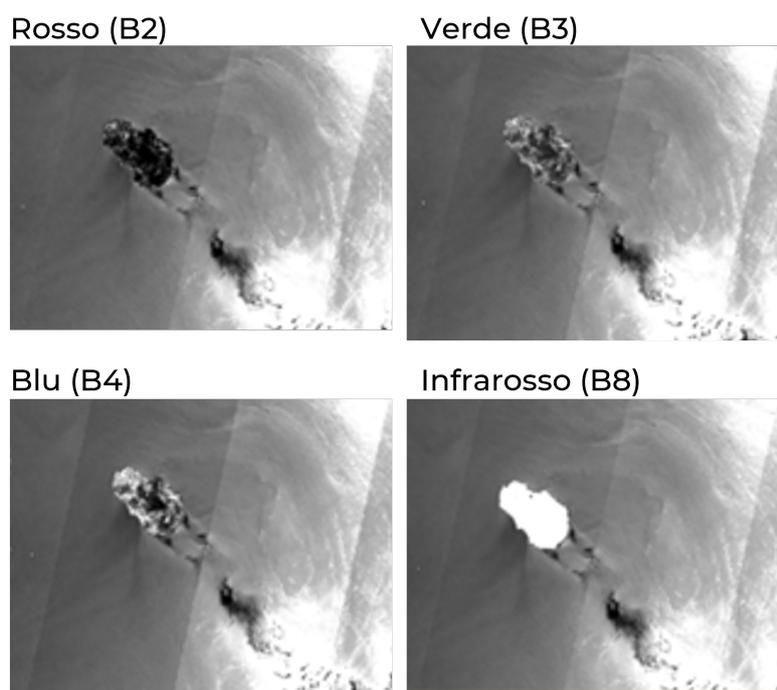


Figura 3.16: Bande R,G,B e Infrarosso del sensore MSI del Sentinel 2

Anche con il MSI del Sentinel 2 l'immagine avente un grado di elaborazione pari a L1, deve subire delle azioni di filtraggio e di adattamento dell'immagine al fine di poter ottenere le informazioni relative alla batimetria.

Preprocessing MSI Sentinel 2

Come descritto sul sito ufficiale [36] ma anche nel capitolo 2.3.1 le diverse bande, usate per campionare il segnale della luce riflessa dal sole, presentano a seconda della banda stessa una risoluzione spaziale differente.

I principali step da seguire per ottenere la batimetria intorno all'isola di Pantelleria sono i seguenti:

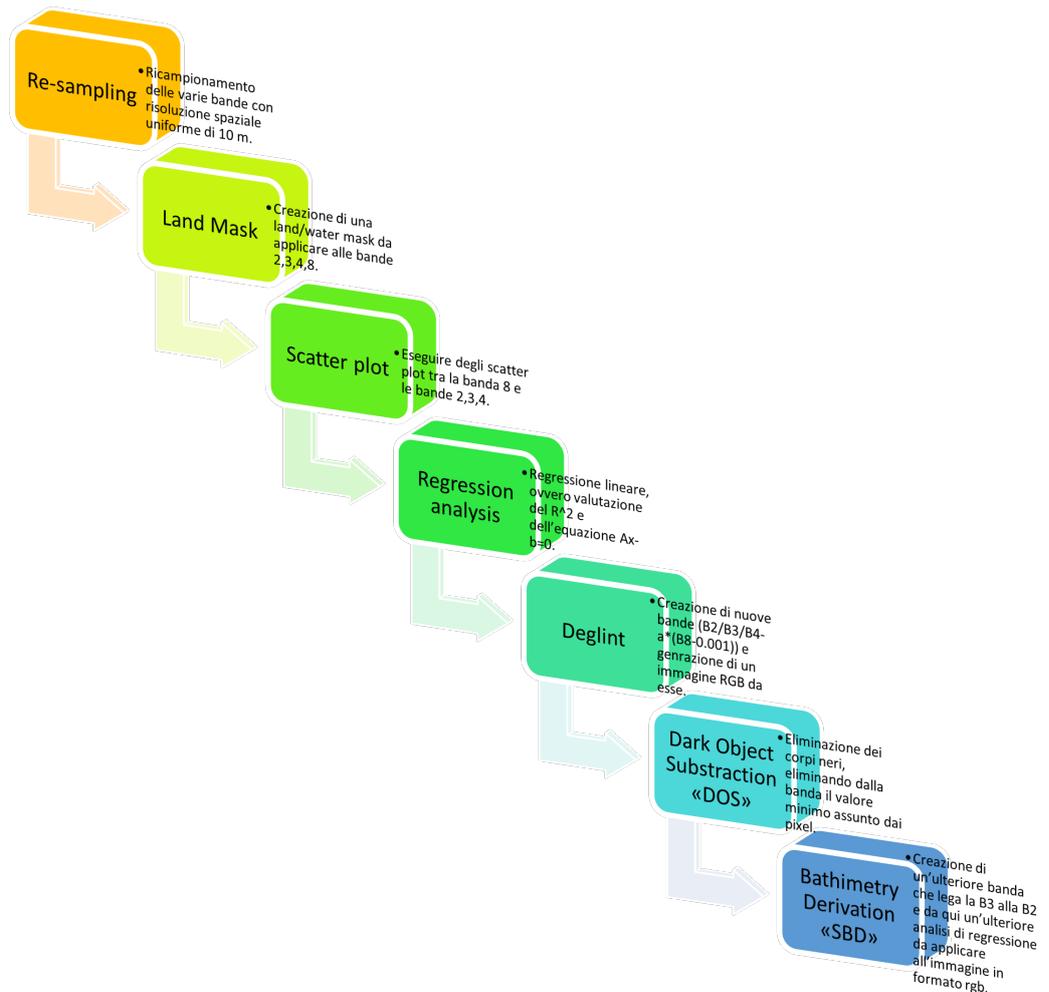


Figura 3.17: WorkFlow Batimetria

Al fine di avere un dato omogeneo per tutte le immagini sulle diverse bande, bisogna eseguire la seguente azione:

- Re - Sampling: Si creano nuove immagini attraverso un nuovo campionamento dei dati al fine di ottenere dei dati omogenei aventi una risoluzione spaziale di 10 metri.

Il processo di ri-campionamento [fig. 3.18] delle immagini sfrutta il seguente metodo:

- NN, Nearest Neighbor, ovvero attraverso la media dei valori dei pixel vicini al pixel da calibrare, vado a ricalcolarne il valore stesso. Inoltre, al fine di migliorarne la risoluzione spaziale è possibile sfruttare le informazioni di overlapping.

Il risultato del processo di re - sampling è il seguente:

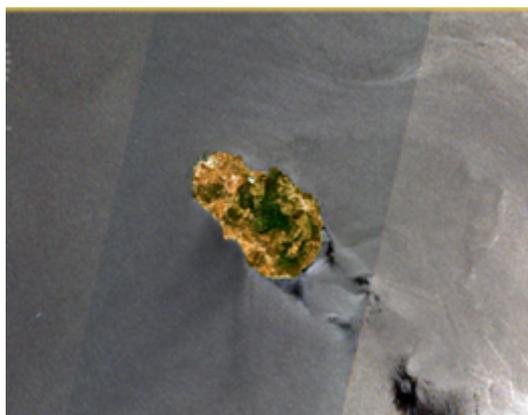


Figura 3.18: Immagine RGB di Pantelleria dopo il re-sampling

Dopo aver ottenuto delle immagini aventi una risoluzione spaziale uniforme, è necessario andare a creare una maschera che elimini la porzione di Land "Terra" all'interno dell'immagine.

Questo è cruciale per le fasi successive del calcolo della batimetria, in quanto dovranno essere eseguite delle analisi comparative tra le varie bande, ergo la presenza di pixel relativi alla Land o non appartenenti al mare comporterebbero un'andamento ed un comportamento dei valori assunti dai pixel errato.

Al fine di ottenere delle immagini senza land [fig. 3.19] si procede nel seguente modo:

1. Creazione di una nuova banda che sfrutta l'elevato contrasto che è presente nella banda 8, ovvero l'infrarosso, tra i pixel associati alla Land e quelli associati al Water,
2. Dopodichè si fondono la banda 2,3,4 che ricordo essere le bande, rispettivamente, del blu, del verde e del rosso con la banda della maschera Land/Water.

Dopo avere ottenuto le nuove bande B2,B3,B4, rispettivamente blu,verde e rosso a formare lo standard RGB, è possibile selezionare delle aree ristrette dell'immagine, ovvero scegliere un numero non troppo elevato di pixel. Con questi pixel, si va ad eseguire il seguente diagramma:

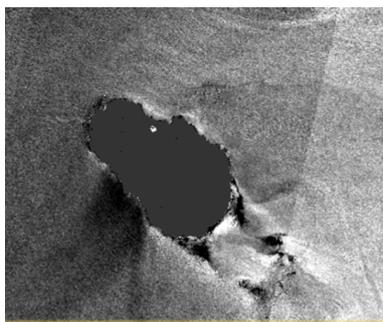


Figura 3.19: Banda B2 "Blu" con la maschera Land/Water

- Scatter plot [fig. 3.20]: Un grafico in grado di diagrammare i valori dei pixel di bande differenti, nel caso in esame, sono stati eseguiti tre scatter plot, aventi tutti e tre, la banda B8 "Infrarosso" sull'asse delle ascisse, e le bande 2,3,4 sulle ordinate.

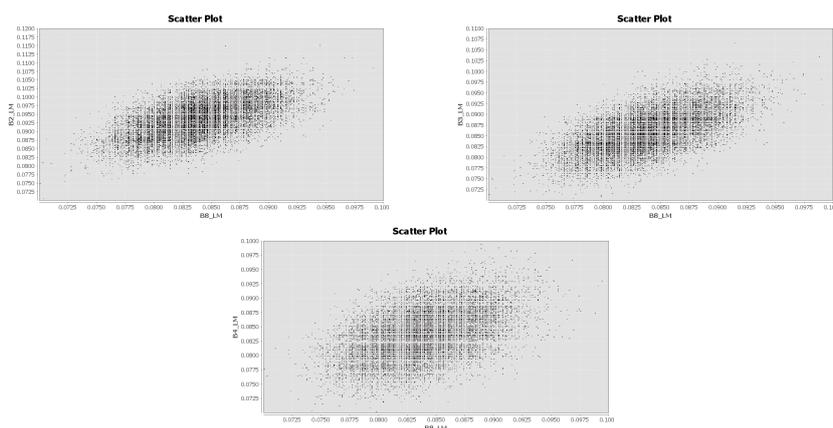


Figura 3.20: Scatter plot relativo alle bande B2 (rosso), B3 (verde) e B4 (blu)

Partendo da questi grafici è possibile andare ad eseguire una analisi di regressione di tipo lineare. Gli Output di questa analisi sono i seguenti:

- Equazione lineare del tipo $Ax - b = 0$,
- Parametro di correlazione tra le due variabili, ovvero R elevato al quadrato.

Nel caso in esame gli output sono i seguenti:

- Banda B2:
 1. Equazione lineare: $1.0024*x + 0.0072$,
 2. R quadro: 0.76

- Banda B3:
 1. Equazione lineare: $0.875 * x + 0.0136$,
 2. R quadro: 0.71
- Banda B4:
 1. Equazione lineare: $1.0426 * x - 0.002$,
 2. R quadro: 0.86

Questi parametri, legati da aspetti di correlazione tra le variabili, sono fondamentali per la generazione di nuove bande da dover utilizzare per derivare la batimetria.

Infatti, noti i valori di R quadro e l'equazione lineare, è possibile creare delle nuove bande da poter utilizzare come input per la derivazione della batimetria.

La generazione delle nuove bande segue la seguente formulazione matematica: Equazione che definisce la nuova banda:

$$B2_{new} : B2 - a2 * (B8 - b2) \quad (3.1)$$

$$B3_{new} : B3 - a3 * (B8 - b3) \quad (3.2)$$

$$B4_{new} : B4 - a4 * (B8 - b4) \quad (3.3)$$

Questa procedura, anche detta Deglint, ci permette di eliminare le parti più luminose dell'immagine [fig. 3.21].

L'immagine costruita partendo dalle nuove bande, anche dette deglint, è la seguente:

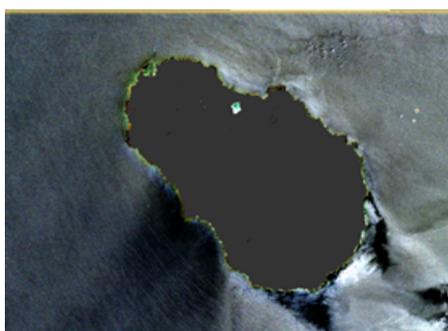


Figura 3.21: Immagine RGB con le nuove bande deglint B2,B3,B4

Partendo dalle immagini delle nuove bande del blu, verde e rosso, al fine di migliorare la resa del calcolo di derivazione della batimetria, ovvero della profondità del fondale marino, bisogna andare ad eliminare i

- Dark Objects.

Gli oggetti scuri devono essere rimossi, in quanto artefatti dell'immagine. In ambiente SNAP questo passaggio, detto anche DOS "Dark Objects Substruction" comprende la creazione di un'ulteriore banda avente la seguente proprietà:

- B2 DOS: $B2 - 0.005$,
- B3 DOS: $B3 - 0.025$,
- B4 DOS: $B4 - 0.030$.

I valori sottratti dalle bande B2,B3,B4 originali derivano dall'analisi dei valori assunti dai pixel dell'immagine, ergo attraverso un istogramma sono stati identificati i valori minimi assunti dai pixel nelle tre bande. Questi valori rappresentano le soglie tra i Dark Objects e gli oggetti luminosi.

Bathimetry Derivation

L'immagine è ora pronta per l'applicazione del calcolo della batimetria [fig. 3.22]. Al fine di derivarne tale proprietà, si sfrutta il rapporto tra la banda B3 e la banda B2, ovvero le differenze nelle intensità dei colori nella banda del blu e del verde [37]. L'equazione applicata sulla nuova banda generata è la seguente:

$$\text{Batimetria} : \log(1000 * B3DOS) / \log(1000 * B2DOS) \quad (3.4)$$

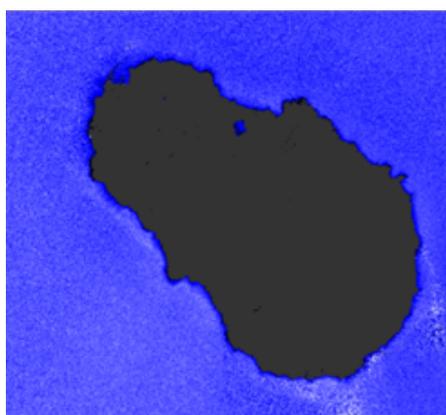


Figura 3.22: Batimetria derivata partendo da un immagine ottica del sentinel 2

3.7 Sentinel 3 radar altimetro L2 data product

Come già anticipato nel capitolo 3.1, il seguente percorso di tesi ha seguito due differenti approcci che si intrecciano nei risultati.

- Il primo è quello di derivare le proprietà di interesse partendo da dati poco elaborati "L1",
- il secondo è la ricerca e l'analisi di dati satellitari di interesse già elaborati "L2".

In questa sezione descriveremo brevemente i dati misurati dalla missione satellitare Sentinel 3, in particolare dal suo sensore radar altimetro.

Come già descritto nella sezione 2.2.3, il radar altimetro è in grado di misurare le seguenti proprietà:

- Intensità e direzione del vento,
- Sea Surface Height, ovvero la differenza tra la quota del satellite, misurata dall'elipsoide di riferimento e il range misurato analizzando i tempi di ritorno del segnale,
- Dynamic topography, ovvero la misura del mean dynamic topography con l'aggiunta del Sea anomaly level,
- Backscatter coefficient.

Il radar altimetro emette degli impulsi ad una determinata frequenza, che varia a seconda del modo operativo impostato, di segnali nello spettro delle microonde, più precisamente nella banda Ku e C. I fronti d'onda sferici, dato che il segnale generato è omnidirezionale, vanno ad impattare sulle creste delle onde nel seguente modo:

- Quando il segnale sta viaggiando nell'atmosfera, va da se che il segnale di ritorno è nullo, più precisamente il segnale di ritorno è molto basso in termini di intensità ed è associato al rumore,
- Quando il segnale incontra le prime creste di un'onda, allora il segnale viene riflesso e captato dall'antenna ricevente, in questo caso il segnale è comunque debole,
- Man mano che il segnale avanza incontrerà sempre più superficie marina in grado di riflettere il segnale, in questo caso si noterà un notevole incremento dell'intensità del segnale ricevuto,

- Ad un certo punto il segnale che giungerà sulla superficie del mare sarà in primis molto debole dato che ha attraversato centinaia di chilometri di atmosfera, ergo si noterà un decremento del segnale ricevuto

Questo andamento del segnale ricevuto, ovvero l'eco di ritorno [fig. 3.23] è descritto dall'ESA e dal RUS copernicus training [38] con la seguente immagine:

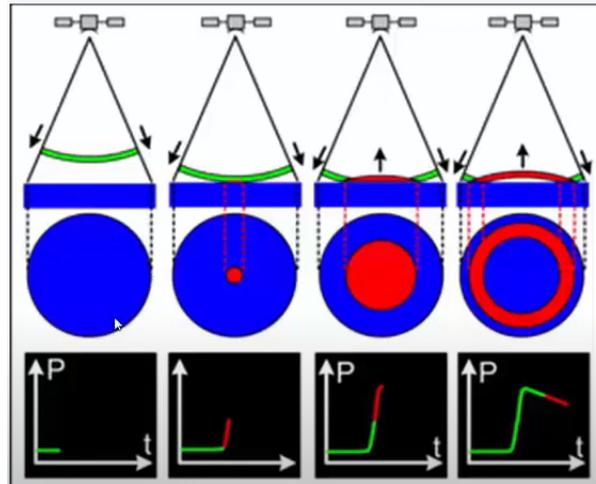


Figura 3.23: Eco di ritorno del segnale in banda Ku e C del radar altimetro del sentinel 3, @credit RUS Copernicus training and ESA

I dati misurati dal radar altimetro del sentinel 3 possono essere visualizzati tramite un toolbox dedicato e gestito da Copernicus, chiamato BRAT.

All'interno dell'ambiente BRAT è possibile visualizzare le informazioni di interesse andando a indicare i seguenti parametri:

- Asse delle X: Inserire il vettore contenente la latitudine campionata in modo differente a seconda della frequenza utilizzata, 1 Hz oppure 20 Hz. Inoltre, cambia al variare della lunghezza d'onda utilizzata, ovvero banda KU o C, ossia Standard mode o Low resolution mode,
- Asse delle Y: Inserire il vettore contenente la longitudine campionata in modo differente a seconda della frequenza utilizzata, 1 Hz oppure 20 Hz. Inoltre, cambia al variare della lunghezza d'onda utilizzata, ovvero banda KU o C, ossia Standard mode o Low resolution mode,
- Asse delle Z: Inserire il vettore del dato scientifico di interesse, nel nostro caso sono la componente u e v della velocità del vento.

3.8 Output di ERA5

ERA5 [39] è un sistema che sfrutta dei modelli matematici per calcolare stime di un gran numero di variabili atmosferiche, oceaniche e terresti con una risoluzione temporale di un ora. La risoluzione spaziale segue una griglia di 30 km x 30 km. Sono in grado di stimare le condizioni atmosferiche, suddividendo lo spazio tridimensionale in 137 strati, partendo dalla superficie fino ad una quota di 80 km. Oltre al dato stimato, contiene anche tutti i livelli di incertezza dei risultati, dovuti al livello di accuratezza dei modelli matematici. ERA5 riesce a generare stime a livello globale, andando a combinare un elevato numero di osservazioni storiche, sfruttando avanzati modelli di assimilazioni dei dati.

In funzione dello scopo della ricerca, è possibile ottenere una varietà enorme di dati, e nel nostro caso i dati di interesse sono i seguenti:

- Componente u e v della velocità del vento a 100 m dalla superficie del mare;
- Componente v della velocità del vento a 10 m dalla superficie del mare;
- Significant wave height.

Si può notare, anche se la risoluzione spaziale non è elevata, come ci sia un grande quantità di parametri ottenibili a differenza delle missioni satellitari dove la strumentazione fornisce pochi parametri e altrettanti pochi sono i parametri derivabili.

I dati di ERA5 [40] sono scaricabili dal web attraverso l'utilizzo di un interfaccia grafica "GUI" dedicata.

Il dato di ERA5 è possibile ottenerlo in formato NetCDF, essendo uno standard di impacchettamento dati. In funzione della tipologia e numero di parametri richiesti durante la compilazione del form, il contenuto del pacchetto dati NetCDF sarà diverso. Nel caso in esame sono stati richiesti i seguenti parametri, al fine di poter effettuare un confronto con l'intensità e direzione del vento ricavate dall'analisi delle immagini del SAR del Sentinel 1 come descritto nel paragrafo 3.5:

1. Velocità del vento in direzione u a 10 metri dal livello del mare,
2. Velocità del vento in direzione u a 100 metri dal livello del mare,
3. Velocità del vento in direzione v a 10 metri dal livello del mare,
4. Velocità del vento in direzione v a 100 metri dal livello del mare,

Capitolo 4

Risultati e Discussione

4.1 Informazioni di contesto

Ricordando lo scopo della tesi, ovvero eseguire un'analisi di fattibilità dell'uso di dati satellitari per la derivazione di informazioni sullo stato del mare e sui venti per un loro uso nelle fasi di design, verifica e certificazione di impianti off-shore e porti; al fine di trarne i risultati e le sue conclusioni, è utile soffermarci sulle seguenti assunzioni:

- La suddetta analisi di fattibilità si pone all'interno di un progetto più ampio, il quale, ha l'obiettivo di ampliare il network di wind farm nei pressi dell'isola di Pantelleria. Questo approccio è molto innovativo, in quanto il dato satellitare sarà utilizzato come base certificativa sia del design dell'impianto off-shore, sia di verifica della locazione dove verrà collocato l'impianto.
- La finestra temporale di circa cinque mesi è frutto di un'ottimizzazione tra il costo in termini di storage e la necessità di avere un livello minimo di copertura temporale.

4.2 Confronto tra dati satellitari e le altre metodologie

Si può notare come il range delle velocità raggiunte nell'area di interesse è compreso tra i 0.10 m/s e i 20 m/s. Ovviamente i valori più elevati, detti di picco sono rari in quanto sia la deviazione standard che la media sono molto distanti dai valori di picco ed hanno rispettivamente un range di 2 - 8 m/s e 2 - 6 m/s.

Invece, le direzioni del vento seguono il corso del flusso aperto che arriva dalle coste della Spagna.

Infine, è possibile valutare la bontà del metodo [fig. 4.1] andando a valutare il grafico di correlazione tra l'intensità della velocità del vento con il backscatter coefficient.

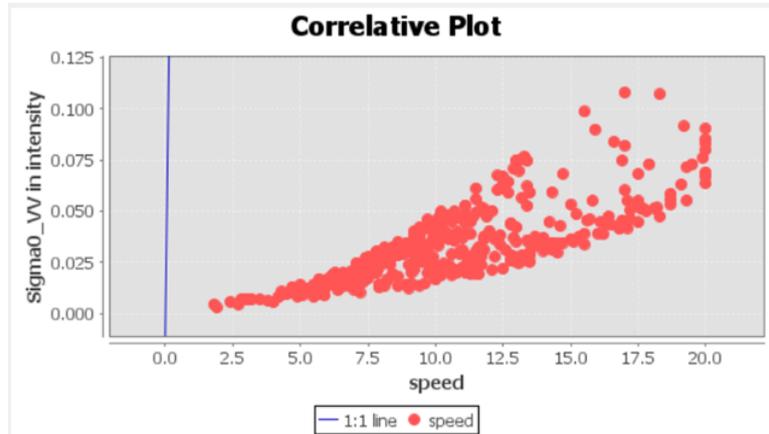


Figura 4.1: Correlative plot wind speed vs back-scatter coefficient

Una analisi più approfondita del correlative plot, ci porta a dire:

- Una buona correlazione di tipo lineare tra l'intensità della velocità del vento con il backscatter coefficient in un range di velocità compreso tra i 2 m/s e i 12.5 m/s,
- Valori maggiori di 12.5 m/s seppur presenti, conoscendo il comportamento storico della velocità del vento nel mediterraneo, sono riconosciuti come valori di picco, ergo meno propabili statisticamente e più rari.

La dimensione della griglia su cui sono stati calcolati l'intensità e la direzione del vento è di 2 X 2 km. Tale risultato è frutto di una dettagliata analisi iterativa che ci ha permesso di osservare che anche se la risoluzione spaziale del dato SAR del Sentinel 1 fosse di 300 m, il calcolo di derivazione del campo di velocità del vento non riesce a raggiungere tali risoluzioni.

Per quanto riguarda la derivazione della batimetria, possiamo affermare come il risultato ottenuto, partendo da un'immagine ottica del sentinel 2 sia accurato per le prime centinaia di metri dalla costa, in quanto i valori sono confrontabili con le misurazioni presenti in letteratura. Questa considerazione, ci porta a dire come l'accuratezza del metodo di derivazione della batimetria è influenzato dal livello di profondità del mare, ovvero basandosi sulle differenze tra la banda del blu e del verde, ossia della colorazione superficiale del mare, va a stimare la profondità del fondale marino.

I dati elaborati, ovvero:

- Radar altimetro del Sentinel 3,

- ERA5.

presentano il loro maggiore vantaggio sottoforma di minore costo computazionale da parte dell'utente e minore tempo di attesa per ottenere l'informazione voluta. Il dato utile è già presente. Tuttavia, il loro maggiore svantaggio è la bassa risoluzione spaziale con il quale il dato viene fornito. Più precisamente le risoluzioni spaziali sono le seguenti:

- Low Resolution Mode del Radar altimetro del Sentinel 3: 50 km,
- ERA5 : 50 x 50 km.

Da un lato però il dato di ERA5 presenta un vantaggio da un punto di vista del campionamento del dato, che è di solo un ora, mentre per quanto riguarda il radar altimetro del sentinel 3 non è presente, in quanto il revisit time è di circa due giorni.

Un confronto tra i vari metodi, per quanto riguarda l'intensità della velocità del vento, è possibile nei seguenti casi:

1.

| | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Immagini del SAR del Sentinel 1 | Standard mode del radar altimetro |
|---------------------------------|-----------------------------------|
2.

| | |
|------|--|
| ERA5 | LRM del radar altimetro del Sentinel 3 |
|------|--|
3.

| | |
|------|-------------------------------------|
| ERA5 | Valore medio del SAR del Sentinel 1 |
|------|-------------------------------------|
4.

| | |
|----------------------|---------------------|
| Valore medio del SAR | LRM radar altimetro |
|----------------------|---------------------|

Per quanto riguarda l'altezza significativa delle onde, il confronto è tra il valore misurato dal radar altimetro del sentinel 3 con i valori calcolati dal metodo matematico ERA5.

Questi confronti sono possibili, dato che presentano una risoluzione spaziale simile, mentre le altre combinazioni non porterebbero ad una conclusione attendibile.

Per quanto riguarda i dati prelevati dal dataset di ERA5, è possibile scaricare il pacchetto del dato ogni ora, ergo non c'è un problema di matching da un punto di vista temporale con le misurazioni satellitari. Tuttavia, se volessimo confrontare le due misurazioni satellitari, dovremmo andare ad eseguire un matching tra i due, ovvero selezionare solo le immagini con un off-set temporale breve l'una dall'altra.

Avendo a disposizione tutti i dati, partendo da quelli scaricabili dalla piattaforma ERA5, passando per quelli stimati attraverso l'uso del software SNAP sulle immagini satellitari SAR del Sentinel 1 arrivando ai dati satellitari già elaborati (L2) forniti dal radar altimetro del Sentinel 3, è stato possibile confrontarli, tenendo conto della loro relativa compliance, attraverso la generazione di due tipologie di diagramma:

- Grafico di confronto relativo ai valori assoluti misurati dai vari metodi utilizzati,

- Diagramma di dispersione, al fine di analizzare gli andamenti nel tempo dei diversi metodi.

Di seguito verranno mostrati i grafici sopracitati:

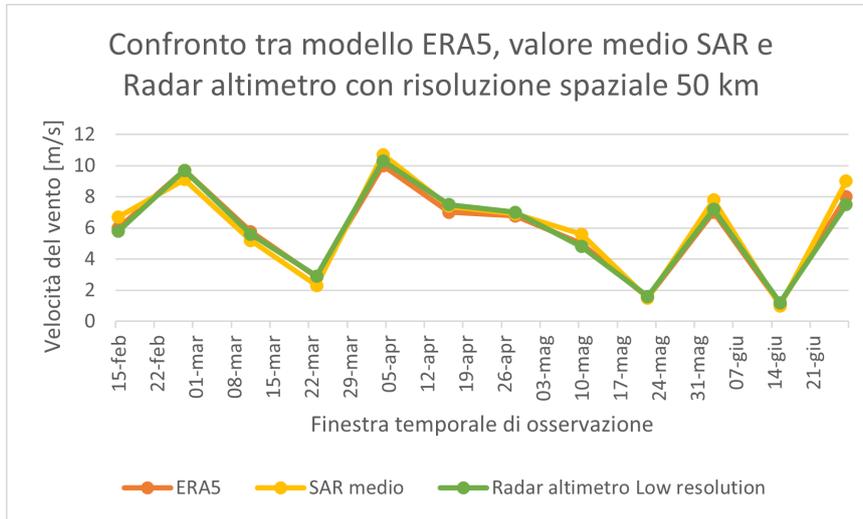


Figura 4.2: Confronto tra modello ERA5, valore mediato derivato da immagini SAR e radar altimetro L2 con risoluzione spaziale di 50 km

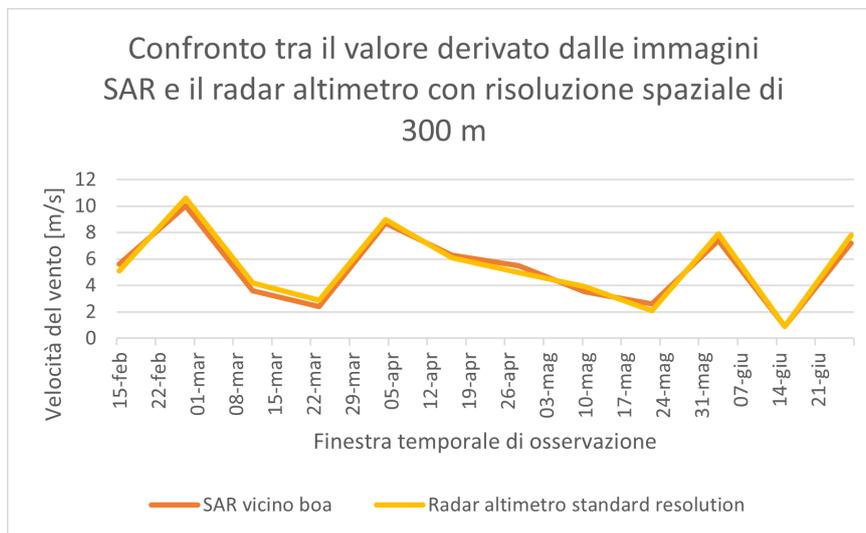


Figura 4.3: Confronto tra valore derivato da immagini SAR nelle coordinate della boa con il radar altimetro avente una risoluzione spaziale di 300 m

Si può notare come i valori dell'intensità del vento derivati dall'analisi delle immagini SAR del sentinel-1 siano pienamente confrontabili con i valori misurati dal radar altimetro del Sentinel-3 e dal metodo matematico ERA5.

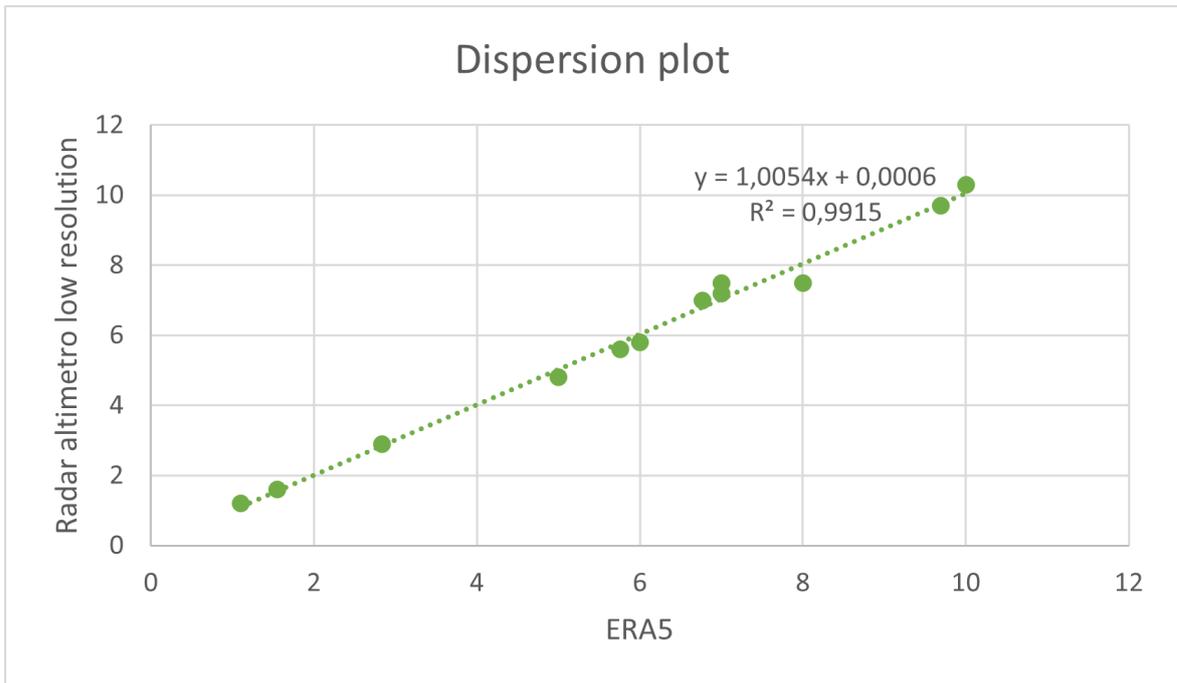


Figura 4.4: Radar altimetro low resolution vs ERA5

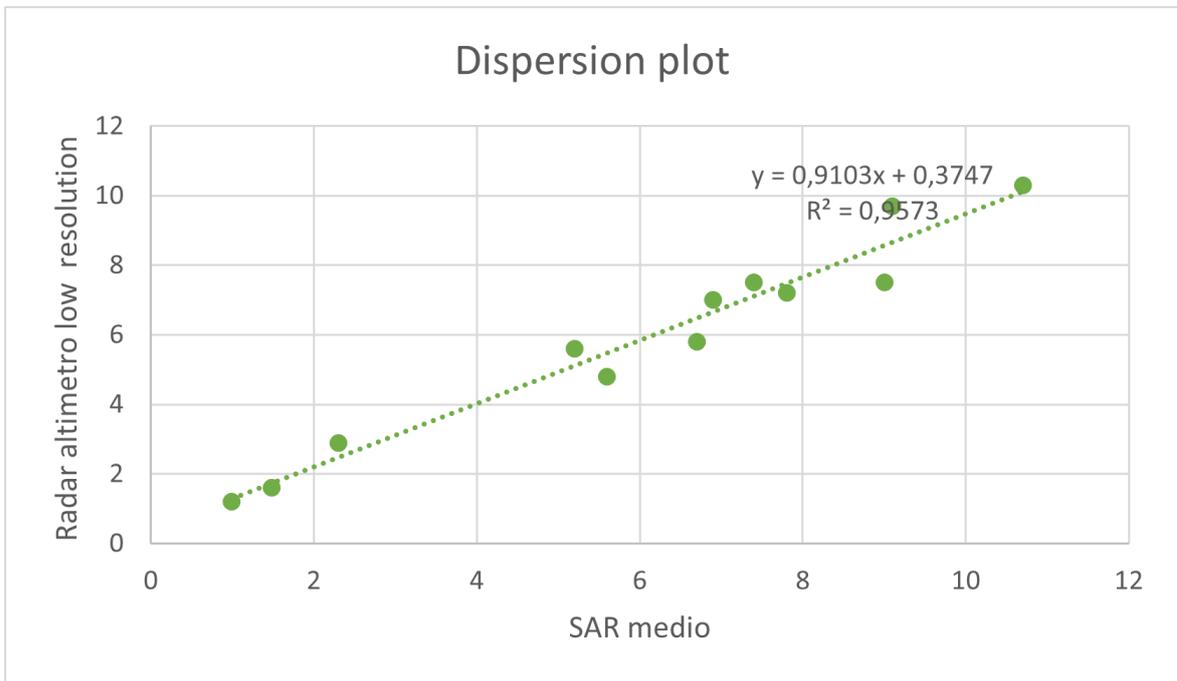


Figura 4.5: Radar altimetro low resolution vs SAR mean value

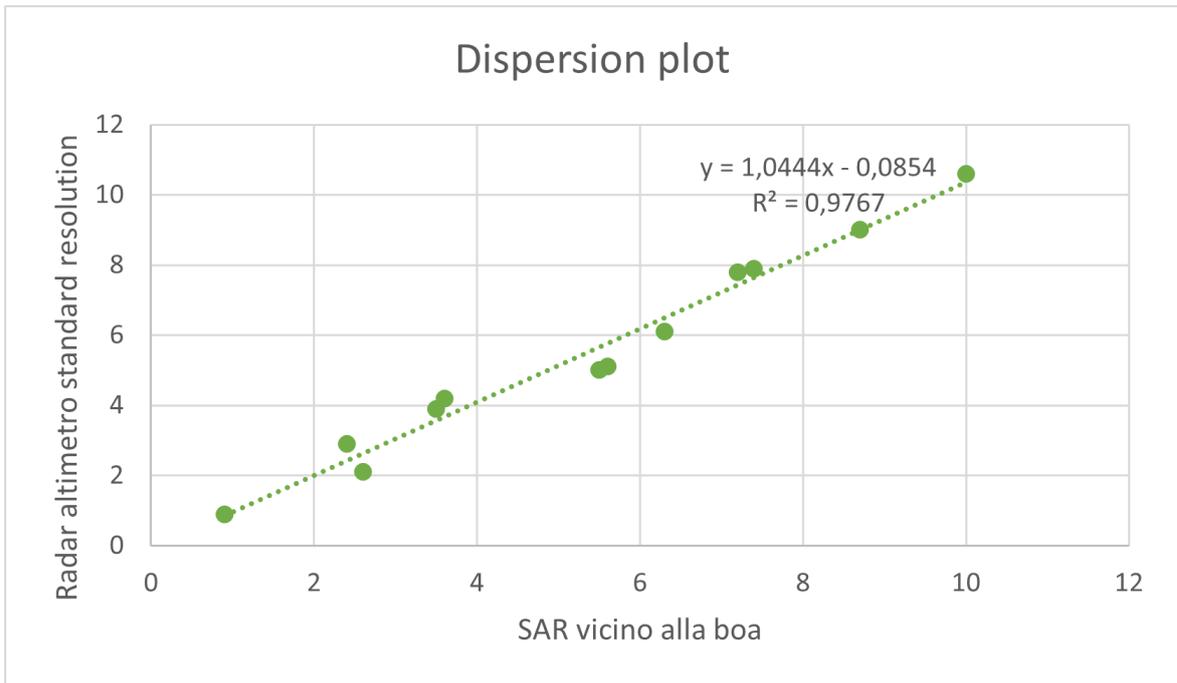


Figura 4.6: Radar altimetro standard resolution vs SAR near buoy

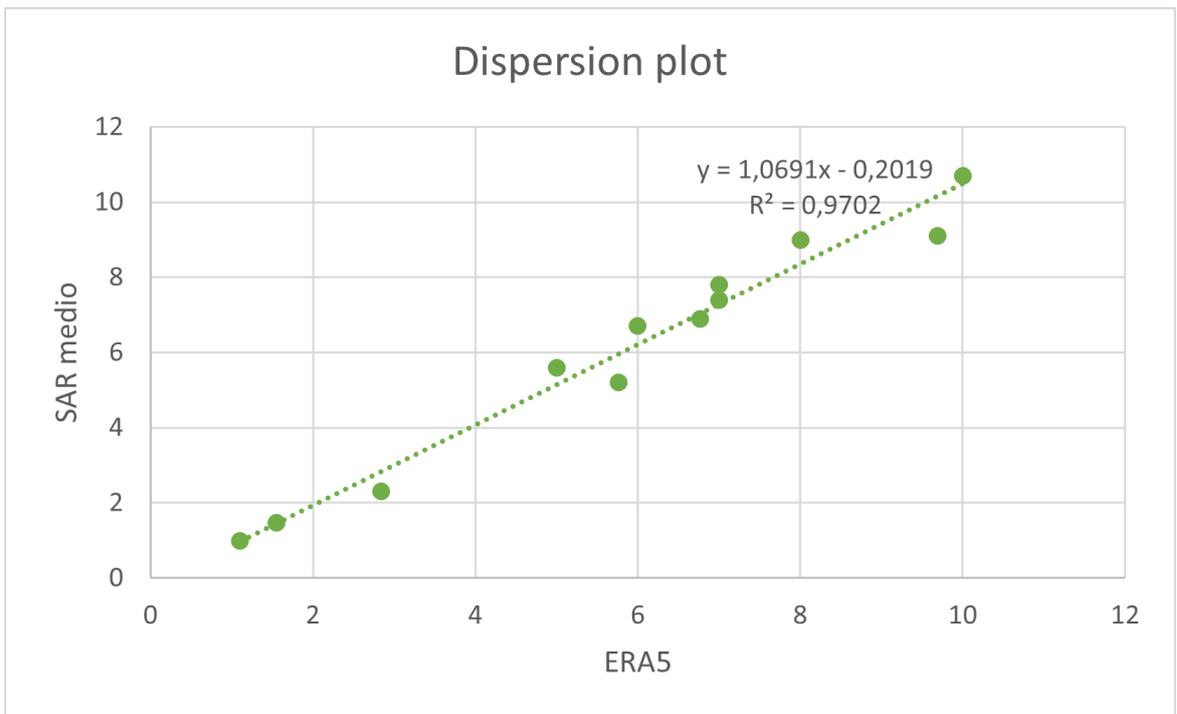


Figura 4.7: SAR mean value vs ERA5

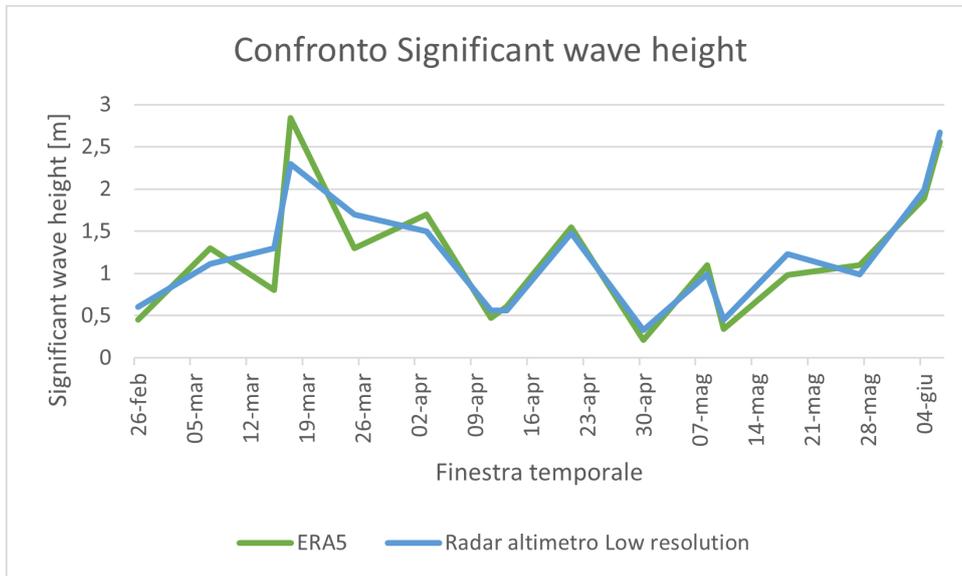


Figura 4.8: Confronto Significant wave height Radar altimetro vs ERA5

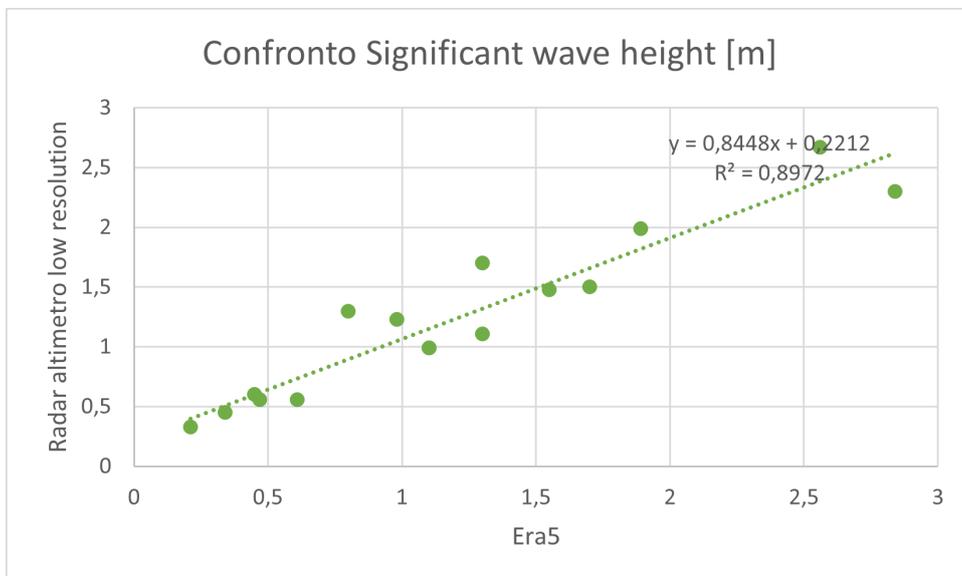


Figura 4.9: Dispersion plot: significant wave significant wave height misurato con il radar altimetro del sentinel 3 vs Significant wave height calcolato dall'ERA5

Capitolo 5

Conclusioni

Possiamo notare come nei grafici relativi al confronto, ci sia una buona convergenza dei diversi metodi. Infatti, i risultati differiscono al massimo per del 20 %.

Anche i grafici di dispersione mostrano un comportamento analogo, infatti si ha una buona regressione lineare, individuata da un alto valore dell' R^2 tra le due variabili.

Bisogna comunque specificare come i valori medi presi dall'ERA5 e dal modo operativo low resolution del radar altimetro del sentinel 3 siano su un'area maggiore rispetto al calcolo della media dell'intensità della velocità del vento calcolata mediando i valori presi dalla stima eseguita sulle immagini del SAR del sentinel 1, con una risoluzione spaziale maggiore.

Queste ultime considerazioni ci permettono di affermare che, in primis, l'analisi di fattibilità sull'uso di dati satellitari per la derivazione di parametri sullo stato del mare e del vento sopra di esso ha dato esito positivo, almeno per quanto riguarda l'ottenimento delle informazioni volute.

Per quanto riguarda l'accuratezza del metodo, la ricerca preliminare mostra un buon risultato, se confrontato con le altre tipologie di dato.

Inoltre, la metodologia implementata permette di risparmiare tempo e denaro, in quanto è possibile estrapolare tutte le informazioni richieste in un arco temporale ampio, anche anni, in questa prima analisi di fattibilità ci siamo limitati ad un periodo di 5 mesi, invece di aspettare di ottenere le autorizzazioni di immissione della strumentazione di misurazione in-situ, ed in più di aspettare anche 1/2 anni di misurazioni che possano essere portate a corredo di una certificazione.

In particolare, l'analisi delle immagini SAR ha permesso di derivare l'intensità e la direzione del vento, ma non il verso, partendo da dati con un livello di elaborazione L1, correlando il coefficiente di retrodiffusione al campo di velocità del vento.

Questo metodo ha ottenuto un campo di velocità nei pressi di Pantelleria con una risoluzione spaziale di 2 Km. Tenendo conto del costo computazionale del metodo non elevato e della possibilità di uno storage dei dati in cloud, tale metodo risulta applicabile su progetti più ampi se confrontati con ERA5 (risoluzione spaziale di

50 Km).

L'analisi delle immagini ottiche per la derivazione della batimetria, ovvero il comportamento del fondale marino, presenta diversi limiti, i quali sono emersi durante l'applicazione del metodo in essere.

In primis, il metodo crea delle combinazioni lineari tra le bande del rosso, verde, blu e infrarosso e le correla alla profondità del fondale marino. Questo calcolo, sulle immagini ottiche, risulta avere un limite di accuratezza di circa 150 m sulla profondità del fondale marino.

La profondità massima che può assumere il fondale marino per essere un sito di locazione ottimale per una turbina eolica offshore è di circa 100 m, dunque rientra nei limiti del metodo utilizzato.

Per quanto riguarda l'altezza significativa delle onde, il progetto di tesi ha utilizzato solo dati satellitari con un livello di elaborazione L2.

I risultati ottenuti avvalorano le potenzialità delle osservazioni spaziali come strumento di supporto nel campo della blue economy.

Possibili sviluppi futuri del lavoro di tesi sono i seguenti:

- Data fusion e Data integration tra più missioni satellitari SAR, al fine di ottimizzare il revisit time della costellazione così ottenuta, ergo migliorare e aumentare la risoluzione temporale del dato sulla stessa porzione di terra,
- Data fusion e data integration di missioni satellitari aventi come strumentazione i radar altimetri o gli scatterometri, le quali erogano di loro un dato elaborato sui venti (L2), ergo incrementiamo la risoluzione spaziale e temporale,
- Data fusion e data integration tra le missioni satellitari e i parametri stimati dal metodo matematico usato dall'ERA5, al fine di ottenere non solo la direzione del vento ma anche un'informazione sul verso,
- Per entrambi i metodi sopracitati, bisogna eseguire un'ulteriore analisi dettagliata sull'effettiva disponibilità dei dati, come fatta nel paragrafo 3.2 e 3.3,
- Per quello che concerne la fase di acquisizione del dato, in futuro può essere presa in considerazione la possibilità di avere un collegamento tra i server delle missioni satellitari e un sistema cloud tramite API, al fine di poter adoperare una quantità di dati maggiore e in Near real time.
- Per quello che concerne il calcolo di derivazione della batimetria, è possibile migliorarne le performance andando ad aumentarne il contrasto tra la banda del blu e del verde, ovvero migliorandone la sensibilità. Inoltre, è possibile andare a costruire una palette di colori ad hoc per la visualizzazione della profondità dei fondali marini.

- Ripetere l'intero processo di derivazione delle informazioni sul campo di velocità del vento e sulla batimetria, ma anche sull'acquisizione dei dati sullo stato del mare come la Sea surface temperature, la Significant wave height, Mean sea surface height, backscatter coefficient e la Sea surface height anomaly, sia intorno all'isola di Pantelleria che su un altro luogo di interesse ma con le migliori sopraccitate al fine di compiere un riscontro finale.

Appendice A

Tabella data products "L2" e Parametri orbitali

| Satellite | Instrument | Parametro Data L2 | | | | Resolution Spaziale | Revisit time (Days) | Data Policy |
|-----------------|--|--|---|---|--|---------------------|--|---|
| Sentinel 1A e B | Altimetro SAR a doppia Frequenza (Ku e C) | SWH: ocean_01: Icy corrected "ocean" significant wave height 1 e 20 Hz Ku C-Band | swh_ocean_rms_01: Icy rms dtd SWH | swh_01: Icy sea surface height anomaly, C e glm Ku | sea surface height | 300 m | Solo 1 A : 1,5 - 10 - 2,5 Insone : 1,5 | Solo data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |
| | | swh_01: Icy sea surface height anomaly (sea surface height above sea level) | mean_sea_surf_sw01: Mean sea surface height above reference ellipsoid (1-20 Hz Ku e C) | mean_dyn_topo_01: Mean dynamic topography above geoid | rain_rate_01: rain rate | | | |
| | | wind_speed_mod_u_01: U component of the model wind vector | wind_speed_mod_v_01: V component of the model wind vector | wind_speed_01: Altimeter wind speed | 19_238_01(55): 23.8 e 36.5 GHz mean beam brightness temperature | | | |
| | | inst_op_mode_20: Icy instrument operating mode | sig0_ocean_01: Icy backscatter coefficient | qc_01: Icy automatic gain control correct | Parametri legati al tempo (UTC,Ku,C,Companionato) | | | |
| SENTINEL 6 | POSITION 4 | mean_sea_surface_sw01: mean sea surface height solution 1 (SWH-C1.55S) above the reference ellipsoid | mean_sea_surface_sw02: mean sea surface height solution 2 (SWH-C1.55S) above the reference ellipsoid | swh_ocean: corrected ocean significant wave height | swh_ocean: standard deviation of the ocean significant wave height | 300 m | 9,55 | data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |
| | | swh_sea_surface_height_above_sea_level | wind_speed_mod_u: U component of the model wind vector at the altimeter time tag (starboard wind speed) | wind_speed_mod_v: V component of the model wind vector at the altimeter time tag (starboard wind speed) | sig0_ocean: corrected ocean backscatter coefficient | | | |
| | | rad_wind_speed: radiometer wind speed | wind_speed_01: altimeter wind speed | rad_19_357: tx_brightness, temperature | internal_tide | | | |
| JASON 3 | POSITION 3 | mean_sea_surface_crosstrack: mean sea surface height (CROSSTRACK solution) above reference ellipsoid | mean_dynamic_topography: mean dynamic topography above geoid | swh_ocean: sea surface wave significant height | internal_tide: internal tide height | 1 Km | Jason 2 : 1,35 - 9 Insone : 0,4 | data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |
| | | swh_sea_surface_height_above_sea_level | sea_state_bin: sea surface height bin, due to sea state roughness | swh_ocean_mch: re-tracking | sig0_ocean: surface backscatter coefficient of radar wave, wof mean class 1 Hz Ku-Band waveform mean class | | | |
| | | wind_speed_01: altimeter wind speed | wind_speed_01_mch: altimeter wind speed (MCH re-tracking) | depth_or_offset: ocean depth/land elevation | | | | |
| SAR | ALTIKA | SWH: sea surface wave significant height | sig0: surface backscatter coefficient of radar wave | mean_sea_surface_sw01: mean sea surface height (solution 1) above reference ellipsoid | mean_topography: mean dynamic topography above geoid | 2 Km | 3,5 | data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |
| | | swh: sea surface height above sea level | wind_speed_01: altimeter wind speed | sw_01: sea surface height correction due to air pressure at low frequency | depth_or_offset: ocean depth/land elevation | | | |
| | | swh_dyn: sea surface height above sea level dynamic | swh_dyn: sea surface height above sea level dynamic | internal_tide: internal tide height | sig0: surface backscatter coefficient of radar wave | | | |
| METOP | ASCAT | ww_mch: cross-track wind vector cell number | modif_speed: model wind speed at 10 m | modif_dir: model wind direction at 10 m | ice_prob: ice probability | 1 Km | Metop B : 28,4 Insone : 24,5 | "Essential use" (sua Open, "Non Essential use" sono restricted) |
| | | wind speed: wind speed at 10 m | wind dir: wind direction at 10 m | incidence: backscatter distance to modification | | | | |
| Aviary | ALADIN | Vertical Wind speed (10 - 30 Km) | Horizontal Wind speed | Wind direction | | 10 Km | 6,45 | data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |
| SMS | MISAS | wind speed (1440/7141) retrieved wind speed | wind speed error | cross track distance | quality level: retrieved wind speed quality level (good fair poor) | 30 - 50 Km | 28,38 | data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |
| COSAT | SWAMP/CA | Significant wave height | wind speed | Wind direction | | 25 Km | 29,8 | Il copyright dei dati del satellite oceanico cinese è di proprietà del Ministero delle risorse naturali e dell'energia cinese. Le date dei dati quando vengono prodotte le pubblicazioni. |
| Hai - Yang | ATIS, Radar altimetro, wind scatterometer, SAR altimetro | U component of the model wind vector | V component of the model wind vector | altimeter wind speed / radiometer wind speed | sea surface height anomaly, swa | 1.1 Km | Serie 1 : 1,05 0,57 Combitation : 0,43 | |
| | | sea surface wave significant height in Ku e C sea 1 Hz the 20 Hz | surface backscatter coefficient of radar waves in Ku e C | surface brightness, temperature | mean sea surface height above reference ellipsoid | | | |
| RADARSAT | SAR a single frequency | Wind Speed at 10 m | Wind direction at 10 m | | | 100 m | 11,75 | data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |
| OCEANSAT | Ocean color monitor | Wind Speed at 10 m | Wind direction at 10 m | | | 1 Km | 1,55 | data is freely and openly available to everyone. (use, reuse and redistribution) |

Figura A.1: Tabella data products "L2" relativi alle principali missioni satellitari

Tabella data products "L2" e Parametri orbitali

| Satellite | categoria orbita | Semiassse maggiore (Km) | Eccentricità | Inclinazione (deg) | Periodo (min) | RAAN (deg) | Argomento del perigeo (deg) | Moto medio (rev/day) |
|--------------|---|-------------------------|--------------|--------------------|---------------|------------|-----------------------------|----------------------|
| Sentinel 3 A | Sun - Sincrona | 7182,47 | 0,0001227 | 98,62 | 100,97 | 198,0742 | 100,6479 | 14,26 |
| Sentinel 3 B | Sun - Sincrona | 7180,77 | 0,0001194 | 98,63 | 100,93 | 198,0879 | 77,3917 | 14,26 |
| Sentinel 6 | Low earth orbit | 7714,43 | 0,000094 | 66,046 | 112,23 | 2 | 266,64 | |
| Jason 3 | Low earth orbit | 7725 | 0,0008071 | 66,044 | 112,42 | 19,5133 | 273,7 | 12,8 |
| Jason 2 | Low earth orbit | 7714 | 0,0007801 | 66,0398 | 112,42 | 334,0619 | 271,8229 | 12,87 |
| SMOS | Sun - Sincrona | 7136,5 | 0,0001078 | 99,39 | 100,02 | 312,9589 | 99,3685 | 14,39 |
| Aeolus | Sun - Sincrona | 6773 | 0,0005013 | 96,7 | 92,5 | 131,7678 | 110,94 | 15,86 |
| SARAL | Sun - Sincrona | 7161,5 | 0,000208 | 98,5479 | 100,54 | 311,3554 | 64,5558 | 14,32 |
| METOP - B | Near-circular sun-synchronous polar morning orbit | 7195,605 | 0,0001567 | 98,689 | 101 | 185,5107 | 131,8 | 14,21 |
| METOP - C | Near-circular sun-synchronous polar morning orbit | 7195,605 | 0,0003482 | 98,6871 | 101 | 185,8187 | 147,09 | 14,21 |
| CFOSAT | Sun - Sincrona | 6890 | 0,0001436 | 97,4248 | 94,7 | 148,654 | 106,1799 | 15,164 |
| HaiYang - 1B | Sun - Sincrona near circular orbit | 7342,5 | 0,001342 | 98,3225 | 104,46 | 151,349 | 348,89 | 14,3 |
| HaiYang - 1C | Sun - Sincrona near circular orbit | 7342,5 | 0,0009811 | 98,4595 | 104,46 | 199,86 | 244,792 | 14,34 |
| HaiYang - 1D | Sun - Sincrona near circular orbit | 7342,5 | 0,0001009 | 98,5148 | 104,46 | 64,132 | 169,5716 | 14,341 |
| HaiYang - 2A | Sun - Sincrona near circular orbit | 7342,5 | 0,0000816 | 99,3179 | 104,46 | 131,6516 | 44,5084 | 13,7873 |
| HaiYang - 2B | Sun - Sincrona near circular orbit | 7342,5 | 0,0000412 | 99,3436 | 104,46 | 134,4662 | 9,7074 | 13,793 |
| HaiYang - 2C | Sun - Sincrona near circular orbit | 7342,5 | 0,0013745 | 65,9986 | 104,46 | 0,0198 | 255,3637 | 13,8337 |
| HaiYang - 2D | Sun - Sincrona near circular orbit | 7342,5 | 0,0010147 | 65,9962 | 104,46 | 89,2909 | 280,4219 | 13,8337 |
| RADARSAT - 2 | Sun - Sincrona | 7169 | 0,0001205 | 98,5765 | 100,7 | 132,6679 | 94,7044 | 14,2998 |
| OCEANSAT - 2 | Sun - Sincrona | 7091 | 0,0004165 | 98,2882 | 99,31 | 220,7862 | 227,6442 | 14,4651 |
| AQUA | Sun - Sincrona | 7080 | 0,0001745 | 98,2448 | 99 | 66,7387 | 63,5017 | 14,5724 |
| CORIOLIS | Sun - Sincrona | 7199 | 0,0013446 | 98,7198 | 101 | 134,4475 | 219,6704 | 14,1912 |

Figura A.2: Parametri orbitali classici relativi alle missioni satellitari analizzate

Bibliografia

- [1] Diab, Hassan and Younes, Rafic and Lafon, Pascal (2017). Survey of research on the optimal design of sea harbours. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9.
- [2] Medina-Lopez, Encarni and McMillan, David and Lazic, J and Hart, E and Zen, S and Angeloudis, A and Bannon, E and Browell, J and Dorling, Stephen and Dorrell, RM and others (2021). Satellite data for the offshore renewable energy sector: synergies and innovation opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 264.
- [3] Rete meteo marina Ancona, capitolo 16 Onde del mare <http://rmm.an.irbim.cnr.it/env2web/IPO/IPO-16/capitolo16.htm>
data:15/07/2022
- [4] EU4OCEANOBS: In situ observation, Copernicus, Europe <https://www.eu4oceanobs.eu/> data:20/09/2022
- [5] Centro europeo per le previsioni meteorologiche <https://www.ecmwf.int/>
data:20/09/2022
- [6] Descrizione del metodo ERA5 e dei suoi parametri di output <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview> data:18/07/2022
- [7] Modello matematico per il raffinamento della griglia di output del metodo ERA5 <https://www.tudelft.nl/citg/over-faculteit/afdelingen/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swan>
data:20/07/2022
- [8] Booij, N and Holthuijsen, LH and Ris, RC (1997). THE SWAN WAVE MODEL FOR SHALLOW WATER. *Coastal Engineering* 1996, 668-676.
- [9] <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>
data:06/09/2022
- [10] Come è fatto un Radar, <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar> data:24/07/2022
- [11] van't Klooster, Kees (2011). ERS-1, EUROPEAN REMOTE-SENSING SATELLITE WAS LAUNCHED 20 YEARS AGO. 2011 21st International Crimean Conference " Microwave & Telecommunication Technology", 117-118.

- [12] Coerenza <http://web.inge.unige.it/DidRes/Fisica/coerenza.pdf>
data:06/09/2022
- [13] Polarizzazione <http://web.inge.unige.it/DidRes/Fisica/Polar.pdf>
data:06/09/2022
- [14] Richards, John Alan and others (2009). Remote sensing with imaging radar. Springer, 1.
- [15] Sintetiche Aperture radar, <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar> data:28/07/2022
- [16] Sito ufficiale della missione satellitare Sentinel Copernicus, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home> data:02/08/2022
- [17] Descrizione dei servizi forniti dai sentinel, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/thematic-areas> data:07/08/2022
- [18] Approfondimento sulla strumentazione scientifica del sentinel 1, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload> data:10/08/2022
- [19] Handbook ufficiale della strumentazione del sentinel 4. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-4>
data:12/08/2022
- [20] <https://www.eoportal.org/satellite-missions/hy-2aspacecraft> data:20/09/2022
- [21] Overview of radarsat satellite, <https://earth.esa.int/eogateway/missions/radarsat>
data:13/08/2022
- [22] Overview of SARAL satellite, reference <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/s/saral> data:14/08/2022
- [23] Verron, Jacques and Bonnefond, Pascal and Andersen, Ole and Arduin, Fabrice and Bergé-Nguyen, Muriel and Bhowmick, Suchandra and Blumstein, Denis and Boy, François and Brodeau, Laurent and Crétaux, Jean-François and other (2021). The SARAL/AltiKa mission: A step forward to the future of altimetry, *Advances in Space Research*, 68.
- [24] Overview of Shizuku satellite, https://global.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/
data:16/08/2022
- [25] Overview of Shikisai, https://global.jaxa.jp/projects/sat/gcom_c/
data:17/08/2022
- [26] https://calvalportal.ceos.org/t-d_wiki?ppid=54_I_NSTANCE_Wg3ti1194i20pplifecycle=0ppstate=normalppmode=viewppcolid=column-2ppcolcount=154_I_NSTANCE_Wg3ti1194i20strutsaction=data : 20/09/2022
- [27] Descrizione standard di formattazione NetCDF <http://sp7.irea.cnr.it/wiki/index.php/NetCDF> data:18/08/2022
- [28] ESA:Missione satellitare Radarsat, tratto il 07/09/2022 da: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/radarsat>
- [29] ESA:Missione satellitare Aeolus, tratto il 07/09/2022 da: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/aeolus>

- [30] <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products> data:20/08/2022
- [31] <https://celestrak.org/NORAD/documentation/tle-fmt.php> data:22/08/2022
- [32] Features of SNAP Toolbox, <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> data:24/08/2022
- [33] Nghiem, Son V and Li, Fuk K and Lou, Shu-Hsiang and Neumann, Gregory and McIntosh, Robert E and Carson, Steven C and Carswell, James R and Walsh, Edward J and Donelan, Mark A and Drennan, William M (1995). Observations of radar backscatter at Ku and C bands in the presence of large waves during the surface wave dynamics experiment, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 33.
- [34] Shao, Weizeng and Zhang, Zheng and Li, Xiaofeng and Li, Huan (2016). Ocean wave parameters retrieval from Sentinel-1 SAR imagery, *Remote Sensing*, 8
- [35] LATVIAN TECHNOLOGY IN SPACE: Home page, <https://latviaspace.gov.lv/en/> data:24/08/2022
- [36] Risoluzione spaziale e dettaglio sulle bande, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath> data:25/08/2022
- [37] McCarthy, Bradley L and Olsen, Richard C and Kim, Angela M (2011), Creation of bathymetric maps using satellite imagery, *Ocean Sensing and Monitoring III*, 8030.
- [38] <https://www.youtube.com/watch?v=PdnSalcOUHA>, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Italy data:26/08/2022
- [39] Sito ufficiale ERA5, <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> data:26/08/2022
- [40] Form di compilazione per il download dei dati di ERA5, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=form> data:28/08/2022