



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

Dipartimento di Informatica

Corso di Laurea Triennale in Informatica

TESI DI LAUREA

# Tecnologie per l'Osservazione della Terra: una libreria GEE per la Classificazione di Indici Biofisici

RELATORE

Prof. Monica Sebillo

Prof. Michele Grimaldi

Università degli Studi di Salerno

CANDIDATO

**Andrea BUCCI**

Matricola: 0512112820

*Ai miei cari nonni Antonio e Vincenzo*

## **Abstract**

Il seguente lavoro di tesi presenta uno studio sull'osservazione della Terra e sulle tecnologie moderne che entrano in gioco in questo processo scientifico. Dall'utilizzo di sensori, all'elaborazione di dati ottenuti tramite questi, fino ad arrivare allo sviluppo di una libreria JavaScript per la piattaforma Google Earth Engine, progettata per facilitare l'analisi dei dati satellitari derivati dal satellite Sentinel-2. La libreria offre funzioni per il calcolo e la visualizzazione di mappe raster basate su vari indici biofisici calcolando la media e varianza su questi, fornendo così un'analisi dettagliata delle condizioni ambientali. Esamineremo quindi, in maniera approfondita, il processo di sviluppo della libreria, nato dalla collaborazione tra membri e docenti dei dipartimenti di Informatica e Ingegneria Civile-Ambientale dell'Università degli Studi di Salerno. La comprensione del nostro pianeta risulta cruciale e particolarmente ostica se sprovvista di dati accurati e dettagliati, ma grazie alle tecnologie trattate in questa ricerca, tra cui la libreria, è possibile ottenere una visione più chiara e precisa delle dinamiche ambientali, contribuendo così a una gestione più efficace delle risorse naturali e alla salvaguardia dell'ambiente.

---

# Indice

---

<b>Elenco delle Figure</b>	<b>iii</b>
<b>Elenco delle Tabelle</b>	<b>v</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Storia dell'osservazione della Terra . . . . .	1
1.1.1 La prima mappa creata dall'uomo . . . . .	1
1.1.2 Evoluzione dell'osservazione della Terra . . . . .	3
<b>2 L'osservazione della Terra</b>	<b>6</b>
2.1 Tecnologie utilizzate per l'osservazione della Terra . . . . .	6
2.2 Tipi di immagini dell'osservazione della Terra . . . . .	7
2.2.1 Immagini passive . . . . .	8
2.2.2 Immagini attive . . . . .	8
2.3 Il Programma Copernicus . . . . .	9
2.3.1 La costellazione "Sentinel" . . . . .	9
2.4 Google Earth Engine . . . . .	14
2.4.1 L'architettura . . . . .	15
2.4.2 Casi d'uso . . . . .	16
<b>3 La realizzazione di mappe su indici biofisici con una libreria JavaScript</b>	<b>18</b>

3.1	Gli indici geofisici oggetto di studio . . . . .	19
3.2	Nascita della libreria . . . . .	25
3.3	bphindex.js . . . . .	27
3.3.1	Il dataset COPERNICUS/S2 . . . . .	27
3.3.2	L'implementazione . . . . .	28
3.3.3	Classificazione dei risultati . . . . .	34
3.3.4	Utilizzo della libreria . . . . .	35
3.3.5	Visualizzazione dei risultati . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Conclusioni e proposte future</b>	<b>40</b>
4.1	Analisi dei risultati ottenuti . . . . .	40
4.2	Sviluppi e proposte future . . . . .	41
4.3	Pensieri finali . . . . .	42
<b>Bibliografia</b>		<b>44</b>

---

## Elenco delle figure

---

1.1	La "Mappa Mundi" e la sua interpretazione British Museum, <i>The Babylonian Map of the World</i> . . . . .	2
2.1	Trasmittanza elettromagnetica, o opacità, dell'atmosfera terrestre Mysid (2008), <i>Atmospheric electromagnetic opacity</i> . . . . .	8
2.2	Uno dei due satelliti Sentinel-1 in orbita ESA/ATG medialab (2014), <i>Sentinel-1</i> . . . . .	10
2.3	Uno dei due satelliti Sentinel-2 in orbita ESA/ATG medialab (2015), <i>Sentinel-2</i> . . . . .	11
2.4	Uno dei due satelliti Sentinel-3 in orbita ESA/ATG medialab (2016), <i>Sentinel-3 solar array</i> . . . . .	11
2.5	Sentinel-5P in orbita ESA/ATG medialab (2017), <i>Sentinel-5P</i> . . . . .	12
2.6	Sentinel-6 Michael Freilich in orbita ESA/ATG medialab (2020), <i>Sentinel-6: charting sea level for Copernicus</i>	13
2.7	Il code editor di Google Earth Engine Google, <i>The Earth Engine interactive development environment</i> . . . . .	15
2.8	Una versione semplificata dell'architettura di Google Earth Engine Google, <i>A simplified system architecture diagram</i> . . . . .	16

3.1 Creare una nuova repository su Google Earth Engine . . . . .	36
3.2 Immagine raster classificata dell'NBR medio sulla provincia di Salerno	38
3.3 Immagine raster non classificata dell'NBR medio sulla provincia di Salerno . . . . .	38

---

## **Elenco delle tabelle**

---

3.1 Tabella delle principali bande delle immagini Sentinel-2 . . . . .	28
--	----

# CAPITOLO 1

---

## Introduzione

---

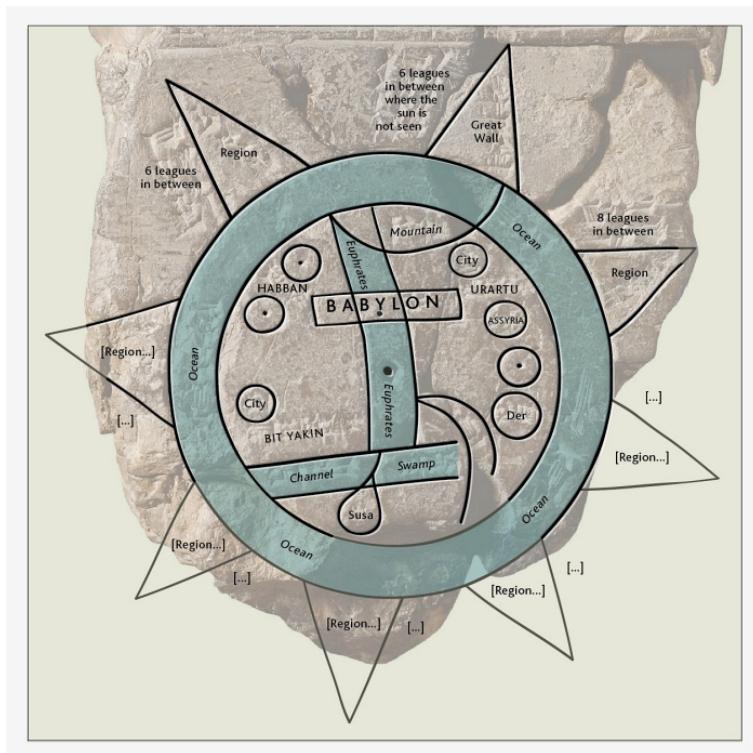
### 1.1 Storia dell'osservazione della Terra

Sin dall'antichità l'uomo si è sempre posto l'obiettivo di ampliare e migliorare le proprie conoscenze; ciò vale anche per la scienza dell'osservazione terrestre. Questo era un processo basato principalmente su tecniche empiriche e manuali, attraverso le quali le civiltà cercavano di comprendere il territorio circostante per scopi pratici come la navigazione, l'agricoltura e la gestione delle risorse. Le prime mappe furono il frutto di osservazioni dirette, misurazioni rudimentali e una crescente conoscenza del mondo da parte di geografi, esploratori e matematici. Le mappe più antiche non rappresentavano il mondo nella sua totalità, ma erano piuttosto rappresentazioni locali e schematiche di territori circoscritti. Le tecniche di misurazione erano rudimentali, basate su osservazioni a occhio nudo, distanze approssimate e riferimenti naturali come fiumi e montagne.

#### 1.1.1 La prima mappa creata dall'uomo

La mappa geografica più antica che si conosce è la "Mappa Mundi" o "Imago Mundi", di origine babilonese risalente al 700 a.C. circa (VIII secolo a.C), conservata

nel British Museum di Londra. La mappa venne ritrovata nel 1881 a Tell Abu Habbah, poco a sud di Baghdad, dove un tempo sorgeva l’antica città babilonese di Sippar e rappresenta una visione del mondo antico, centrata sulla città di Babilonia. A differenza delle mappe odierne che si presentano in un formato digitale o cartaceo, la Mappa Mundi venne incisa su una piccola tavoletta di 12 x 8 cm e rappresenta la Terra con due cerchi concentrici. Il cerchio più interno, un disco, simboleggia l’intero mondo conosciuto, mentre quello esterno, chiamato “marratu”, che significa “mare salato”, rappresenta l’oceano che circonda la Terra. All’interno del disco si trovano figure geometriche come cerchi, rettangoli e linee curve, tutte distribuite intorno a un punto centrale, che raffigurano caratteristiche geografiche come montagne, fiumi (tra cui il Tigri e l’Eufrate) e paludi. Tra i luoghi indicati sulla mappa spiccano località importanti come l’Assiria e Babilonia, quest’ultima la città principale della Mesopotamia.



**Figura 1.1:** La "Mappa Mundi" e la sua interpretazione

British Museum, *The Babylonian Map of the World*

Nonostante la presenza di questi elementi, la loro disposizione appare piuttosto arbitraria: le dimensioni e la posizione relativa di molti dettagli risultano sproporzio-

nate e poco realistiche. Al di fuori del cerchio esterno si trovano otto aree triangolari (di cui solo cinque sopravvissute) che rappresentano le \*nagu\*, o "regioni periferiche", zone non esplorate. Questa mappa è particolarmente significativa rispetto ad altre mappe mesopotamiche dell’epoca, poiché, pur essendo comuni rappresentazioni di città e territori locali, la Mappa Mundi babilonese è l’unica che raffigura il mondo su una scala così vasta. [1]

### 1.1.2 Evoluzione dell’osservazione della Terra

Con il passare dei secoli, l’evoluzione della tecnologia ha permesso all’uomo di migliorare drasticamente lo studio dell’osservazione terrestre, passando da semplici osservazioni visive e rappresentazioni cartografiche approssimative a sofisticate tecniche basate sulla scienza e sull’ingegneria. Già nel Rinascimento, la combinazione di nuovi strumenti come il sestante, l’astrolabio e la bussola, insieme allo sviluppo della trigonometria e della geometria, consentì una misurazione più accurata delle distanze e delle coordinate geografiche. Questi progressi furono fondamentali per il miglioramento della navigazione marittima e per la cartografia, che divenne più dettagliata e rappresentativa del mondo reale. Gli esploratori, come Cristoforo Colombo e Ferdinando Magellano, contribuirono a una migliore comprensione della geografia globale attraverso i loro viaggi, che portarono alla realizzazione di mappe più precise.

Con l’invenzione del telescopio all’inizio del XVII secolo, si aprì una nuova era per l’osservazione terrestre e astronomica. Galileo Galilei non solo puntò il telescopio verso il cielo, ma anche verso oggetti terrestri, studiando dettagli della superficie che non erano visibili a occhio nudo. Questi strumenti consentirono misurazioni più precise e osservazioni più accurate del moto della Terra, e contribuirono alla comprensione scientifica del suo posto nell’universo.

La nascita della fotografia nel XIX secolo offrì una nuova dimensione all’osservazione della Terra. Durante la Prima Guerra Mondiale, la fotografia aerea iniziò a essere utilizzata per scopi militari, permettendo di mappare il terreno dall’alto con una precisione senza precedenti. Questo metodo fu in seguito applicato a scopi civili, come la mappatura delle città e delle aree rurali. Allo stesso tempo, si svilupparono

tecniche geodetiche che, utilizzando strumenti come il teodolite, consentirono di misurare con precisione le dimensioni e la forma della Terra.

Il vero balzo in avanti nella scienza dell’osservazione terrestre arrivò con l’era spaziale. Il lancio del primo satellite artificiale, lo Sputnik 1 nel 1957, segnò l’inizio di una nuova era di osservazione della Terra. Pochi anni dopo, nel 1960, fu lanciato il primo satellite meteorologico, TIROS-1, che fornì le prime immagini della Terra dallo spazio. Questi primi satelliti offrirono una prospettiva completamente nuova, permettendo di vedere il pianeta come un tutto unico e di monitorare eventi atmosferici su larga scala.

Con il tempo, satelliti sempre più avanzati sono stati sviluppati per studiare vari aspetti della Terra: dallo studio della copertura nuvolosa e dei modelli climatici, al monitoraggio degli oceani, delle foreste e del cambiamento delle superfici terrestri. Il programma Landsat, iniziato nel 1972, è uno dei più longevi programmi di osservazione della Terra, e continua a fornire immagini dettagliate e dati sul cambiamento della superficie terrestre. Con l’avanzare della tecnologia, il telerilevamento è diventato uno strumento cruciale per l’osservazione terrestre. I satelliti moderni sono dotati di una vasta gamma di sensori, tra cui radar, sensori ottici e termici, che raccolgono informazioni dettagliate su vari aspetti della Terra. Ad esempio, i satelliti dotati di radar possono “vedere” attraverso le nuvole e fornire immagini della superficie terrestre anche in condizioni meteorologiche avverse o di notte. I sensori termici sono in grado di monitorare la temperatura delle superfici e degli oceani, utili per lo studio del riscaldamento globale. Il programma europeo Sentinel, parte della missione Copernicus dell’ESA, ha rivoluzionato ulteriormente l’osservazione terrestre con l’utilizzo di una serie di satelliti che monitorano continuamente l’ambiente. In particolare, i satelliti Sentinel-2, lanciati nel 2015, sono progettati per monitorare la copertura del suolo, la vegetazione, i cambiamenti climatici e le risorse idriche, fornendo immagini ad alta risoluzione e accessibili tramite piattaforme come Google Earth Engine.

Oggi, l’osservazione terrestre non si limita solo alla raccolta di immagini satellitari. Con l’aumento esponenziale dei dati provenienti da satelliti, droni e sensori, si è resa necessaria l’applicazione di nuove tecnologie per analizzare queste enormi quantità di informazioni. L’intelligenza artificiale (IA) e il machine learning stanno svolgendo

un ruolo sempre più importante nell’elaborazione dei dati satellitari. Attraverso algoritmi avanzati, è possibile rilevare cambiamenti ambientali, prevedere modelli climatici e monitorare disastri naturali in tempo reale, migliorando così la gestione delle risorse naturali e la risposta alle emergenze.

# CAPITOLO 2

---

## L'osservazione della Terra

---

L'osservazione della Terra è un campo interdisciplinare dedicato alla raccolta, all'analisi e all'interpretazione dei dati riguardanti il nostro pianeta e il suo ambiente. Attraverso l'impiego di tecnologie avanzate come satelliti, droni e stazioni terrestri, questo settore fornisce un'ampia gamma di informazioni sulla superficie terrestre, l'atmosfera, gli oceani e altri sistemi naturali. Questi dati sono essenziali per comprendere i processi ambientali, climatici e geologici che influenzano la Terra. L'osservazione della Terra è cruciale per monitorare i cambiamenti globali, prevedere eventi meteorologici estremi, gestire le risorse naturali e rispondere ai disastri naturali.

### 2.1 Tecnologie utilizzate per l'osservazione della Terra

Le tecnologie utilizzate per l'osservazione della Terra sono varie e sempre in evoluzione, offrendo una visione sempre più dettagliata e completa del nostro pianeta. Tra queste, i satelliti rappresentano uno strumento fondamentale. Grazie alla loro capacità di osservare vaste aree della Terra da una prospettiva spaziale elevata, i satelliti possono raccogliere dati su scala globale in modo efficiente e regolare.

Questi dati possono riguardare la temperatura superficiale, la copertura nuvolosa, la vegetazione, l’uso del suolo, il livello degli oceani e molto altro ancora.

Oltre ai satelliti, altre tecnologie come aerei, droni e stazioni terrestri giocano un ruolo importante nell’osservazione della Terra. Gli aerei possono essere utilizzati per missioni di osservazione ad alta risoluzione su aree specifiche, fornendo dettagli che possono sfuggire ai satelliti. I droni, invece, offrono flessibilità e capacità di monitoraggio a bassa quota, ideali per applicazioni come la mappatura dettagliata di terreni difficilmente accessibili o la sorveglianza di piccole aree.

Le stazioni terrestri comprendono una vasta gamma di strumenti e sensori posizionati su terraferma o installati su boe oceaniche. Questi strumenti misurano una varietà di parametri ambientali come temperatura, umidità, pressione atmosferica, livello dei fiumi e degli oceani, e molto altro ancora. Questi dati terrestri sono spesso utilizzati per validare e integrare le informazioni raccolte da satelliti e altri mezzi di osservazione.

Inoltre, le tecnologie di telerilevamento e sensori remoti giocano un ruolo cruciale nell’osservazione della Terra. Questi strumenti catturano informazioni attraverso la registrazione e l’interpretazione della radiazione elettromagnetica emessa o riflessa dalla superficie terrestre. Ciò consente di ottenere dati su una vasta gamma di fenomeni, tra cui la temperatura superficiale, la copertura vegetale, la composizione chimica dell’atmosfera e molto altro ancora.

Infine, l’elaborazione avanzata dei dati è un aspetto fondamentale dell’osservazione della Terra. L’utilizzo di algoritmi complessi e di intelligenza artificiale consente di analizzare grandi quantità di dati in modo efficiente, estrarre informazioni significative e produrre mappe e modelli dettagliati che supportano la comprensione e la gestione del nostro pianeta.

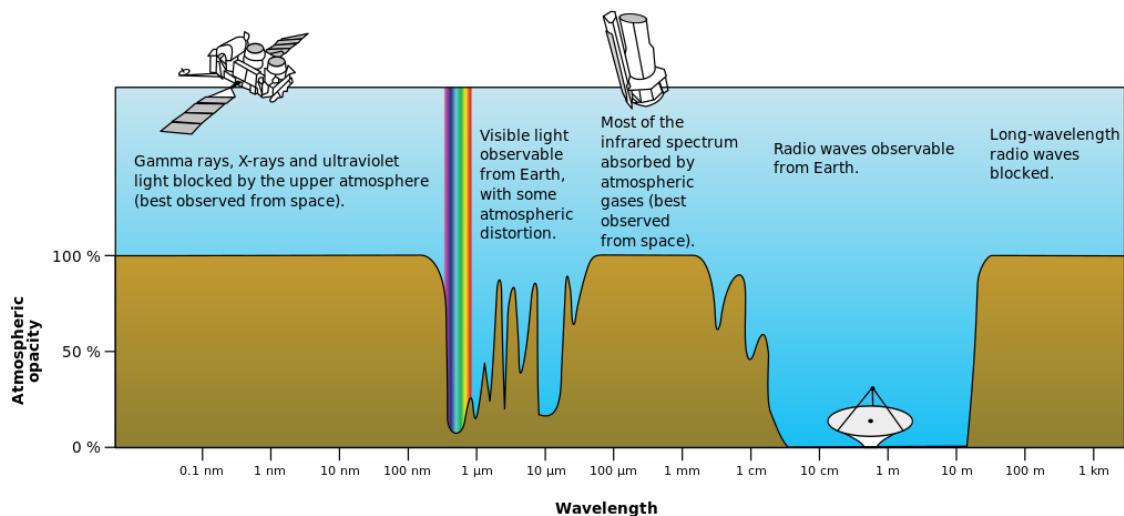
## 2.2 Tipi di immagini dell’osservazione della Terra

In questa sezione viene proposta una classificazione dei diversi tipi di immagini di osservazione della Terra disponibili. Le principali distinzioni sono fatte sulla natura (passiva o attiva) dello strumento di rilevamento che fornisce l’immagine e sulla lunghezza d’onda dello spettro elettromagnetico in cui avviene l’osservazione. La

trasparenza elettromagnetica dell’atmosfera, permette l’osservazione della superficie terrestre nello spettro visibile (da 0.39 a 0.70  $\mu\text{m}$ ), in una parte dello spettro infrarosso (da 0.70 a 14  $\mu\text{m}$ ) e nella gamma delle onde radio (da 1 cm a 11m). [2]

### 2.2.1 Immagini passive

Nei sistemi di immagini passive, i sensori sono progettati per rilevare le radiazioni elettromagnetiche emesse dai componenti della superficie terrestre e dell’atmosfera. Queste radiazioni possono derivare sia da fonti locali, come la radiazione termica emessa dalla vegetazione nell’infrarosso, sia dal riflesso della luce solare nello spettro visibile. Di conseguenza, le immagini passive sono generalmente influenzate dal ciclo giorno-notte e possono essere compromesse o interrotte da interferenze esterne, come emissioni indesiderate o copertura nuvolosa.[2]



**Figura 2.1:** Trasmittanza elettromagnetica, o opacità, dell’atmosfera terrestre

Mysid (2008), *Atmospheric electromagnetic opacity*

### 2.2.2 Immagini attive

Nei sistemi di immagini attive, gli strumenti comprendono un trasmettitore che emette un segnale elettromagnetico verso la superficie terrestre e un sensore che rileva l’interazione di questo segnale con l’ambiente circostante. A differenza delle immagini passive, che dipendono dall’illuminazione solare, le immagini attive non

sono vincolate alla presenza di luce solare, rendendole utili anche durante la notte o in condizioni di nuvole dense. [2]

## 2.3 Il Programma Copernicus

Copernicus è un programma dell'Unione Europea che ha l'obiettivo di osservare e monitorare la Terra attraverso l'ausilio di satelliti e dati in situ, cioè, non spaziali in quanto vengono rilevati sul posto. Sfruttando queste tecnologie, Copernicus è in grado di fornire dati in tempo reale sul nostro pianeta, che svolgono un importante ruolo nel monitoraggio, nella prevenzione di eventi nocivi per il pianeta e nel caso, nell'intervento di missioni di soccorso. I satelliti utilizzati per raccogliere i dati utilizzati dai servizi Copernicus sono divisi in due categorie di missioni:

- Sentinel: Questa categoria comprende i satelliti Sentinel, che sono stati appositamente progettati per soddisfare le esigenze del programma Copernicus. Tra questi, Sentinel-1, -2, -3 e -6 sono satelliti dedicati, mentre Sentinel-4 e -5 sono strumenti progettati per essere installati sui satelliti meteorologici dell'EUMETSAT. Inoltre, Sentinel-5P è un satellite dedicato, funzionando come precursore di Sentinel-5.
- Missioni partecipanti: Queste missioni sono gestite da organizzazioni nazionali, europee o internazionali e forniscono una vasta quantità di dati utilizzati nei servizi Copernicus.

### 2.3.1 La costellazione "Sentinel"

Come detto, Copernicus per la raccolta dei dati sfrutta dei satelliti, più precisamente, i satelliti della famiglia "Sentinel". Questi strumenti sono stati sviluppati dall'E.S.A. (European Space Agency) e attualmente, due costellazioni complete di due satelliti ciascuna, Sentinel-2 e Sentinel-3, sono in orbita, oltre a due satelliti singoli aggiuntivi, Sentinel-5P e Sentinel-6 Michael Freilich. Con la conclusione della missione del satellite Sentinel-1B, è previsto che il satellite Sentinel-1C si unisca al Sentinel-1A in orbita il prima possibile per ripristinare la costellazione Sentinel-1. [3]

Qui una descrizione dei vari satelliti e delle loro finalità:

- **Copernicus Sentinel-1**

- Costellazione formata da due satelliti gemelli Sentinel-1A e Sentinel-1B lanciati rispettivamente 3 aprile 2014 e il 25 aprile 2016. Funzionando giorno e notte e utilizzando l'imaging radar a sintesi d'apertura nella banda C, i satelliti Sentinel-1 sono in grado di acquisire immagini indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. Sentinel-1 opera in modalità di funzionamento pre-programmata per evitare conflitti e per creare un archivio dati coerente nel lungo termine, adatto per applicazioni basate su serie temporali lunghe. [4]



**Figura 2.2:** Uno dei due satelliti Sentinel-1 in orbita

ESA/ATG medialab (2014), *Sentinel-1*

- **Copernicus Sentinel-2**

- Anche qui è presente una coppia di Satelliti gemelli Sentinel-2 A e Sentinel-2 B lanciati rispettivamente il 22 giugno 2015 e il 7 marzo 2017. I due satelliti, in orbita polare, sono posizionati nella stessa orbita sincrona con il sole, sfasati di 180° l'uno rispetto all'altro. La loro finalità è monitorare la variabilità delle condizioni della superficie terrestre, e la loro ampia larghezza di scansionamento (290 km) e l'alto tempo di revisita (10 giorni all'equatore con un satellite, e 5 giorni con 2 satelliti in condizioni senza nuvole, che si traducono in 2-3 giorni alle latitudini medie) supporteranno il monitoraggio dei cambiamenti della superficie terrestre. [5]



**Figura 2.3:** Uno dei due satelliti Sentinel-2 in orbita

ESA / ATG medialab (2015), *Sentinel-2*

- **Copernicus Sentinel-3**

- Così come i predecessori, la missione è composta da due satelliti gemelli Sentinel-3 A e Sentinel-3 B sono stati lanciati rispettivamente il 16 febbraio 2016 e il 25 aprile 2018. Il principale obiettivo di Sentinel-3 è misurare con alta precisione e affidabilità la topografia della superficie del mare, la temperatura della superficie del mare e della terra e il colore della superficie oceanica e terrestre, al fine di supportare i sistemi di previsione oceanica, il monitoraggio ambientale e il monitoraggio del clima. L'EUMETSAT gestisce i satelliti e si occupa della missione marittima, mentre l'ESA si occupa della missione terrestre.[6]



**Figura 2.4:** Uno dei due satelliti Sentinel-3 in orbita

ESA / ATG medialab (2016), *Sentinel-3 solar array*

- **Copernicus Sentinel-4**

- A differenza degli altri satelliti sopraccitati, Sentinel-4 non è ancora stato lanciato ed un suo lancio è previsto per settembre 2024. Nonostante ciò, l'obiettivo della missione sarà quello di monitorare i principali gas traccia e aerosol di qualità dell'aria sopra l'Europa a supporto del servizio di monitoraggio dell'atmosfera Copernicus (CAMS) con una risoluzione spaziale elevata e un tempo di rivisitazione rapido. [7]

- **Copernicus Sentinel-5P**

- Lanciato il 13 ottobre 2017, impiega il suo strumento spettrometrico denominato Tropomi (TROPOspheric Monitoring Instrument) per analizzare la composizione dell'atmosfera e identificare la presenza di vari componenti come l'ozono, il metano, il formaldeide, il monossido di carbonio, il biossido di azoto e l'anidride solforosa. [8]



**Figura 2.5:** Sentinel-5P in orbita

ESA/ATG medialab (2017), *Sentinel-5P*

- **Copernicus Sentinel-5**

- Differentemente dagli altri "fratelli", Sentinel-5 consiste in un singolo strumento, cioè, uno spettrometro UV-VIS-NIR-SWIR, che osserva la Terra in

modalità nadir con un'ampia larghezza di banda2. Questo strumento sarà trasportato sul satellite MetOp-SG A. [9]

- **Copernicus Sentinel-6 Michael Freilich**

- La missione Copernicus Sentinel-6 è composta da due satelliti identici che vengono lanciati in sequenza e sono progettati per fornire misurazioni quasi in tempo reale delle altezze della superficie del mare, dell'altezza significativa delle onde e della velocità del vento, al fine di supportare l'oceanografia operativa e il monitoraggio del clima. Il primo satellite, Copernicus Sentinel-6 Michael Freilich, è stato lanciato il 21 novembre 2020 su un razzo SpaceX Falcon 9 da Vandenberg, in California, USA. Il secondo satellite Sentinel-6B, dovrebbe essere lanciato circa cinque anni dopo il primo. Entrambi i satelliti operano in un'orbita non sincronizzata con il sole, il che significa che la loro posizione rispetto al sole non cambia nel tempo. Questo tipo di orbita consente ai satelliti di osservare le stesse aree della Terra in momenti diversi della giornata, fornendo una copertura costante e dettagliata delle variazioni oceaniche nel tempo. [10]



**Figura 2.6:** Sentinel-6 Michael Freilich in orbita

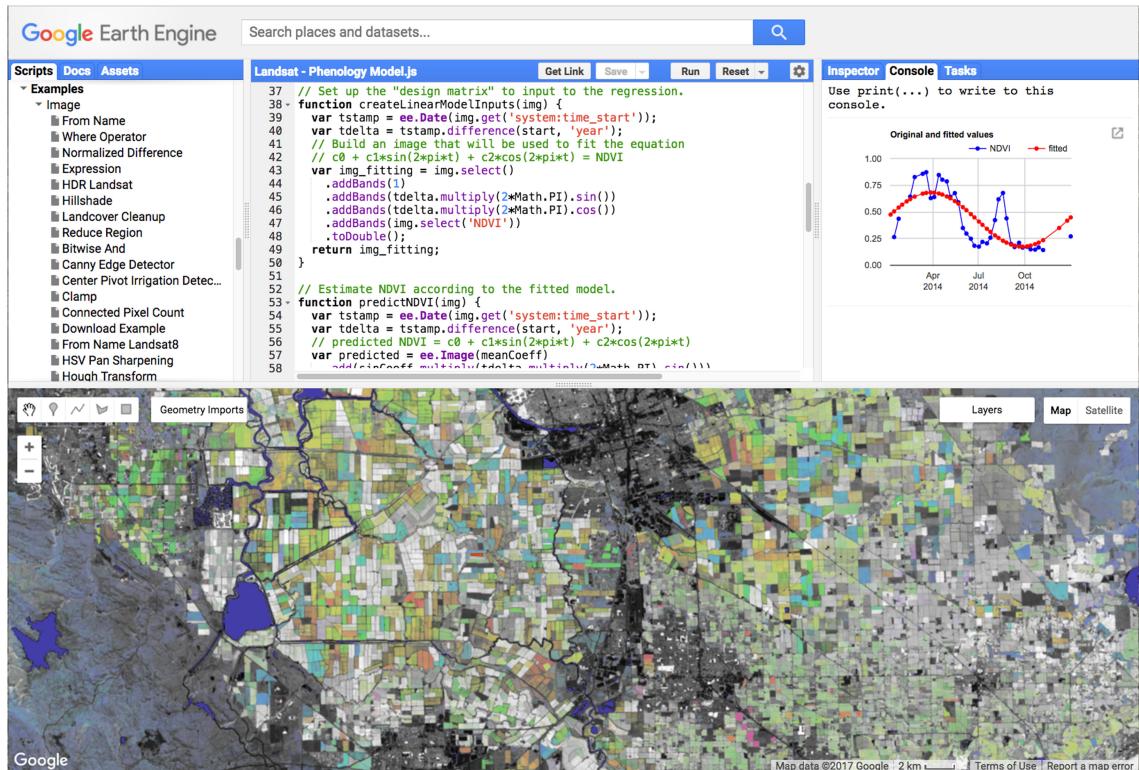
ESA / ATG medialab (2020), *Sentinel-6: charting sea level for Copernicus*

In conclusione, i satelliti del progetto Copernicus rappresentano una rete sofisticata e integrata di strumenti spaziali progettati per osservare e monitorare la Terra da varie prospettive. Ognuno di questi satelliti, ha un ruolo specifico nell'acquisizione di dati cruciali per la comprensione dei processi ambientali, climatici e geologici che influenzano il nostro pianeta. Grazie alla loro capacità di fornire dati accurati e affidabili su scala globale e a intervalli temporali regolari, i satelliti Copernicus sono strumenti essenziali per monitorare i cambiamenti globali, prevedere eventi meteorologici estremi, gestire le risorse naturali e rispondere in modo efficace ai disastri naturali.

## 2.4 Google Earth Engine

Nella precedente sezione si è introdotto un approccio di osservazione della Terra da un punto di vista "tangibile", in quanto gli strumenti utilizzati sono di natura fisica. Tuttavia, con l'avanzare della tecnologia, anche il lato software svolge una fondamentale parte sia nella vita di tutti i giorni, sia in progetti di rilevanza mondiale. Basti pensare che già nel lontano 20 luglio 1969, data storica ricordata per l'allunaggio dell'Apollo 11, i computer di bordo, due per la precisione, svolsero un lavoro cardinale sia per gli apparati di bordo che per l'esecuzione di calcoli di rotta, che non potevano essere svolti sulla Terra. La mente dietro il software installato sulle due macchine era quella Margaret Hamilton, considerata precorritrice dell'importanza del software su scala globale.

A conferma di quanto detto, il team di Google, il 2 dicembre 2010, rilascia Google Earth Engine, una piattaforma cloud per l'analisi e la visualizzazione di dataset geospaziali. Il tool si basa su un code editor online, nel quale gli utenti hanno la possibilità di scrivere codice JavaScript per interagire con i dataset (oltre 90 petabyte di immagini satellitari pronte per l'analisi e oltre 1000 set di dati geospaziali selezionati) consentendo di comprendere i cambiamenti della Terra rilevanti per i loro obiettivi di sostenibilità.



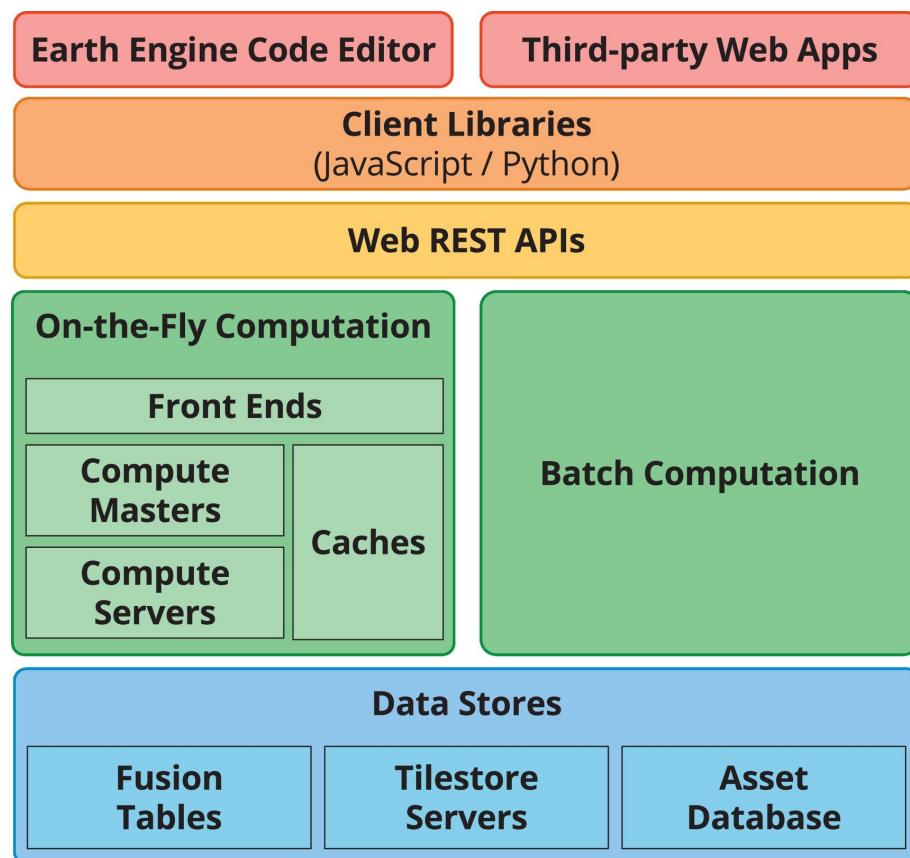
**Figura 2.7:** Il code editor di Google Earth Engine

Google, *The Earth Engine interactive development environment*

### 2.4.1 L'architettura

Il code editor di Earth Engine e le applicazioni di terze parti utilizzano librerie client per inviare query interattive o batch al sistema tramite un'API REST. Le richieste on-the-fly sono gestite da server Front End che inoltrano sottoquery complesse a Compute Masters, i quali si occupano della distribuzione del calcolo tra un pool di Compute Servers. Il sistema batch opera in modo simile, ma utilizza FlumeJava per gestire la distribuzione. A supporto di entrambi i sistemi di calcolo vi sono una serie di servizi dati, tra cui un Database delle Risorse che contiene i metadati per immagine e fornisce capacità di filtraggio efficienti. Il software di gestione del cluster Borg gestisce ogni componente del sistema e ogni servizio è bilanciato sul carico su più lavoratori. Il fallimento di un singolo lavoratore comporta semplicemente la ripetizione della query da parte del chiamante. Le query ad Earth Engine si basano sulla composizione e valutazione funzionale. Gli utenti costruiscono le interrogazioni concatenando operazioni tratte dalla libreria di Earth Engine, che conta più di 800 funzioni, che vanno dalla semplice funzione matematica alle potenti operazioni

geostatistiche, di machine learning e di elaborazione delle immagini. La libreria semplifica l'espressione delle operazioni tra immagini utilizzando una forma di algebra delle immagini e supporta le funzioni di ordine superiore: map() e iterate() consentono di applicare funzioni arbitrarie a collezioni di immagini, mentre reduce() viene utilizzata per calcolare risultati statistici in una varietà di contesti, inclusi quelli regionali, a finestra scorrevole, temporali, spettrali e colonna. [11]



**Figura 2.8:** Una versione semplificata dell'architettura di Google Earth Engine

*Google, A simplified system architecture diagram*

## 2.4.2 Casi d'uso

Google Earth Engine viene utilizzato in una vasta gamma di casi d'uso che spaziano dalle scienze ambientali e climatiche alla gestione delle risorse naturali, dal monitoraggio delle catastrofi naturali alla pianificazione urbana e agricola.

- Monitoraggio ambientale e climatico

- Earth Engine offre agli scienziati ambientali e climatici gli strumenti per monitorare e analizzare i cambiamenti ambientali su larga scala. Ad esempio, consente di monitorare la deforestazione, i cambiamenti nella copertura terrestre, la perdita di biodiversità e il cambiamento climatico attraverso l'analisi di dati satellitari storici e in tempo reale.

- **Agricoltura**

- Gli agricoltori e gli esperti di sicurezza alimentare utilizzano Earth Engine per ottimizzare la produzione agricola, monitorare la salute delle colture, prevedere rese e identificare aree a rischio di siccità o carestia. L'analisi dei dati satellitari può fornire informazioni preziose per la gestione sostenibile delle risorse agricole e la sicurezza alimentare.

- **Pianificazione territoriale ed urbana**

- Le autorità locali e gli urbanisti utilizzano Earth Engine per analizzare l'espansione urbana, monitorare i cambiamenti nell'uso del suolo, valutare l'efficacia delle politiche di pianificazione e prevedere il rischio di catastrofi naturali nelle aree urbane.

- **Monitoraggio e prevenzione delle catastrofi naturali**

- Durante eventi come incendi, inondazioni, terremoti e uragani, Earth Engine fornisce informazioni in tempo reale per supportare le operazioni di soccorso e ripristino. L'analisi delle immagini satellitari può aiutare a valutare l'estensione dei danni, individuare aree colpite e coordinare le operazioni di assistenza.

# CAPITOLO 3

---

## La realizzazione di mappe su indici biofisici con una libreria JavaScript

---

La generazione di mappe basate su determinati indici biofisici, come il NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), il BUI (Built-Up Index), e altri, rappresenta un processo cruciale nell'ambito dell'analisi delle immagini satellitari e della comprensione delle dinamiche ambientali. Questi indici forniscono informazioni dettagliate sulla salute della vegetazione, la presenza di aree urbanizzate, l'umidità del suolo e altri parametri rilevanti per la gestione delle risorse naturali e la valutazione degli ecosistemi.

Il processo di generazione di queste mappe coinvolge una serie di operazioni, che vanno dalla pre-elaborazione dei dati satellitari alla applicazione di algoritmi specifici per calcolare gli indici desiderati.

In questo capitolo si propone un'analisi dettagliata della progettazione e implementazione di una libreria JavaScript per Google Earth Engine, finalizzata alla generazione efficiente di mappe basate su una vasta gamma di indici biofisici. Questa libreria offre un insieme di funzioni mirate al calcolo e la visualizzazione di indici quali NDVI, BUI, ed altri, consentendo agli utenti di condurre analisi ambientali avanzate con facilità e precisione.

### 3.1 Gli indici geofisici oggetto di studio

L’analisi geofisica sfrutta una serie di parametri e indicatori per comprendere e valutare le condizioni fisiche della Terra e dei suoi sistemi ambientali. Gli indici geofisici rappresentano uno strumento essenziale in questo contesto, fornendo misure quantitative di varie caratteristiche della superficie terrestre e dei processi geofisici che vi si verificano. Questi indici, derivati da dati acquisiti da sensori satellitari o da altre fonti di osservazione remota, consentono di analizzare e interpretare una vasta gamma di fenomeni geologici, idrologici, atmosferici e ambientali.

I principali indici geofisici moderni si dividono per tematica (vegetazione, risorse idriche e urbane) e sono:

- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**

- L’Indice di Differenza Normalizzata di Vegetazione, è un importante strumento utilizzato nell’ambito agricolo e ambientale per valutare la salute della vegetazione, prevedere la produttività agricola e mappare la desertificazione. Questo indice standardizzato aiuta a rappresentare la biomassa relativa, basandosi sull’associazione tra i tassi di NDVI e la densità della vegetazione. La sua formula di calcolo si basa su due bande multispettrali: la luce rossa (R) e il vicino infrarosso (NIR). La differenza normalizzata tra queste bande è ciò che consente agli esseri umani di percepire le foglie come verdi, poiché riflettono meno nel NIR rispetto alla luce rossa. Le foglie diventano gialle nel NIR e riflettono meno a causa di piante malate, stress idrico o morte. [12]

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

I valori di una mappa NDVI variano da -1 a +1 e riflettono la densità della vegetazione. Valori più alti indicano vegetazione densa e sana, mentre valori più bassi indicano superfici non vegetate. La mappa può essere utilizzata per distinguere diverse tipologie di copertura del suolo e monitorare cambiamenti nell’uso del suolo nel tempo.

- **EVI (Enhanced Vegetation Index)**

- L'Indice di Vegetazione Potenziato è un indice vegetazionale avanzato progettato con una maggiore sensibilità alla biomassa, al fondo atmosferico e alle condizioni del suolo. È considerato una versione modificata dell'NDVI con un alto potenziale di monitoraggio della vegetazione mediante la correzione di tutti i rumori esterni.

Di recente, l'EVI si è dimostrato essere una tecnica efficiente nel rilevamento dei cambiamenti della vegetazione e nella derivazione delle caratteristiche biofisiche della copertura vegetale di una particolare regione. Caratteristiche luminose come nuvole e edifici bianchi, insieme a caratteristiche scure come l'acqua, possono causare valori anomali dei pixel in un'immagine EVI.

L'EVI utilizza le bande blu (B), rossa (R) e del vicino infrarosso (NIR). Incorpora inoltre, delle costanti  $G = 2.5$ ,  $L = 1$  (per regolare lo sfondo del baldacchino),  $C1 = 6$  e  $C2 = 7.5$  (per compensare gli effetti dell'atmosfera sull'acquisizione dei dati da parte del sensore).

Questi miglioramenti consentono il calcolo dell'indice riducendo il rumore di fondo, il rumore atmosferico e la saturazione nella maggior parte dei casi. [13]

$$EVI = \frac{2.5 \times (NIR - R)}{(NIR + 6 \times R - 7.5 \times B + 1)}$$

Il valore dell' EVI varia da 0 a 1. Un valore più vicino a 1 rappresenta una vegetazione sana e un valore più vicino a 0 rappresenta una vegetazione non sana.

- **LSWI (Land Surface Water Index)**

- L'Indice di Superficie Terrestre dell'Acqua utilizza le regioni dello spettro elettromagnetico nel vicino infrarosso (NIR) e nell'infrarosso a onde corte (SWIR). Nel SWIR vi è un'assorbimento significativo della luce da parte dell'acqua liquida, e il LSWI è noto per essere sensibile alla quantità totale di acqua liquida nella vegetazione e nel suolo circostante. Questo indice fornisce informazioni utili sulla presenza e sulla distribuzione dell'acqua

sulla superficie terrestre, ed è particolarmente efficace nel rilevare cambiamenti nella copertura terrestre causati dall'acqua, come zone umide o cambiamenti stagionali nella vegetazione. [14]

$$LSWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

I valori del LSWI possono variare da -1 a +1, dove i valori positivi, vicini a +1 indicano una maggiore presenza di acqua. I valori intorno a 0 possono indicare una minore differenza tra le bande del NIR e del SWIR, il che potrebbe significare una presenza limitata o nulla di acqua. Infine i valori che si avvicinano a -1 suggeriscono la presenza di superfici non acquose come terreni o costruzioni

- **MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)**

- Il Modified Normalized Difference Water Index è in grado di migliorare le caratteristiche dell'acqua aperta mentre sopprime in modo efficiente e talvolta elimina il rumore derivante da zone urbanizzate, vegetazione e suolo. Questo indice è una versione modificata del NDWI e presenta vantaggi significativi nella riduzione del rumore derivante da aree urbanizzate, rendendolo più adatto per l'identificazione e l'estrazione delle informazioni sull'acqua in aree con una presenza predominante di zone urbanizzate sullo sfondo. La formula si basa sulla differenza normalizzata tra le bande della luce verde (G) e quella dell'infrarosso a onde corte (SWIR) [15]

$$MNDWI = \frac{G - SWIR}{G + SWIR}$$

Anche in questo indice i valori variano tra -1 e 1 dove i valori vicini a +1 indicano una maggiore presenza di acqua aperta, con un minimo assorbimento della luce nell'infrarosso a onde corte (SWIR). I valori neutri suggeriscono una presenza equilibrata di acqua e di altri materiali presenti nella scena, come terreno o vegetazione mentre valori negativi indicano un'elevata assorbanza della luce nella banda del SWIR, tipica di materiali diversi dall'acqua, come terreno o strutture urbanizzate.

- **NDBI (Normalized Difference Built-up Index)**

– L'NDBI è un indice utilizzato nel telerilevamento per mappare le densità edificatorie e distinguere tra aree costruite e non costruite. Involge l'analisi delle immagini satellitari per separare le regioni edificate dalle aree non sviluppate sfruttando le differenze nella riflettanza spettrale delle aree urbane. Il NDBI è fondamentale per la pianificazione urbana e il monitoraggio dei cambiamenti nei centri abitati, poiché fornisce una misura quantitativa del grado di urbanizzazione in una determinata area. L'accuratezza del NDBI nell'identificare le aree edificate può superare l'80%, indicando un'alta precisione nella mappatura delle densità edificatorie. Il calcolo di questo indice sfrutta la differenza normalizzata tra la banda dell'infrarosso a onde corte (SWIR) e quella del vicino infrarosso (NIR).

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

Anche per questo indice i valori vanno da -1 a 1. Valori elevati indicano che le aree edificate e valori bassi mostrano le altre regioni.

- **TDVI (Transformed Difference Vegetation Index)**

– Questo indice è stato sviluppato come un nuovo indice vegetazionale che mostra la stessa sensibilità dell'Indice di Vegetazione Corretto per il Suolo (SAVI) alle proprietà ottiche del suolo nudo sottostante alla copertura vegetale. Rispetto al NDVI e al SAVI, il TDVI non satura e mostra un'eccellente linearità in funzione del tasso di copertura vegetale. Questa valutazione è stata condotta mediante misurazioni spettro-radiometriche sopra una copertura forestale con diversi gradi di defogliazione, un campo di cotone con varie percentuali di copertura e diversi suoli nudi con varie proprietà ottiche. [16] In termini generali la formula è la seguente, anche se in base al sensore di utilizzo ci possono essere delle variazioni.

$$TDVI = 1.5 \times \left( \frac{NIR - RED}{2 \times NIR + RED + 0.5} \right)$$

Il range di valori di un'immagine TDVI può variare in base al tipo di bande utilizzate e al sensore. In generale i valori stanno tra 0 e +1, dove man mano che ci si avvicina a +1, ci sarà una maggiore presenza di vegetazione o una maggiore attività fotosintetica.

- **CMR (Clay Minerals Ratio)**

- Il CMR è dato da un rapporto tra le bande SWIR1 (infrarosso a onde corte 1) e SWIR2 (infrarosso a onde corte 2). Questo rapporto sfrutta il fatto che i minerali idrati come le argille e l'alunite assorbono la radiazione nella porzione dello spettro compresa tra 2.0 e 2.3 micron.

$$CMR = \frac{SWIR1}{SWIR2}$$

- **CIgreen (Green Chlorophyll Index)**

- L'indice di clorifilla verde viene usato per identificare una vasta gamma di specie vegetali. L'indice viene calcolato come rapporto della riflettanza della clorofilla nella banda vicino infrarosso (NIR) rispetto alla riflettanza nella banda verde (G). [17]

Questa formula confronta la riflettanza della clorofilla nella banda NIR con quella nella banda verde, sottraendo 1 dal risultato per normalizzare il valore dell'indice.

$$GIgreen = \frac{NIR}{G} - 1$$

- **MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index)**

- Come si è visto gli indici vegetali identificano zone dove vi è una densa massa vegetale, tuttavia quando i campi vengono seminati questi non risultano carichi di vegetazione, in quanto le piante fin quando non cresceranno non emetteranno radiazioni utili ai sensori. A risolvere il problema c'è l'MSAVI che, come detto, è particolarmente utile durante le fasi di germinazione e sviluppo delle foglie, quando c'è molto terreno nudo tra le

piantine. La formula per il calcolo dell'indice è la seguente e coinvolge le bande del vicino infrarosso (NIR) e del rosso (R).

$$MSAVI = \frac{(2 \times NIR + 1) - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - R)}}{2}$$

I valori MSAVI vanno da -1 a 1, dove:

- \* -1 a 0.2 indica terreno nudo;
- \* 0.2 a 0.4 è la fase di germinazione del seme;
- \* 0.4 a 0.6 è la fase di sviluppo delle foglie Quando i valori superano 0.6, è il momento di applicare l'NDVI, in quanto, la vegetazione è abbastanza densa da coprire il suolo. [18]

- **NBR (Normalized Burn Ratio)**

- Il Normalized Burn Ratio è un indice progettato per evidenziare le aree bruciate in grandi zone colpite da incendi. La formula è simile a quella del NDVI, tranne per il fatto di combinare l'uso sia delle lunghezze d'onda del vicino infrarosso (NIR) che dell'infrarosso a onde corte (SWIR).

La vegetazione sana mostra una riflettanza molto elevata nel NIR e una bassa riflettanza nella porzione SWIR dello spettro: l'opposto di quanto osservato nelle aree devastate dal fuoco. Le aree recentemente bruciate mostrano una bassa riflettanza nel NIR e una alta riflettanza nella SWIR, ovvero la differenza tra le risposte spettrali della vegetazione sana e delle aree bruciate raggiunge il massimo nelle regioni NIR e SWIR dello spettro. [19]

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

I valori hanno un range che va da -1 a +1. Valori positivi indicano una vegetazione sana. Valori neutri indicano aree non colpite da incendi, mentre valori negativi indicano zone recentemente bruciate o terreno nudo.

- **BUI (Built-Up Index)**

- Quest'indice è utilizzato nel telerilevamento per identificare e mappare le aree urbane o edificate nelle immagini satellitari. Si concentra sul rilevamento delle aree densamente sviluppate e urbanizzate, fornendo informazioni cruciali per la pianificazione urbana, il monitoraggio delle aree urbane e la valutazione dei cambiamenti nell'uso del suolo. La formula generale è data dalla differenza tra l'NDBI e l'NDVI, tuttavia queste come altre formule sono approssimazioni e possono non essere perfette per ogni scenario di urbanizzazione.

$$BUI = NDBI - NDVI$$

[20]

I valori del BUI possono variare da 0 a 1, dove valori vicini a 0 indicano aree non urbanizzate o coperte da vegetazione, mentre valori vicini a 1 indicano aree densamente urbanizzate o coperte da costruzioni.

In conclusione, gli indici biofisici offrono una serie di vantaggi nell'analisi geofisica, consentendo una valutazione dettagliata e quantitativa delle condizioni della Terra e dei suoi sistemi ambientali. Tra i principali vantaggi si annovera la capacità di fornire misure oggettive e quantitative, facilitando così la comparazione e l'interpretazione dei dati su larga scala. Tuttavia, è importante notare che gli indici biofisici possono presentare anche alcuni svantaggi, tra cui la dipendenza dalla disponibilità e qualità dei dati di input, nonché la sensibilità a variazioni ambientali e condizioni di osservazione. Inoltre, la precisione degli indici biofisici può variare notevolmente a seconda del contesto ambientale e delle condizioni di studio, rendendo essenziale un'analisi critica dei risultati ottenuti. Pertanto, è fondamentale utilizzare gli indici biofisici con cautela e considerare attentamente i loro limiti e potenziali fonti di errore nell'interpretazione dei risultati.

## 3.2 Nascita della libreria

Lo sviluppo della libreria è nato dalla collaborazione tra il dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale e quello di Informatica dell'Università degli studi di

Salerno. Il professore Michele Grimaldi ed il suo tesista svolgevano un lavoro di ricerca sull'applicazione di indici biofisici sul territorio locale e cercavano un sistema diverso dall'ambiente QGIS per ottenere mappe tematizzate su indici biofisici. Il motivo della collaborazione con il Dipartimento di Informatica nasce dall'esigenza di generare un numero elevato di mappe (immagini raster) in un tempo accettabile, dato che l'uso di QGIS richiedeva tempi abbastanza lunghi, perciò durante l'attività di tirocinio con la professoressa Monica Sebillo si è iniziato a lavorare ad un sistema che risolvesse il problema proposto.

La prima fase si è concentrata nell'individuare gli indici più rilevanti ed utili per fare analisi fisica e civile dell'area di studio. Durante gli incontri svolti nei laboratori dei rispettivi dipartimenti (Laboratorio di Sistemi Informativi Geografici e Laboratorio del Gruppo di Tecnica e Pianificazione Urbanistica) si è deciso di concentrarsi sugli indici precedentemente elencati perchè necessari per ottenere le informazioni primarie (vegetazione, permeabilità del terreno e urbanizzazione) del nostro pianeta. Di conseguenza da parte del prof. Grimaldi e del suo tesista c'è stata una ricerca nel trovare le formule corrette e le relative bande da applicare affinchè il calcolo degli indici e delle mappe risultasse corretto.

Successivamente il professore Grimaldi ed il suo team hanno trovato in un articolo cinese uno studio che si concentrava su alcuni di questi indici applicati alla città di Shanghai e l'implementazione avveniva tramite uno script di Google Earth Engine. Da quel momento si è deciso di adottare Google Earth Engine come strumento di risoluzione alla necessità sopra elencate ed è cominciato il lavoro di sviluppo della libreria.

Per ogni indice era richiesto il calcolo e la generazione della mappa in media e in varianza dei pixel che la componevano, così durante il lavoro di tirocinio, la libreria è stata sviluppata in modo che questa potesse essere accessibile anche a non programmati/informatici, in quanto gli utenti finali erano ingegneri civili-ambientali o analisti del territorio. Pertanto, da parte mia e della professoressa Sebillo ci si è concentrati sul rendere la libreria di facile utilizzo semplificando il numero di righe di codice che l'utente è costretto a scrivere affinchè possa sfruttare il sistema correttamente e in tutte le sue funzionalità.

Infine è stata realizzata una classificazione per ogni indice, che verrà approfondita

nella sottosezione 3.3.3.

### **3.3 bphindex.js**

"bphindex.js" (bio-physical indices) è una libreria JavaScript per la piattaforma Google Earth Engine che consente una rapida generazione di immagini raster per lo studio di aree sugli indici biofisici che prima sono stati descritti.

#### **3.3.1 Il dataset COPERNICUS/S2**

Come fonte di dati, in questo caso immagini satellitari, è stato utilizzato per tutti gli indici il dataset Google Earth Engine COPERNICUS/S2, che contiene immagini satellitari della missione Sentinel-2. Le immagini includono diverse bande spettrali, che coprono le lunghezze d'onda dal visibile all'infrarosso prossimo. Queste bande sono utilizzate per monitorare varie caratteristiche della superficie terrestre, tra cui la vegetazione, l'uso del suolo, la copertura nuvolosa, l'acqua, l'inquinamento e altro ancora.

Nome	Dimensione Pixel	Descrizione
B1	60 metri	Aerosols
B2	10 metri	Blu
B3	10 metri	Verde
B4	10 metri	Rosso
B5	20 metri	Red Edge 1
B6	20 metri	Red Edge 2
B7	20 metri	Red Edge 3
B8	10 metri	NIR
B8A	20 metri	Red Edge 4
B9	60 metri	Water vapor
B11	20 metri	SWIR1
B12	20 metri	SWIR2

**Tabella 3.1:** Tabella delle principali bande delle immagini Sentinel-2

[21]

### 3.3.2 L'implementazione

Le funzioni della libreria utilizzano innanzitutto una funzione di filtraggio delle immagini Sentinel-2, che ritorna una collezione di immagini satellitari filtrata per area di interesse `roi`, un range temporale `startDate`, `endDate` e copertura nuvolosa inferiore o uguale ad una percentuale che viene specificata come parametro intero `cloudCover`.

---

```

1 //funzione di filtraggio dati Sentinel-2
2 function filterFromSentinel2(roi, startDate, endDate, cloudCover) {
3   var S2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2")
4     .filterBounds(roi) //filtro l'ImageCollection per area di interesse
5     .filterDate(startDate, endDate) //per data
6     .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', cloudCover));
7     //per percentuale nuvolosa <= a un valore intero
8
9   return S2;

```

---

10 }

---

Successivamente, per ogni indice vengono fornite tre funzioni: una per il calcolo dell'indice, una per la generazione di un'immagine dei pixel medi dell'indice e infine una per la generazione di un'immagine della varianza dei pixel dell'indice.

La funzione di calcolo dell'indice (per tutti gli esempi verrà utilizzato l'NBR) avviene nel seguente modo:

- 2: La funzione calculateNBR accetta una collezione di immagini Sentinel-2 come input;
- 4: La funzione itera su ciascuna immagine nella collezione utilizzando il metodo `.map()`;
- 5-6: Per ogni immagine, la funzione seleziona le bande necessarie per il calcolo dell'NBR, cioè il corto infrarosso 2 (SWIR2) e il vicino infrarosso (NIR);
- 9-15: Viene calcolato l'NBR per l'immagine corrente utilizzando la formula standard e poi il risultato viene rinominato come 'NBR' e restituito come parte di una nuova collezione di immagini contenente solo l'NBR calcolato per ciascuna immagine;
- 17: La funzione restituisce infine la collezione contenente tutti i valori NBR calcolati per ogni immagine.

---

```

1 //funzione che calcola il Normalized Burn Radio (NBR)
2 function calculateNBR(sentinelImages) {
3     // Calcola l'NBR per ogni immagine nella collezione
4     var nbrCollection = sentinelImages.map(function (image) {
5         var swir2 = image.select('B12'); // Banda del corto infrarosso 2
6         var nir = image.select('B8'); // Banda del vicino infrarosso
7
8         // Calcola l'indice NBR
9         var nbr = image.expression(
10             '(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)', {
11                 'SWIR2': swir2,
12                 'NIR': nir,
13             }).rename('NBR');

```

```

14     return nbr;
15   } );
16
17   return nbrCollection;
18 }

```

---

Per quanto riguarda la generazione di immagini sui pixel medi di un'indice, viene definita la seguente funzione:

- 2: La funzione `generateSentinelNBR_mean` richiede vari parametri, tra cui l'area di interesse `roi`, l'intervallo temporale di interesse (`startDate`, `endDate`), la percentuale di copertura nuvolosa `cloudCover` e la visibilità della legenda `legendVisibility`;
- 5: La funzione chiama `filterFromSentinel2` per filtrare le immagini Sentinel-2 in base ai parametri forniti;
- 7: Viene quindi chiamata la funzione `calculateNBR` per calcolare l'NBR per ogni immagine nella collezione filtrata;
- 10-11: Dopo aver calcolato l'NBR, viene calcolata la media dell'NBR utilizzando il metodo `.mean()`. Viene anche rinominato come '`NBR_mean`' e clippato all'area di interesse;
- 13-20: Successivamente, l'NBR viene classificato in base ai valori in diverse fasce, utilizzando il metodo `.where()`. Questo assegna un valore numerico a ciascun pixel in base al suo valore di NBR;
- 23-34: Viene definita una lista di classi e colori corrispondenti per la visualizzazione della mappa;
- 37-43: Infine, la media dell'NBR e la classificazione dell'NBR vengono aggiunte alla mappa. Se `legendVisibility` è impostato su `true`, viene aggiunta una legenda alla mappa;
- La funzione restituisce due oggetti: `nbrClassified` che rappresenta l'NBR classificato e `nbrUnclassified` che rappresenta l'NBR non classificato.

---

```

1 // Funzione per calcolare l'NBR e la sua media utilizzando dati Sentinel-2
2 exports.generateSentinelNBR_mean = function (roi, startDate, endDate,
3   cloudCover, legendVisibility) {
4   // Filtra le immagini Sentinel-2
5   var sentinelImages = filterFromSentinel2(roi, startDate, endDate, cloudCover);
6
7   var nbrCollection = calculateNBR(sentinelImages);
8
9   // Calcola la media dell'NBR
10  var nbrMean = nbrCollection.mean().rename('NBR_mean');
11  var nbrClipped = nbrMean.clip(roi);
12
13  var nbrClass = ee.Image(0)
14    .where(nbrMean.gte(-1).and(nbrMean.lte(-0.30)), 1)
15    .where(nbrMean.gt(-0.30).and(nbrMean.lte(-0.15)), 2)
16    .where(nbrMean.gt(-0.15).and(nbrMean.lte(0.15)), 3)
17    .where(nbrMean.gt(0.15).and(nbrMean.lte(0.30)), 4)
18    .where(nbrMean.gt(0.30).and(nbrMean.lte(1)), 5);
19
20  nbrClass = nbrClass.clip(roi);
21
22  //lista delle classi e dei i rispettivi colori
23  var classes = [ '(-1) - (-0.30)' ,
24  '(-0.30) - (-0.15)' ,
25  '(-0.15) - 0.15' ,
26  '0.15 - 0.30' ,
27  '0.30 - 1' ];
28  var colors = [ 'black', 'red', 'orange', '#8cc751', '#008200' ];
29
30  var nbrMeanParams = {
31    min: 1,
32    max: 5,
33    palette: colors
34  };
35
36  // Aggiungi la media dell'NBR clippata alla mappa
37  Map.centerObject(roi);
38  Map.addLayer(nbrClipped, {min: -1, max: 1, palette: ['black', '7F055F',
39  'yellow']}, "S2-NBR Mean");
40  Map.addLayer(nbrClass, nbrMeanParams, "S2-NBR Mean Classified");
41
42  if(legendVisibility){
43    addLegend(classes, colors);
44  }
45
46  return {
47    nbrClassified: nbrClass,

```

```

48     nbrUnclassified: nbrClipped
49   };
50 };
51

```

---

La funzione `generateSentinelNBR_variance` opera in maniera simile alla funzione che calcola la media dell'NBR, ma applica un riduttore di varianza `nbrCollection.reduce(ee.Reducer.variance())` per ottenere una mappa della varianza dell'NBR. Questo approccio consente di valutare la variabilità spaziale dell'NBR all'interno dell'area di interesse, fornendo informazioni preziose sulla consistenza della risposta spettrale in seguito a eventi di incendio.

```

1 // Funzione per calcolare l'NBR e la sua varianza utilizzando dati Sentinel-2
2 exports.generateSentinelNBR_variance = function (roi, startDate, endDate,
3   cloudCover, legendVisibility) {
4   // Filtra le immagini Sentinel-2
5   var sentinelImages = filterFromSentinel2(roi, startDate, endDate, cloudCover);
6
7   var nbrCollection = calculateNBR(sentinelImages);
8
9   // Calcola la varianza dell'NBR
10  var nbrVariance = nbrCollection.reduce(ee.Reducer.variance())
11    .rename('NBR_variance');
12  var nbrClipped = nbrVariance.clip(roi)
13
14  var nbrClass = ee.Image(0)
15    .where(nbrVariance.gte(0).and(nbrVariance.lte(0.0003)), 1)
16    .where(nbrVariance.gt(0.0003).and(nbrVariance.lte(0.0091)), 2)
17    .where(nbrVariance.gt(0.0091).and(nbrVariance.lte(0.0180)), 3)
18    .where(nbrVariance.gt(0.0180).and(nbrVariance.lte(0.0269)), 4)
19    .where(nbrVariance.gt(0.0269).and(nbrVariance.lte(0.0357)), 5)
20    .where(nbrVariance.gt(0.0357), 6);
21
22  nbrClass = nbrClass.clip(roi);
23
24  //lista delle classi e dei i rispettivi colori
25  var classes = ['0 - 0.0003',
26    '0.0003 - 0.0091',
27    '0.0091 - 0.0180',
28    '0.0180 - 0.0269',
29    '0.0269 - 0.0357',
30    '> 0.0357'];
31  var colors = ['#008200', '#8cc751', '#D0F0C0', 'orange', 'red', 'black'];
32

```

---

```

33     var nbrVarianceParams = {
34         min: 1,
35         max: 6,
36         palette: colors
37     };
38
39     Map.centerObject(roi);
40     Map.addLayer(nbrClipped, {}, "S2-NBR Variance")
41     Map.addLayer(nbrClass, nbrVarianceParams, "S2-NBR Variance Classified");
42
43     if(legendVisibility == true){
44         addLegend(classes, colors);
45     }
46
47     return {
48         nbrClassified: nbrClass,
49         nbrUnclassified: nbrClipped
50     };
51 }
52

```

---

Infine, è definita la funzione `addLegend(classes, color)` che si occupa di aggiungere una semplice leggenda dei valori delle classi e dei corrispondenti colori all'interno dell'interfaccia grafica di Google Earth Engine.

---

```

1
2 //creo la leggenda delle classi
3 function addLegend(classes, colors){
4     //creo un pannello per la leggenda
5     var legend = ui.Panel({
6         style: {
7             position: 'bottom-right',
8             padding: '8px 15px',
9         }
10    });
11
12    for (var i = 0; i < classes.length; i++) {
13        //creo un pannello orizzontale per ogni classe
14        var classPanel = ui.Panel({
15            layout: ui.Panel.Layout.flow('horizontal')
16        });
17
18        var label = ui.Label(classes[i], {
19            margin: '0px 8px 15px 15px' //top, right, bottom, left
20        });

```

```

21
22     var colorBox = ui.Label({
23         style: {
24             backgroundColor: colors[i],
25             padding: '8px',
26             margin: '0 0 4px 0'
27         }
28     });
29
30     classPanel.add(colorBox).add(label);
31
32     legend.add(classPanel);
33 }
34
35 Map.add(legend);
36 }
```

---

### 3.3.3 Classificazione dei risultati

Come si è visto poc’anzi, sia per le mappe di media che di varianza, sono state fornite delle classificazioni, ottenute dalla collaborazione tra i due dipartimenti precedentemente descritti. Questo processo è stato fondamentale per consentire una visualizzazione e organizzazione dei dati calcolati.

Il processo di classificazione è iniziato con la definizione delle soglie di media e varianza degli indici, derivanti da un’analisi statistica approfondita dei dati raccolti. Grazie all’esperienza del professor Grimaldi e del suo team, è stato possibile determinare intervalli significativi per l’esempio fornito della varianza NBR, che riflettono variazioni reali nella vegetazione e nelle condizioni del terreno post-incendio.

Le classi definite sono state:

1. 0 - 0.0003
2. 0.0003 - 0.0091
3. 0.0091 - 0.0180
4. 0.0180 - 0.0269
5. 0.0269 - 0.0357

## 6. $> 0.0357$

Ogni intervallo rappresenta una specifica gamma di variazione dell’NBR, con implicazioni ecologiche differenti. Ad esempio, valori bassi di varianza (0 - 0.0003) indicano aree con una risposta spettrale molto uniforme, tipicamente non influenzate da eventi di incendio, mentre valori più alti ( $> 0.0357$ ) indicano aree con alta variabilità, spesso associate a terreni fortemente disturbati.

La classificazione e la visualizzazione dei dati attraverso queste soglie consentono una migliore interpretazione della mappa di varianza dell’NBR. L’uso di una palette di colori distinti per ogni classe facilita l’identificazione visiva delle diverse zone di varianza, permettendo agli analisti di comprendere rapidamente le aree di maggiore e minore consistenza nella risposta spettrale.

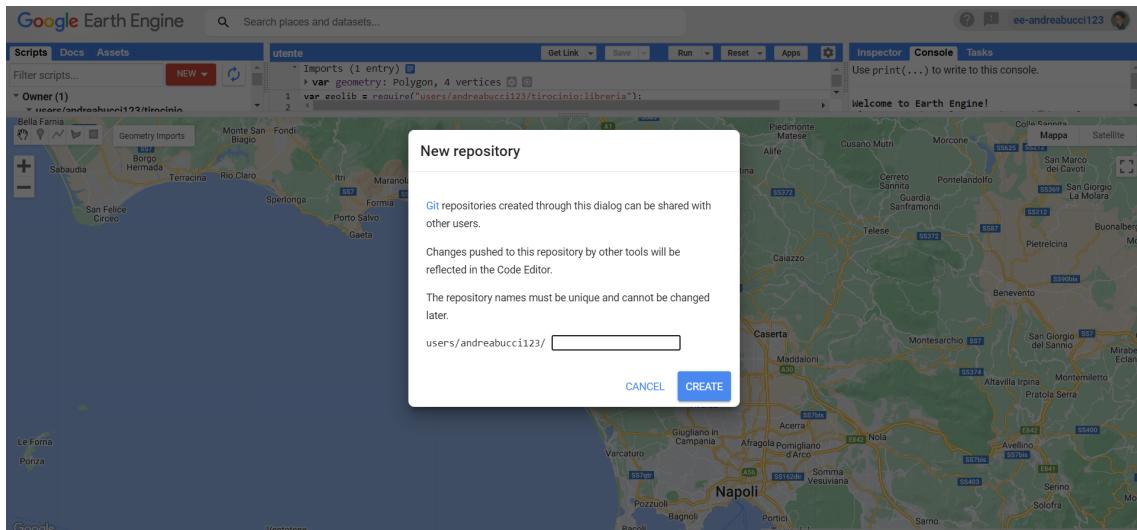
Inoltre, l’aggiunta di una legenda esplicativa contribuisce a rendere le mappe più intuitive e utilizzabili non solo da esperti del settore, ma anche da decisori politici e gestori del territorio, che possono così prendere decisioni riguardo alla gestione post-incendio.

Questa metodologia di classificazione e visualizzazione, sviluppata dalla collaborazione dei due dipartimenti, rappresenta un passo in avanti nel monitoraggio e nella gestione degli ecosistemi attraverso l’uso di tecnologie di remote sensing e strumenti geospaziali avanzati.

### 3.3.4 Utilizzo della libreria

Innanzitutto per poter usare la libreria, e di conseguenza Google Earth Engine è necessario possedere un account della relativa piattaforma. Una volta registrati, sarà necessario creare un nuovo progetto. Per far ciò basterà cliccare sul pulsante NEW nel container dei file in alto a sinistra e aperto il menù a tendina selezionare la voce Repository.

A questo punto è richiesto scaricare la libreria, che è reperibile al seguente url:  
[https://github.com/VanniMaceria/Tirocinio/blob/master/GEE\\_scripts/bphindex.js](https://github.com/VanniMaceria/Tirocinio/blob/master/GEE_scripts/bphindex.js). Successivamente l’utente dovrà creare due file, il primo conterrà il codice della libreria ed il secondo sarà lo script eseguibile dove potranno essere chiamate le funzioni. Anche in questo caso andrà premuto il pulsante NEW e questa



**Figura 3.1:** Creare una nuova repository su Google Earth Engine

volta si selezionerà la voce `File`; una volta nominati i file l'impostazione iniziale sarà terminata.

Selezionando il file eseguibile, per poter utilizzare la libreria sarà necessario importarla nel seguente modo

```
var bphindex = require("users/andreibucci123/tirocinio:libreria");
```

dove `require` è la funzione di import che accetta come parametro una stringa che si divide in:

- `users\nome_utente;`
- `nome_repository;`
- nome del file che contiene la libreria.

Il seguente codice mostra un tipico utilizzo della libreria:

- 1: import della libreria;
- 3-6: si sta definendo l'area di interesse, tuttavia, non è un'operazione necessaria farla come d'esempio in quanto Google Earth Engine mette a disposizione vari metodi per definire aree di interesse come l'utilizzo di shapefile, geometrie, etc.
- 8-9: tramite la variabile `bphindex`, viene chiamata la funzione

generateSentinelNBR\_mean che oltre a generare sull’interfaccia utente le immagini (classificata e non classificata), ritorna anche un oggetto che contiene le due immagini;

- 11: viene creata una variabile che conterrà l’immagine NBR classificata;
- 13-20: Google Earth Engine mette a disposizione anche una funzione per salvare le proprie immagini sul proprio Google Drive. Inserendo vari parametri si potranno personalizzare diverse caratteristiche come la scala, la cartella di salvataggio e altro.

---

```

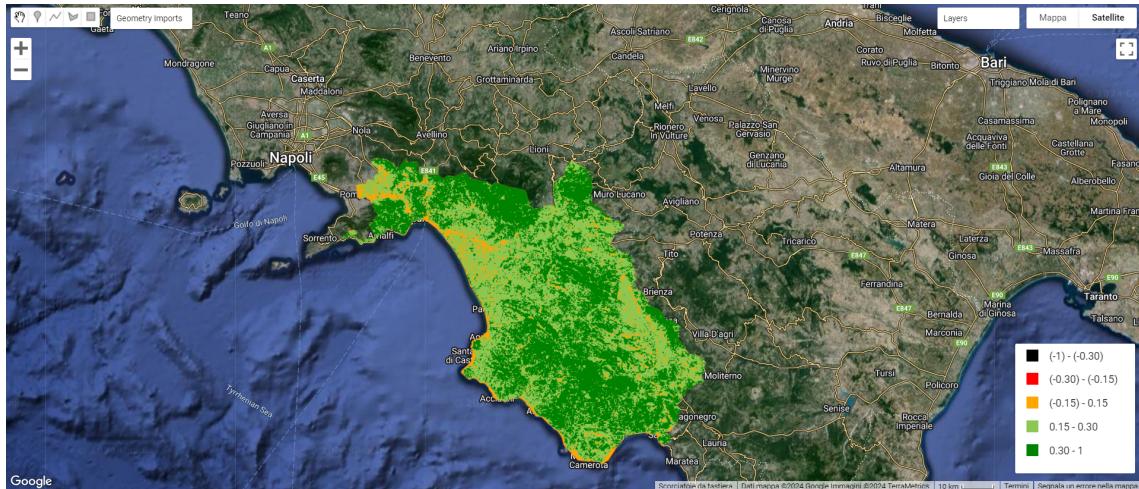
1 var bphindex = require("users/andreabucci123/tirocinio:libreria");
2
3 var salerno = ee.FeatureCollection('FAO/GAUL/2015/level2')
4   .filter(ee.Filter.eq('ADM1_NAME', 'Campania'))
5   .filter(ee.Filter.eq('ADM2_NAME', 'Salerno'));
6 var roi = salerno.geometry();
7
8 var img = bphindex.generateSentinelNBR_mean(roi, "2022-01-01", "2022-12-31",
9 10, true);
10
11 var classified = img.nbrClassified;
12
13 Export.image.toDrive({
14   image: classified,
15   description: "raster_provincia_salerno_NBR",
16   scale: 10,
17   folder: "GEE",
18   region: roi,
19   fileFormat: "GeoTIFF"
20 });

```

---

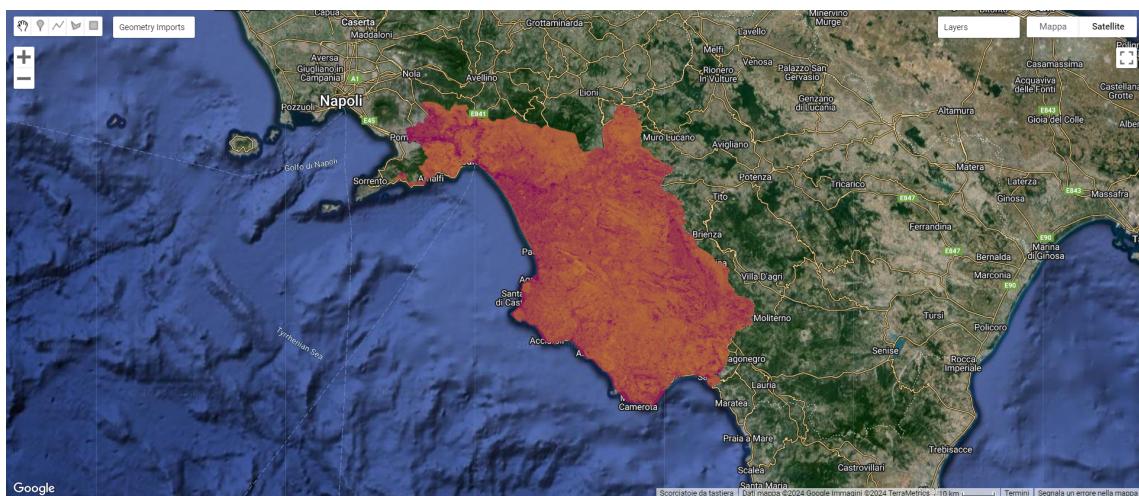
### 3.3.5 Visualizzazione dei risultati

Una volta eseguito lo script, attendendo un tempo relativamente breve, variabile in base alle condizioni di rete e alla dimensione di dati da dover processare (mappe più grandi necessiteranno di tempi più lunghi), verranno generate due immagini di questo tipo:



**Figura 3.2:** Immagine raster classificata dell’NBR medio sulla provincia di Salerno

La classificazione ottenuta evidenzia che la provincia di Salerno è caratterizzata da una vegetazione ricca e sana, con solo alcune aree che mostrano segni di incendi lievi, rappresentate in giallo. Tuttavia, è importante notare che anche alcune zone costiere sono classificate in giallo, non per la presenza di danni da incendi, ma piuttosto per la naturale assenza di vegetazione tipica delle aree litoranee. Questo sottolinea la necessità di analizzare attentamente i risultati con strumenti adeguati per evitare interpretazioni errate e garantire una comprensione accurata dei dati.



**Figura 3.3:** Immagine raster non classificata dell’NBR medio sulla provincia di Salerno

In questa immagine, i colori rappresentano una scala continua di valori NBR, dove ogni pixel è colorato in base al suo valore specifico su questa scala (la scala di colori usata è nero per valori tendenti al -1, viola per valori tendenti allo 0 e giallo

per valori prossimi a 1). L'approccio continuo permette di vedere la gradazione dei cambiamenti nel paesaggio, ma rende difficile distinguere chiaramente le aree in diverse condizioni ecologiche senza una legenda o un intervallo di classi ben definito.

# CAPITOLO 4

---

## Conclusioni e proposte future

---

Il presente capitolo conclude lo studio svolto, focalizzandosi sull’analizzare i risultati ottenuti e sul proporre sviluppi ed applicazioni future.

Il monitoraggio e l’analisi delle condizioni ambientali tramite l’uso di indici di vegetazione e altri indicatori spettrali è diventato un elemento cruciale per la gestione sostenibile delle risorse naturali e per la risposta alle emergenze ambientali. Questo lavoro di tesi ha approfondito l’uso di diversi indici derivati dai dati Sentinel-2 per la valutazione della vegetazione, dell’acqua, del suolo e delle aree urbanizzate, fornendo una panoramica completa delle loro applicazioni e metodologie.

### 4.1 Analisi dei risultati ottenuti

La libreria sviluppata e presentata rappresenta uno strumento potente e versatile per l’analisi e la visualizzazione di dati ambientali. L’uso di indici come l’NBR, l’NDVI, l’EVI, l’NDWI, il NDBI ed altri, consente l’ottenimento di una visione dettagliata e sfumata delle condizioni ambientali e dei cambiamenti nel paesaggio. Gli utenti finali, come ricercatori, pianificatori urbani, gestori di risorse naturali e responsabili delle politiche ambientali, possono beneficiare significativamente dalla libreria in diversi modi:

- **Monitoraggio ambientale**

- La libreria permette un monitoraggio continuo e dettagliato delle condizioni vegetative e ambientali. Ad esempio, l’NBR offre informazioni cruciali sui danni e il recupero post-incendio, mentre l’NDWI e il NDBI consentono di valutare le risorse idriche e le aree urbanizzate. Questi dati sono essenziali per la pianificazione e la gestione delle risorse naturali e per la risposta rapida agli eventi di emergenza;

- **Analisi spaziale dettagliata**

- Gli indici forniti permettono un’analisi spaziale dettagliata e l’individuazione di cambiamenti nel paesaggio a livello regionale e locale. Questo è particolarmente utile per studi di monitoraggio della vegetazione, gestione delle risorse idriche e pianificazione urbana;

- **Visualizzazione ed interpretazione**

- Le funzioni di classificazione e visualizzazione integrate nella libreria facilitano l’interpretazione dei dati spettrali. Le mappe classificate e non classificate forniscono una rappresentazione chiara e immediata delle condizioni ambientali, migliorando la comprensione e la comunicazione dei risultati;

## **4.2 Sviluppi e proposte future**

Per espandere ulteriormente le capacità della libreria e migliorare la sua utilità, potrebbe essere possibile svolgere un lavoro mirato ad implementare le seguenti proposte:

- **Integrazione del Machine Learning**

- Un’importante evoluzione futura della libreria potrebbe includere l’implementazione di algoritmi di machine learning per l’uso e analisi del suolo

terrestre. Tecniche come gli algoritmi di clustering potrebbero essere utilizzati per migliorare la classificazione automatica delle aree di interesse e per identificare pattern complessi nei dati. Questo potrebbe permettere una valutazione più precisa e dinamica delle condizioni ambientali, facilitando la previsione di cambiamenti e tendenze a lungo termine;

- **Espansione degli indici**

- La libreria potrebbe essere arricchita con ulteriori indici di vegetazione e parametri spettrali, come il Perpendicular Vegetation Index (PVI), simile ad un indice vegetativo che però è anche sensibile alle variazioni atmosferiche, ed il Standardized Water-Level Index (SWI), che misura il livello di prodondità delle acque. Questi indici potrebbero fornire informazioni rilevanti volte a migliorare ulteriormente l'analisi sulla vita delle piante e sulla siccità che sta affrontando il pianeta Terra;

- **Integrazione con altri dati**

- La libreria potrebbe essere estesa per integrare dati provenienti da altre fonti, come sensori a terra, dati meteorologici e modelli climatici. Questo permetterebbe un'analisi più completa e integrata delle condizioni ambientali, offrendo un quadro più dettagliato e accurato delle dinamiche ecologiche.

## 4.3 Pensieri finali

Il monitoraggio e l'analisi delle condizioni ambientali tramite l'uso di indici di vegetazione ed altri indicatori spettrali sono diventati strumenti indispensabili nella gestione sostenibile delle risorse naturali e nella risposta alle emergenze ambientali. Questa tesi ha esplorato in dettaglio l'uso di diversi indici derivati dai dati Sentinel-2, fornendo una panoramica completa delle loro applicazioni e metodologie. Attraverso la creazione e l'implementazione di una libreria su Google Earth Engine, questo lavoro ha permesso di integrare e automatizzare il calcolo di questi indici, migliorando significativamente l'efficienza e l'affidabilità delle analisi ambientali. La libreria

sviluppata rappresenta un piccolo contributo per l’immenso campo dell’osservazione della Terra. Essa non solo facilita l’accesso ai dati e la loro elaborazione, ma offre anche un’interfaccia user-friendly che permette anche agli utenti meno esperti di ottenere risultati rilevanti e ben strutturati. Con la sua capacità di calcolare e visualizzare indici spettrali chiave, la libreria fornisce strumenti preziosi per il monitoraggio della vegetazione, dell’acqua, del suolo e delle aree urbanizzate. L’accessibilità della libreria tramite Google Earth Engine consente agli utenti di sfruttare la potenza computazionale della piattaforma cloud di Google, eliminando le limitazioni di spazio e risorse che potrebbero influenzare le soluzioni locali. La facilità di utilizzo e l’integrazione con strumenti già disponibili nella piattaforma rendono la libreria un’opzione pratica e scalabile per una vasta gamma di applicazioni ambientali.

In conclusione, la libreria sviluppata è un passo in avanti nella scienza dell’osservazione della Terra. Offrendo strumenti avanzati per l’analisi degli indici spettrali e facilitando l’accesso e l’elaborazione dei dati satellitari, essa rappresenta una risorsa preziosa per la ricerca, la gestione ambientale e la pianificazione territoriale. Le sue potenzialità future, ampliate da tecnologie emergenti e nuove applicazioni, promettono di rafforzare ulteriormente il suo ruolo come strumento per comprendere e gestire il nostro ambiente in modo sostenibile ed informato.

---

## Bibliografia

---

- [1] M. Guerini. (2023) La mappa mundi babilonese è la più antica carta geografica del mondo: cosa rappresenta? [Online]. Available: <https://www.geopop.it/la-mappa-mundi-babilonese/> (Citato a pagina 3)
- [2] European-Space-Agency. (2020) Newcomers earth observation guide. [Online]. Available: <https://business.esa.int/newcomers-earth-observation-guide> (Citato alle pagine 8 e 9)
- [3] ——. Introducing copernicus. [Online]. Available: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Introducing\\_Copernicus](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Introducing_Copernicus) (Citato a pagina 9)
- [4] Sentinel-Online. Sentinel-1. [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1> (Citato a pagina 10)
- [5] ——. Sentinel-2 mission guide. [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (Citato a pagina 10)
- [6] ——. (2022) Sentinel-3. [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3> (Citato a pagina 11)
- [7] ——. Sentinel-4. [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-4> (Citato a pagina 12)

- [8] ——. Sentinel-5p. [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p> (Citato a pagina 12)
- [9] ——. Sentinel-5. [Online]. Available: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5> (Citato a pagina 13)
- [10] ——. Sentinel-6 satellite description. [Online]. Available: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-6/satellite-description> (Citato a pagina 13)
- [11] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, and R. Moore, "Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone," *Remote Sensing of Environment*, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031> (Citato a pagina 16)
- [12] R. M. M. Abdusamea, "The importance of the normalized difference vegetation index (ndvi) and the use of the arcgis to create ndvi maps," 2018. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/341974928\\_The\\_Importance\\_Of\\_The\\_Normalized\\_Difference\\_Vegetation\\_Index\\_NDVI\\_And\\_The\\_Use\\_Of\\_The\\_ArcGIS\\_To\\_Create\\_NDVI\\_Maps](https://www.researchgate.net/publication/341974928_The_Importance_Of_The_Normalized_Difference_Vegetation_Index_NDVI_And_The_Use_Of_The_ArcGIS_To_Create_NDVI_Maps) (Citato a pagina 19)
- [13] HUB4EVERYBODY. Enhanced vegetation index (evi). [Online]. Available: <https://hub4everybody.com/enhanced-vegetation-index-evi/?hs-x=-23058.49401414021&hs-y=21053.730104314232&hs-z=16.672260813372407&hs-panel=&hs-lang=en&hs-visible-layers=OpenStreetMap&map-swipe=disabled&app=DbrbwzKH7l> (Citato a pagina 20)
- [14] P. S. R. K. Chandrasekar, M. V. R. Sesha Sai and R. S. Dwevedi, "Land surface water index (lswi) response to rainfall and ndvi using the modis vegetation index product," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 31, no. 15, pp. 3987–4005, 2010. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01431160802575653> (Citato a pagina 21)
- [15] H. Xu, "Modification of normalised difference water index (ndwi) to enhance open water features in remotely sensed imagery," *International Journal of*

- Remote Sensing*, vol. 27, no. 14, pp. 3025–3033, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179> (Citato a pagina 21)
- [16] A. Bannari, H. Asalhi, and P. Teillet, “Transformed difference vegetation index (tdvi) for vegetation cover mapping,” in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 5, 2002, pp. 3053–3055 vol.5. (Citato a pagina 22)
- [17] E. D. Analytics. Chlorophyll index in agriculture. [Online]. Available: <https://eos.com/make-an-analysis/chlorophyll-index/> (Citato a pagina 23)
- [18] EOS-Data-Analytics. Msavi: Modified soil adjusted vegetation index. [Online]. Available: <https://eos.com/make-an-analysis/msavi/> (Citato a pagina 24)
- [19] United-Nations. Normalized burn ratio (nbr). [Online]. Available: <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio> (Citato a pagina 24)
- [20] P. Ettehadi, S. Kaya, E. Sertel, and U. Alganci, “Separating built-up areas from bare land in mediterranean cities using sentinel-2a imagery,” *Remote Sensing*, vol. 11, p. 345, 02 2019. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/330994618\\_Separating\\_Built-Up\\_Areas\\_from\\_Bare\\_Land\\_in\\_Mediterranean\\_Cities\\_Using\\_Sentinel-2A\\_Imagery](https://www.researchgate.net/publication/330994618_Separating_Built-Up_Areas_from_Bare_Land_in_Mediterranean_Cities_Using_Sentinel-2A_Imagery) (Citato a pagina 25)
- [21] Earth-Engine-Data-Catalog. Harmonized sentinel-2 msi: Multispectral instrument, level-2a. [Online]. Available: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S2\\_SR\\_HARMONIZED](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED) (Citato a pagina 28)

---

## **Ringraziamenti**

---

Ora che sono giunto al termine di questo percorso, vorrei ringraziare ed esprimere la mia gratitudine a tutte le persone che mi hanno aiutato a raggiungere questo obiettivo e non solo.

Innanzitutto, ci tengo a ringraziare la mia relatrice, la professoressa Monica Sebillo. Questo lavoro nasce soprattutto dal corso di "Tecnologie per la Geoinformatica" tenuto propria dalla professoressa e a cui mi sono interessato fino a farlo diventare il mio tirocinio e tesi. Un ringraziamento è doveroso anche verso il professor Michele Grimaldi che mi ha seguito nel lavoro di tirocinio, specie su argomenti di tipo "geo-fisico" di cui non ero a conoscenza.

Un ringraziamento sentito va alla mia famiglia, mamma, papà e mio fratello Gianmaria, siete stati di continuo supporto anche nei momenti più difficili, ve ne sono grato. Gli zii, i cugini e i nonni: Antonio, Vincenzo, Pina e soprattutto Antonietta che è stata una seconda madre; grazie, vi voglio bene.

Come potrei dimenticarmi dei miei amici di sempre: Ernesto, Giovanni O., Gaetano, Raffaele, Alessandro, Giovanni D.R. e Marcello. Spero di passare ancora molti anni insieme a voi e di vivere tante altre avventure. Ai miei compagni di liceo per quei magnifici anni ed ai miei colleghi di università senza i quali questa esperienza sarebbe stata molto più dura e triste.

