

Scuola di Ingegneria Civile Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio  
- Environmental and Land Planning Engineering -



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

---

LEARN FROM THE MUMMIES:  
L'IDROLOGIA DEL FIUME NILO, DAI DATI  
STORICI ALLE PROIEZIONI CLIMATICHE

---

TESI DI LAUREA MAGISTRALE DI:

ALESSIA CECCHETTI 940257

RELATORE: PROF. ING. DANIELE BOCCHIOLA  
CORRELATORI: ING. FRANCESCA CASALE  
ING. FLAVIA FUSO

Anno accademico 2021/2022



*"Lo duca e io per quel cammino ascoso  
intrammo a ritornar nel chiaro mondo;  
e senza cura aver d'alcun riposo,*

*salimmo sù, el primo e io secondo,  
tanto ch'í' vidi de le cose belle  
che porta 'l ciel, per un pertugio tondo.*

*E quindi uscimmo a riveder le stelle."*

*Dante, Inferno-XXXIV canto, 133:139*



# Indice

<b>Indice delle tabelle</b> .....	<b>I</b>
<b>Indice delle figure</b> .....	<b>V</b>
<b>Indice dei grafici</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XII</b>
<b>Sintesi</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Introduzione</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Caso Studio</b> .....	<b>4</b>
2.1 Inquadramento territoriale .....	4
2.2 Caratteristiche climatiche .....	8
2.2.1 Zone climatiche.....	8
2.2.2 Sottosistemi del bacino del Nilo .....	11
<b>2.2.3</b> Precipitazioni .....	12
2.2.3.1 Distribuzione annuale delle precipitazioni .....	12
2.2.3.2 Distribuzione stagionale delle precipitazioni.....	14
<b>2.2.4</b> Temperatura .....	14
<b>2.2.5</b> Evaporazione ed Evapotraspirazione .....	16
2.3 Gestione delle risorse idriche .....	18
<b>2.3.1</b> Confini idrici del Nilo .....	19
<b>2.3.2</b> Disponibilità di acqua pro-capite tra gli Stati partner.....	20
<b>2.3.3</b> Infrastrutture lungo il bacino .....	21
<b>2.3.4</b> Gestione dell'acqua ad uso agricolo, municipale ed industriale.....	24
2.4 Inquadramento storico-climatico .....	26
<b>2.4.1</b> Analisi delle piene nella storia .....	26
<b>2.4.2</b> Periodo Arcaico e Pre-Dinastico (3500- 2686) a.C.....	29
<b>2.4.3</b> Antico Regno (2686 - 2181) a.C. ....	32
<b>2.4.4</b> Medio Regno (2055-1650) a.C. ....	35

2.4.5	Nuovo Regno (1550-1075) a.C.....	37
2.4.6	Periodo Tolemaico (332 - 30) a.C.....	40
2.4.7	Periodo romano (30 a.C. - IV secolo d.C.).....	43
2.4.8	Periodo Arabo-Islamico (640-1517) d.C. ....	45
2.4.9	Periodo Ottomano (1517-1914) d.C.....	48
2.4.10	Periodo Moderno (1914-presente) d.C.....	53
2.5	Contesto politico.....	53
<b>3</b>	<b>Dati utilizzati .....</b>	<b>56</b>
3.1	Precipitazioni e Temperatura .....	56
3.2	Portate.....	59
3.3	Modello digitale del terreno .....	61
3.4	Copertura del suolo .....	63
3.5	Elaborazione dati FAO .....	67
3.6	Prelievo Irriguo .....	68
<b>4</b>	<b>Modello Idrologico .....</b>	<b>71</b>
4.1	Modello Poli-Hydro .....	72
4.2	Deflusso sub-superficiale .....	73
4.3	Evapotraspirazione.....	73
4.4	Flow Routing .....	74
4.5	Calibrazione modello idrologico .....	75
<b>5</b>	<b>Risultati della calibrazione .....</b>	<b>78</b>
5.1	Sottobacino Tamaniat .....	78
5.2	Sottobacino El Ekhsase .....	79
<b>6</b>	<b>Scenari Climatici .....</b>	<b>87</b>
6.1	IPPC.....	87
6.2	Modelli generali della circolazione.....	88
6.3	Limitazioni dei modelli .....	88

6.4	Modelli adottati .....	89
6.4.1	CESM2 .....	89
6.4.2	CMCC .....	89
6.4.3	EC-EARTH3 .....	90
6.5	Scenari climatici adottati.....	90
6.5.1	RCP (Representative Concentration Pathways) .....	90
6.5.2	SSP (Shared Socio-Economic Pathways) .....	91
6.5.3	MIP per CMIP6 .....	92
6.6	Downscaling.....	93
6.6.1	Procedura di downscaling.....	94
6.7	Risultati .....	95
6.7.1	Temperatura .....	96
6.7.2	Precipitazioni .....	100
6.7.3	Portata .....	107
6.7.4	Livello idrometrico.....	111
6.7.5	Elaborazione dati storici Toussoun .....	113
<b>7</b>	<b>Discussione .....</b>	<b>119</b>
7.1	Confronto qualitativo tra proiezioni e passato .....	119
7.2	Limitazioni e possibili sviluppi futuri.....	123
<b>8</b>	<b>Conclusioni.....</b>	<b>125</b>
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>128</b>





# Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Classificazione di Köppen.....	9
Tabella 2.2 Dighe esistenti sul bacino del Nilo .....	24
Tabella 3.1 Coordinate e quote altimetriche delle stazioni di misura di temperatura utilizzate nel modello .....	57
Tabella 3.2 Coordinate e quote altimetriche delle stazioni di misura di precipitazione utilizzate nel modello .....	58
Tabella 3.3 Coordinate e quota altimetrica delle stazioni di misura degli idrometri utilizzati nel modello. ....	61
Tabella 3.4 Sottobacini considerati per il modello e relativa area di influenza.....	63
Tabella 3.5 Conversion table CGLS to CN.for soil moisture assessment.....	64
Tabella 3.6 Classi di copertura del suolo presenti nel bacino del fiume Nilo .....	64
Tabella 3.7 Media dei report FAO per i valori annuali [mm/y] di precipitazione ed evapotraspirazione .....	67
Tabella 3.8 Distribuzione dei contributi al prelievo irriguo tra le varie aree dei sottobacini. ....	70
Tabella 5.1 Valori definitivi dei parametri calibrati per il sottobacino Tamaniat. ...	78
Tabella 5.2 Valori definitivi dei parametri calibrati per il sottobacino El Ekhsase..	79
Tabella 5.3 Indice statistico di errore calcolato per tra la media della portata annuale (considerato l'irriguo) e la media della portata osservata per ogni sottobacino considerato .....	80
Tabella 5.4 Bias medi annuali tra il valore di precipitazione medio simulato ed il valore medio ottenuto dai Report FAO .....	84
Tabella 6.1 Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e per tutti gli scenari, nei decenni corrispondenti a metà secolo 2041-2050 e fine secolo 2091-2100 rispetto al periodo di riferimento 1973-1984 .....	96
Tabella 6.2 Variazione percentuale della precipitazione cumulata annua media sul bacino del Nilo, per diversi scenari climatici e diversi modelli, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984 .....	100
Tabella 6.3 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 2.6 dei modelli CESM, CMCC ed	

EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984 .....	102
Tabella 6.4 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 4.5 dei modelli CESM, CMCC ed EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984 .....	102
Tabella 6.5 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 7.0 dei modelli CESM, CMCC ed EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984 .....	102
Tabella 6.6 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 8.5 dei modelli CESM, CMCC ed EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984 .....	102
Tabella 6.7 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 2.6 e 4.5, modello CESM, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014.....	105
Tabella 6.8 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 7.0 e 8.5, modello CESM, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014.....	105
Tabella 6.9 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 2.6 e 4.5, modello CMCC, rispetto al periodo di controllo dal 1975 al 2014 .....	106
Tabella 6.10 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 7.0 e 8.5, modello CMCC, rispetto al periodo di controllo dal 1975 al 2014 .....	106
Tabella 6.11 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 2.6 e 4.5, modello EC- Earth, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014.....	106

Tabella 6.12 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 7.0 e 8.5, modello EC-Earth, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014.....	107
Tabella 6.13 Variazioni della portata media annuale in ingresso rispetto alla stazione di El Eksase per ogni scenario climatico per ogni modello per ogni decennio del XXI secolo rispetto al periodo 1973-1984. ....	108
Tabella 6.14 Altezza massima e minima raggiunta dal Nilo, per quell'anno nella sezione di Assiut .....	111
Tabella 6.15 Altezza massima e minima [m] raggiunta dalle acque del Nilo, nella sezione di Assiut per i decenni del XXI secolo, modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	112
Tabella 6.16 Altezza massima e minima [m] raggiunta dalle acque del Nilo, nella sezione di Assiut per i decenni del XXI secolo, modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	112
Tabella 6.17 Altezza massima e minima [m] raggiunta dalle acque del Nilo, nella sezione di Assiut per i decenni del XXI secolo, modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	112
Tabella 6.18 Confronto dell'altezza media minima e massima dei livelli di piena del Nilo per la sezione di Assiut, relativa al periodo di controllo 1973-1984, al periodo di validazione 1985-2020 (EC-Earth, CESM, CMCC) e al periodo di proiezione 2021-2100 (per tutti gli scenari e tutti i modelli).....	113



# Indice delle figure

Figura 2.1 Visione satellitare del fiume Nilo (Ansa.it) .....	4
Figura 2.2 Mappa del bacino del Nilo (ArcGISPRO) .....	6
Figura 2.3 Classificazione del bacino del Nilo in Aree climatiche secondo Köppen (FAO) .....	10
Figura 2.4 Sistema afflussi-deflussi Nilo (Blackmore and Whittington, 2008).....	12
Figura 2.5 Distribuzione delle precipitazioni medie sul bacino del Nilo (FAO).....	13
Figura 2.6 Distribuzione delle fasce di temperatura sul bacino del Nilo (FAO).....	15
Figura 2.7 Distribuzione dei Tassi di Evapotraspirazione lungo il bacino del Nilo (FAO) .....	17
Figura 2.8 Confini politici del Nilo .....	20
Figura 2.9 Confronto tra infrastrutture esistenti sul Nilo nel 2005 ed infrastrutture esistenti ed in costruzione nel 2015 [33] .....	22
Figura 2.10 Infrastrutture Idrauliche lungo il bacino del Nilo [37].....	23
Figura 2.11 Pietra di Palermo, Museo archeologico Salinas a Palermo .....	27
Figura 2.12 Nilometro sull'isola Elefantina, Aswan .....	28
Figura 2.13 Via Lattea vista dalle piramidi, Egitto.....	30
Figura 2.14 Piramidi di Giza .....	33
Figura 2.15 La Grande Sfinge, Egitto .....	33
Figura 2.16 Posizione dell'oasi del Fayyum rispetto al corso del Nilo .....	35
Figura 2.17 Valle dei Re, Egitto.....	37
Figura 2.18 Maschera del faraone Tutankhamon, Museo egizio del Cairo .....	38
Figura 2.19 tempio di Amon, Luxor .....	39
Figura 2.20 tempio di Karnak, Tebe .....	39
Figura 2.21 Tempio di Abu Simbel, Egitto .....	40
Figura 2.22 Regina Cleopatra .....	43
Figura 2.23 Estensione impero Ottomano .....	49
Figura 2.24 Canale di Suez .....	50
Figura 3.1 Stazioni meteorologiche NOAA situate nell'area di interesse.....	59
Figura 3.2 Stazioni di misura della portata GRDC nell'area del bacino del fiume Nilo. ....	60
Figura 3.3 DEM fornito dall'USGS Earth Resources Observation .....	62

Figura 3.4 Mappa del Curve Number del bacino del fiume Nilo .....	65
Figura 3.5 Mappa della distribuzione della vegetazione nel bacino del fiume Nilo. .....	66
Figura 3.6 Laghi della Toshka 21 giugno 2012 e 11 settembre 2002 (Nasa/Jsc).	69
Figura 6.1 Emissioni e concentrazioni di CO <sub>2</sub> , forze radiative antropogeniche e temperatura media globale nel 21° secolo secondo il CMIP6 [74]. .....	93
Figura 6.2 Sezione trasversale della Valle del Nilo nella regione del Grande Cairo (El-Sohby e Mazen, 1985).....	118
Figura 8.1 Via Lattea, dea Nut ed il cerchio della Luna .....	126



# Indice dei grafici

Grafico 5.1 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino Tamaniat.....	79
Grafico 5.2 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di El Ekhsase .....	81
Grafico 5.3 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Assiut .....	81
Grafico 5.4 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Nag Hammadi .....	82
Grafico 5.5 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Esna.....	82
Grafico 5.6 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Gaafra .....	83
Grafico 5.7 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Asswan Dam.....	83
Grafico 5.8 Andamento dei contributi simulati del deflusso a scala media annuale sul bacino di El Ekhsase (1973-1984) .....	85
Grafico 5.9 Andamento dei contributi simulati del deflusso su scala media annuale del bacino del Tamaniat (1973-1984).....	85
Grafico 6.1 Variazione percentuale di temperatura alla sezione di chiusura di El Ekhsase di ogni modello e scenario analizzato nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 1973-1984 .....	98
Grafico 6.2 Variazione percentuale di temperatura alla sezione di chiusura di El Ekhsase di ogni modello e scenario analizzato nel decennio 2091-2100 rispetto al periodo di riferimento 1973-1984 .....	98
Grafico 6.3 Andamento della temperatura media annuale sul bacino del Nilo dal 1973 al 2100, modello EC-Earth. ....	99
Grafico 6.4 Andamento della temperatura media annuale sul bacino del Nilo dal 1973 al 2100, modello CESM.....	99
Grafico 6.5 Andamento della temperatura media annuale sul bacino del Nilo dal 1973 al 2100, modello CMCC .....	100



Grafico 6.6 Variazione della precipitazione cumulata annuale media a metà secolo rispetto al periodo 1973-1984 per il sottobacino di El Ekhsase. ....	101
Grafico 6.7 Variazione della precipitazione cumulata annuale media a fine secolo rispetto al periodo 1973-1984 per il sottobacino di El Ekhsase. ....	101
Grafico 6.8 Andamento del numero di giorni con $P>10$ nel periodo tra il 1973-2100, modello EC-Earth .....	103
Grafico 6.9 Andamento del numero di giorni con $P>10$ nel periodo tra il 1973-2100, modello CESM .....	104
Grafico 6.10 Andamento del numero di giorni con $P>10$ nel periodo tra il 1973-2100, modello CMCC .....	104
Grafico 6.11 Variazioni percentuali della portata media annuale a metà (2041-2050) secolo per ogni modello per ogni scenario presso l'idrometro di El Ekhsase .....	108
Grafico 6.12 Variazioni percentuali della portata media annuale a fine (2091-2100) secolo per ogni modello per ogni scenario presso l'idrometro di El Ekhsase .....	109
Grafico 6.13 Andamento del valore medio annuo di portata, rispetto alla stazione di El Ekhsase dal 1973 al 2100, storico (1973-2020) e modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	109
Grafico 6.14 Andamento del valore medio annuo di portata, rispetto alla stazione di El Ekhsase dal 1973 al 2100, storico (1973-2020) e modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	110
Grafico 6.15 Andamento del valore medio annuo di portata, rispetto alla stazione di El Ekhsase dal 1973 al 2100, storico (1973-2020) e modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	110
Grafico 6.16 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 930-951. ....	114
Grafico 6.17 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1180-1209. ....	115
Grafico 6.18 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1250-1283 .....	115
Grafico 6.19 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1330-1350 .....	116

Grafico 6.20 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1405-1415 .....	116
Grafico 6.21 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1600-1610 .....	117
Grafico 6.22 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1870-1880 .....	117
Grafico 7.1 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di metà secolo 2041-2050, modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	120
Grafico 7.2 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di metà secolo 2041-2050, modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	121
Grafico 7.3 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di metà secolo 2041-2050, modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	121
Grafico 7.4 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di FINE secolo 2091-2100, modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 .....	122
Grafico 7.5 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di FINE secolo 2091-2100, modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8. ....	122
Grafico 7.6 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di FINE secolo 2091-2100, modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8. ....	123



# Abstract

In the fifth century BC, the Greek historian Herodotus defined Egypt as "the gift of the Nile", underlining the extraordinary influence of this river in the life of entire civilizations that have followed throughout history. The purpose of the following study is to perform an historical analysis of the Ancient Egypt, to assess the effect of climatic events, e.g. floods and droughts, on the society. Next, with the projections of scenarios, it is possible to assess the effects of climate change in the area, providing the basic knowledge for the assessment of future adaptation strategies. In summary, the hydrological events occurred in the past are analyzed, highlighting the existence of a link between climatic/hydrological events and socio-political situation. Then, the potential effects of climate change until the end of the century is assessed. Daily series of precipitation and temperature provided by the measurement stations in the Nile basin, for a reference period from 1973 to 1984, are used as input for the calibration of the hydrological model *Poli-Hydro*, developed by the *Climate lab* of Politecnico di Milano. The simulated discharges in several river cross sections along the river are compared with the monthly discharge data provided by the Global Runoff Data Center GRDC. Subsequently, the projections of climate change scenarios on the hydrological cycle of the Nile basin, are simulated up to 2100. For a qualitative assessment of the flood regime, three global circulation models, EC-Earth3, CMCC and CESM2, and four mitigation policies, SSP 2.6, 4.5, 7.0 and 8.5 based on the guidelines provided by the AR6 of the IPCC, are used in this study. A downscaling procedure is also performed for each scenario to ensure consistency with the hydrological model resolution. The results are combined with literature data from the past, with particular attention on time intervals related to historically significant events. The comparison between history and projections provides the bases for a first connection between climatic-hydrological stress events and social responses. Projections show an increase in extreme rainfall at the equator and in temperature throughout the basin. Consequently, phenomenon of aridification intensifies its strength in Sudan and Egypt. The comparison between historical data and future projections provides a preliminary assessment of the relationships between climatic/hydrological stress events and the respective social responses, providing the tools for assessing adaptation strategies to global warming.



# Sintesi

Lo storico greco Erodoto, nel V secolo a.C., definì l'Egitto come " il dono del Nilo" sottolineando la straordinaria influenza rivestita da questo fiume nella vita di intere civiltà che si sono avvicendate nel corso della storia. Lo scopo del seguente studio è quello effettuare un'indagine storica dell'antico Egitto, per valutare l'effetto che eventi climatici come piene e siccità hanno avuto sulla società. Successivamente, attraverso le proiezioni di scenari, è possibile valutare gli effetti del cambiamento climatico nel bacino di interesse, gettando le basi per la valutazione di future strategie di adattamento. In sintesi, si analizzeranno i particolari eventi idrologici avvenuti nel passato, mettendo in luce l'esistenza di un nesso tra eventi climatici/idrologici e situazione sociopolitica, e si valuteranno poi i potenziali effetti del cambiamento climatico fino a fine secolo. Utilizzando come input dati giornalieri di precipitazione e temperatura rilevati dalle stazioni di misura nel bacino del Nilo, per un periodo di riferimento che va dal 1973 al 1984, è stato calibrato il modello idrologico *Poli-Hydro* sviluppato dal *Climate lab* del Politecnico di Milano. Le portate simulate dal modello in diverse sezioni lungo il fiume sono state quindi confrontate con le portate mensili fornite dal Global Runoff Data Centre GRDC. In seguito, sono state simulate le proiezioni del ciclo idrologico del bacino del Nilo in scenari di cambiamento climatico fino al 2100. Ai fini di una valutazione qualitativa del regime di piena, sono stati considerati tre modelli di circolazione globale, EC-Earth3, CMCC e CESM2 e quattro politiche di mitigazione: SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5 basate sulle linee guida fornite dall'IPCC nel sesto rapporto di valutazione. Per ogni scenario è stata eseguita una procedura di downscaling al fine di garantire una coerenza con la risoluzione utilizzata per il modello idrologico. I diversi risultati ottenuti sono stati poi confrontati con i dati passati ricavati da letteratura, ponendo particolare attenzione ad intervalli temporali corrispondenti ad eventi storicamente significativi.

Le proiezioni mostrano un chiaro aumento delle piogge estreme a livello equatoriale in concomitanza ad un aumento delle temperature in tutto il bacino. In risposta a ciò si osserva un incremento del fenomeno di aridificazione per territori del Sudan e dell'Egitto. Il confronto tra storia e proiezioni di scenari fornisce una valutazione preliminare della relazione esistente tra eventi di stress climatico-idrologico e le corrispondenti risposte sociali, fornendo quindi gli strumenti per la valutazione di strategie di adattamento al cambiamento climatico.



# 1 Introduzione

Questo lavoro di tesi si inserisce in un progetto di collaborazione del *Climate-Lab* del Politecnico di Milano con il Dipartimento di Studi Umanistici della Università del Salento, in particolare con la professoressa Paola Davoli e con il museo egizio di Torino. I risultati preliminari sono già stati presentati ad una press conference (Casale, F., Fuso, F., Cecchetti, A., and Bocchiola, D.: Learn from the mummies: water wise resilience and adaptation in Egypt along the Nile River., EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-1105, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-1105>, 2022) durante all'Assemblea Generale dell'EGU22, tenutasi a Vienna nei giorni del 23-27 maggio 2022.

Lo scopo del progetto è quello di studiare l'effetto dei cambiamenti climatici sulla dinamica idrologica del bacino del fiume Nilo. Rapportando la moderna scienza del clima e dell'idrologia con l'indagine archeologica e storica dell'antico Egitto, è possibile evidenziare un nesso tra eventi socio-politici avvenuti nel corso dei millenni (a partire da circa 6000 anni fa) e particolari condizioni climatiche ed idrologiche del fiume Nilo. Si è deciso quindi di analizzare come le popolazioni che nel corso dei millenni hanno abitato i territori in prossimità del fiume Nilo si sono adattate a variazioni climatiche verificatesi in passato, al fine di concepire e valutare misure di adattamento al riscaldamento globale che si verificherà nei prossimi decenni. I vari regni d'Egitto durarono per oltre 3000 anni prima della nascita di Cristo; infatti, da sempre hanno dovuto far fronte alle problematiche di clima mutevole come, per esempio, l'alternanza di troppa o poca acqua del fiume. Tutta questa instabilità forgiò la capacità di sopravvivenza del paese durante inondazioni, siccità, carestie e allagamenti [1], ma anche shock geologici e/o vulcanici [2] o il collasso di interi ecosistemi [3]. La civiltà egizia ha dimostrato l'applicazione *ante litteram* dei moderni concetti di resilienza, cioè la capacità di riprendersi dopo i disastri, e di adattamento ovvero la capacità di pianificare strategie per rispondere a specifici fattori di stress [4]. Gran parte della letteratura (a partire da Hassan [5]; Yletyinen [6]; Butzer [7]; Touzeau [8]) dimostra come il regime irregolare del Nilo abbia influenzato in gran parte il destino degli egizi. Scontrandosi continuamente contro l'imminente deserto, gli egiziani modellarono le loro terre e i terreni coltivati sulla scia delle divagazioni del fiume e del cambiamento dei regimi. Il regime del Nilo guidato dal clima ha



persino influenzato la vita politica dell'Egitto (come riporta Hasan, [5]). Durante lunghi periodi di siccità e carestia, re e faraoni furono rovesciati e si verificarono rivolte interne e persino rivoluzioni. Molteplici studi hanno documentato il grande atteggiamento degli egiziani nei confronti della resilienza [8]. Sono stati in grado di misurare e, in una certa misura, prevedere i cambiamenti climatici stagionali a lungo termine e la disponibilità di acqua, quindi adattarsi, diventando di gran lunga il regno antico più duraturo, in un'area estremamente impervia. Al giorno d'oggi, dopo millenni, e con una capacità di previsione del clima maggiore la situazione non è cambiata molto. Diversi paesi in tutto il mondo soffrono di una condizione climatica sempre variabile, soprattutto nella disponibilità di acqua, che si manifesta in eventi catastrofici come inondazioni e siccità, insicurezza alimentare [9] e conflitti dovuti al dominio sull'acqua ( [10]; [11]; [12]; [13]).L'Egitto e tutti i paesi bagnati dalle acque del Nilo sono minacciati dai cambiamenti climatici e le strategie di adattamento sono estremamente necessarie [14].

Il lavoro di tesi si sviluppa come segue:

1. i)Valutazione del clima passato (fino all'4·000 a.C. circa) del bacino del Nilo e la sua conseguente mutevolezza idrologica; ii) raccolta di dati storici, archeologici, paleo-ambientali, i quali permettano di supportare l'ipotesi di una connessione tra eventi idro-climatici (a lungo termine o catastrofici), come carestie ed inondazioni, e conflitti politici e sociali [7]. L'obiettivo, in futuro, è quello di ricostruire una correlazione statistica tra fattori di stress del clima e la situazione sociopolitica. Per valutare l'incidenza storica delle inondazioni del Nilo sono stati utilizzati, tra gli altri, i dati del Nilometro islamico, che fornisce la serie esistente più lunga di dati idrologici osservativi registrati. Le registrazioni sono partite dal 622 d.C. [2] e sono catalogate su cartaceo dallo storico arabo Omar Toussoun. Sono state inoltre indagate le prove storiche disponibili come papiri ed iscrizioni, indicando e rilevando, dove possibile, fattori di instabilità come la mancanza di pagamento delle tasse oppure una perdita del controllo statale al fine di fornire credito alla relazione evento climatico-sociale. Lo scopo risulta quindi quello di creare un supporto, ed una prima base ad un'ulteriore indagine storica che si avvalga anche dell'utilizzo di modelli paleoclimatici ( [15]; [16]) opportunamente disaggregati [17], per valutare la connessione tra clima-idrologia-sicurezza alimentare, negli ultimi 10000 anni circa. I modelli paleoclimatici

permetterebbero così di valutare una tendenza di periodi di alta e bassa precipitazione e di temperatura, ricavando una sequenza temporale di conseguenti intervalli di alta e bassa portata e una relativa descrizione statistica (inondazioni estreme, siccità estrema) rappresentativa dei 10000 anni passati (es [6]).

2. Calibrazione del modello idrologico Poli-Hydro, sviluppato dal *Climate-Lab* [18], [19], negli anni 1973-1984, in grado di simulare l'idrologia stagionale naturale del Nilo, ovvero di un bacino semiarido, ed eventualmente la regolazione del deflusso data dalle infrastrutture idrauliche presenti [20].
3. i) Utilizzo di proiezioni future per valutare il clima e l'idrologia del bacino fino al 2100, basandosi sugli scenari dell'IPCC (sviluppati nello specifico nel sesto Assessment Report AR6 [21]). ii) analisi di un ventaglio di potenziali scenari futuri per evidenziare periodi di scarsità o eccesso d'acqua.

L'idea alla base della simulazione di scenari futuri è quella di renderli in seguito utilizzabili per progettare e testare scenari di resilienza e adattamento, ricercando connessioni e conferme con i trend ricavati dai modelli paleoclimatici. Le politiche di adattamento devono essere ovviamente pianificate considerando il contesto attuale, l'aumento della conoscenza tecnologica e il miglioramento delle condizioni socioeconomiche nel bacino, al fine di imparare dal passato, studiare il presente e prevedere politiche per il futuro.

## 2 Caso Studio

### 2.1 Inquadramento territoriale

Il Nilo è il secondo fiume più lungo del mondo, con una lunghezza di circa 6700 km, (Figura 2.1).



Figura 2.1 Visione satellitare del fiume Nilo (Ansa.it)

Si estende su una fascia di latitudine estremamente ampia, da 4°S a 32°N, con un bacino idrografico di 3.4 milioni di km<sup>2</sup>. Il bacino attuale ha uno sviluppo abbastanza recente: Rushdi Said [22] nell'articolo *The river Nile: geology, hydrology and utilization* ha descritto come il drenaggio del bacino si sia evoluto da un fiume relativamente corto, che ha scavato un canyon fino a 4000 metri di profondità circa 6-7 milioni di anni fa. In quel periodo una serie di eventi porta alla formazione del moderno sistema fluviale del Nilo; contemporaneamente al sollevamento delle montagne del Mar Rosso si verifica infatti un prosciugamento del Mediterraneo, per un movimento della crosta terrestre che ha interessato il collegamento con l'Oceano Atlantico attraverso lo stretto di Gibilterra. Il mare ha iniziato così a trasformarsi in un immenso lago, e ha cominciato a seccarsi per evaporazione, dando origine ad

una serie di bassi laghi salati che ne rappresentano i resti. L'abbassamento del Mediterraneo si ripercuote così sulle zone circostanti causando lo sprofondamento dei fiumi che sfociano nel mare. Contemporaneamente a questo evento si collegano anche la scoperta di un profondo e vasto canyon sotto il delta a nord del Cairo, e di una valle sepolta sotto il Nilo ad Assuan [23].

In Egitto, all'inizio di questa fase si trova un piccolo corso d'acqua, l'Eonilo, che sfocia di fatto in un Mediterraneo che sta iniziando ad asciugarsi. L'essiccamento del mar Mediterraneo genera una grande quantità di acqua sotto forma di vapore che porta conseguentemente ad un'abbondanza di piogge lungo le catene montuose del Mar Rosso di recente formazione. Inoltre, rinvigorito dall'aumento del gradiente risultato dall'abbassamento del livello del mare, l'Eonilo aumenta rapidamente e comincia a scavare un canale profondo, un vero e proprio canyon, che si estende verso sud. Mentre il fiume scava in profondità la roccia, altri processi di erosione allargano nello stesso momento la valle. All'inizio del Pliocene, circa 5 milioni di anni fa, l'Oceano Atlantico irrompe nuovamente attraverso lo Stretto di Gibilterra e torna a riempire il Mediterraneo, l'acqua del mare invade il canyon del Nilo almeno fino ad Assuan, formando un lungo golfo, con una larghezza media di 12 km, ma che arriva fino a 30 km. Verso il primo periodo del Pleistocene (2-1.8 milioni di anni fa) le piogge abbondanti derivate dall'immensa quantità di vapore acqueo presente in atmosfera iniziano a cessare e l'Egitto si trasforma in un deserto spazzato dal vento, la cui superficie inizia a presentarsi rocciosa e coperta di ciottoli, molto simile a quella attuale [24].

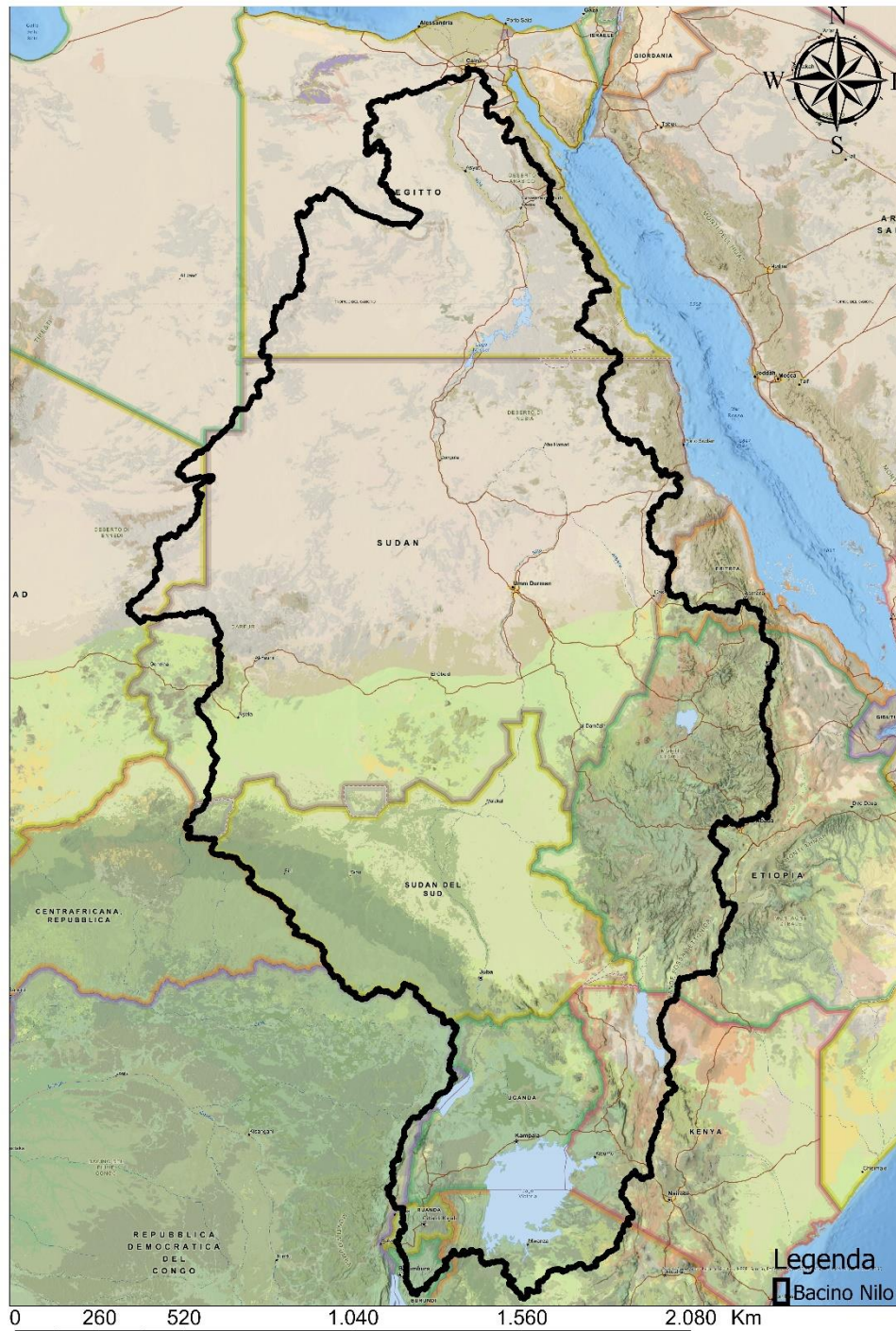


Figura 2.2 Mappa del bacino del Nilo (ArcGISPRO)

Il Nilo egiziano, di fatto, si è collegato con l'altopiano etiopico circa 750'000 anni fa, sebbene questa connessione sia stata interrotta più volte nel corso degli anni, quando l'Atbara e il Nilo Azzurro si ritagliarono la strada dentro l'Egitto, attraverso la Nubia per mezzo di una serie di cateratte [23]. Il fattore scatenante di tale connessione è chiaramente da individuarsi nei movimenti della crosta terrestre, che sollevarono gli altipiani e indirizzarono parte del deflusso dell'Etiopia verso il bacino

del Nilo. Con l'inizio dell'Olocene si registra l'ultima fase umida (10.000 anni fa). Aumenta la piovosità in Etiopia e nella zona tra Sudan ed Egitto, il livello dei laghi aumenta in tutta la zona Sahariana ed il paesaggio attorno inizia a cambiare, si formano praterie e steppe adatte ad essere abitate. La fase umida continua fino al 2450 a.C. il bacino idrologico del Nilo si ingrandisce, e il fiume diventa sempre più importante, soprattutto a livello di crescita e sviluppo antropologico. L'altipiano equatoriale fornisce una quantità di acqua costante, mentre dall'Etiopia proviene un flusso stagionale che dà origine alle famose piene. Il regime attuale del Nilo, così com'è conosciuto per aver influenzato e scritto la storia Occidentale, ha quindi avuto origine nella fase umida dell'Olocene nella quale comincia di fatto anche il trasporto e il sedimentazione del limo. [25] [26].

Andando ad osservare finalmente il bacino del fiume odierno è possibile descriverne l'idrografia come costituita da due grandi rami confluenti, il Nilo Bianco e il Nilo Azzurro; quest'ultimo contribuisce con un maggior apporto di acqua, e corrisponde di fatto a circa l'80% della portata totale e di limo fertile. Attraverso il suo percorso poderoso, il Nilo rappresenta un sistema idrico di vasta portata che bagna ben 11 paesi: Burundi, Congo, Egitto, Eritrea, Etiopia, Kenya, Ruanda, Tanzania, Sud Sudan, Sudan e Uganda. Il Nilo Bianco nasce storicamente nelle montagne del Ruanda, nella zona di Rutovu, dove venne individuata nel 1937 la sua sorgente dall'esploratore tedesco Burkhardt Waldecker, anche se altre spedizioni successive, alcune molto recenti, hanno individuato rami sorgentiferi ancora più remoti, sia in Ruanda che in Burundi, nella regione del Kagera la quale ha un bacino molto intricato, fra montagne, foreste e zone paludose di difficile accesso [22].

Dopo oltre 800 chilometri il fiume Kagera si getta nel più grande lago africano, il lago Vittoria, da cui ne esce, in territorio ugandese, col nome di Nilo Vittoria, attraversa il Lago Kyoga ed in seguito affluisce nell'estremità settentrionale del Lago Alberto, dopo il quale cambia nuovamente denominazione, diventando Nilo Bianco, nome che manterrà fino alla confluenza con il Nilo Azzurro presso la capitale sudanese Khartoum. Il Nilo Azzurro invece nasce convenzionalmente dal Lago Tana, in Etiopia, e scorre attraverso il Sudan sud-orientale.

La parte finale del fiume, ovvero il corso settentrionale scorre quasi interamente attraverso il deserto del Sahara, dal Sudan all'Egitto. Il tratto posto fra Karthoum e la città egiziana di Assuan, nei pressi della quale venne inaugurata nel 1970 la diga

che ha formato l'enorme bacino artificiale di Nasser, è caratterizzato da una serie di cateratte, pezzi del fiume con delle rapide che conferiscono un regime torrentizio al Nilo oppure in cui l'acqua è talmente bassa da impedirne la navigazione, dove è addirittura possibile il guado del fiume. Il tratto finale del fiume vede il Nilo scorrere verso nord ed il Mar Mediterraneo; dopo aver bagnato diverse importanti città dell'Egitto, quali Luxor e la capitale Il Cairo, il fiume si biforca e forma un fertilissimo delta lungo 160 Km ed ampio circa 24·000 Km<sup>2</sup>, compreso fra Alessandria d'Egitto e Porto Said, con i due rami principali di Rosetta ad ovest e Damietta ad est, che sfocia nel Mar Mediterraneo.

## 2.2 Caratteristiche climatiche

### 2.2.1 Zone climatiche

Le varie tipologie di clima all'interno di una ben definita area geografica possono essere classificate in relazione alle componenti principali di temperatura e precipitazione e ad altre caratteristiche. Il *Köppen Climate Classification System* [27] è il sistema più diffuso utilizzato per classificare i climi delle varie aree del mondo. Tale classificazione climatica si articola dividendo i climi in cinque gruppi principali, con ogni gruppo suddiviso in base alle variabili di precipitazione e temperatura. Le cinque macrocategorie principali sono *A* (tropicale), *B* (arido), *C* (temperato), *D* (continentale) ed *E* (polare). Ogni gruppo e sottogruppo viene quindi rappresentato da una lettera. Ad ogni area climatica viene assegnata una lettera rappresentante il gruppo principale (quindi *A*, *B*, *C*, *D* o *E*). Alle aree catalogate, escluse quelle individuate dalla lettera del gruppo *E* (o clima polare), viene assegnato un sottogruppo di precipitazioni stagionali, individuato con una seconda lettera. Il sistema di Köppen assegna poi un ulteriore sottogruppo riguardante la variabile temperatura e quindi il livello di calore.

Dato che Köppen ha concepito il sistema sulla base della sua esperienza di botanico, i gruppi climatici principali si basano su quali tipi di vegetazione crescono in una determinata regione di classificazione. Motivo per il quale, questo criterio oltre ad identificare i climi, permette al tempo stesso di analizzare le condizioni dell'ecosistema e identificare i principali tipi di vegetazione all'interno delle aree individuate.

Il bacino del fiume Nilo, secondo la metodologia di Köppen è principalmente dominato da clima tropicale umido e secco nella regione dei laghi equatoriali e parte dell'Etiopia, subtropicale secco arido (deserto) in Sudan ed Egitto, subtropicale secco semiarido nella parte meridionale del Sudan nonché monzone tropicale umido e tropicale intorno al lago Vittoria e in alcune parti degli altopiani etiopi. Individuando così 12 categorie della classificazione, mostrate in Figura 2.3 e spiegate nella Tabella 2.1 seguente.

*Tabella 2.1 Classificazione di Köppen*

<b>Codice</b>	<b>Clima</b>
Af	Tropicale Pluviale
Am	Tropicale Monsonico
Aw	Savana, Inverno Secco
BSh	Caldo Semiarido
BSk	Freddo Semiarido
BWh	Caldo del deserto
BWk	Freddo del deserto
Cfa	Subtropicale umido
Cfb	Oceanico Temperato
Cfc	Oceanico subpolare
Csa	Mediterraneo Interno
Csb	Mediterraneo costiero

Il bacino si estende su cinque zone climatiche: mediterranea, arida, semiarida, subtropicale e tropicale [28]. Avendo un'estensione così elevata, il sistema del fiume Nilo spazia da paesaggi ricchi di montagne, praterie, foreste e boschi, zone umide, laghi e deserti terminando nel delta che sfocia nel mar Mediterraneo. Questa grande diversità climatica che si intreccia lungo tutto il percorso del fiume viene a manifestarsi con una serie di ecosistemi che ospitano una ricca biodiversità, la quale garantisce una moltitudine di benefici alla popolazione stanziata lungo le sue acque.





Figura 2.3 Classificazione del bacino del Nilo in Aree climatiche secondo Köppen (FAO)

## 2.2.2 Sottosistemi del bacino del Nilo

Il bacino del Nilo può essere suddiviso in tre ampi sottosistemi.

- Il sottosistema del Nilo orientale: questo sottosistema comprende i bacini idrografici del Nilo Azzurro (Abay), Atbara (Tekezze) e Baro, i quali includono ampie parti degli altopiani etiopi e le pianure della regione orientale del Sudan. Il deflusso da questa regione contribuisce tra l'85 e il 90 % ai flussi annuali del Nilo, ricordando però che il bacino del Nilo Azzurro risponde direttamente ai cambiamenti di pioggia stagionale, mostrando evidenti cicli pioggia o di siccità.
- Il sottosistema del Nilo equatoriale: il sottosistema comprende l'intero spartiacque a monte della confluenza Sobat-Nilo Bianco, la regione dei laghi equatoriali e la maggior parte del Sud Sudan. La conseguenza principale di questo bacino si manifesta nell'effetto regolatore dei laghi, combinato con le estese zone umide nel bacino del Nilo Bianco, la quale contribuisce ad attenuare il flusso del fiume. Le grandi paludi sono anche responsabili di elevate perdite di evapotraspirazione. I flussi del Nilo Bianco, di fatto, contribuiscono solo tra il 10 e il 15% alla portata annuale del Nilo, ma risultano abbastanza stabili durante tutto l'arco dell'anno.
- La zona principale del Nilo: tale zona si estende lungo il corso del fiume fino a valle, a partire dalla confluenza del Nilo Azzurro-Bianco a Khartoum. L'area finale non genera di fatto alcun tipo di deflusso e l'evaporazione nel flusso si manifesta quindi in una perdita netta. La portata del Nilo viene regolata dal lago Nasser, mediante l'imponente diga di Asswan lungo il percorso finale del fiume. La maggior parte del flusso del fiume viene deviato verso gli schemi di irrigazione nel nord del Sudan e in Egitto e solo l'acqua di drenaggio e quella riutilizzata viene scaricata nel Mar Mediterraneo.

Viene di seguito riportato lo schema di afflussi-deflussi del bacino del Fiume Nilo lungo tutto il suo percorso, Figura 2.4.

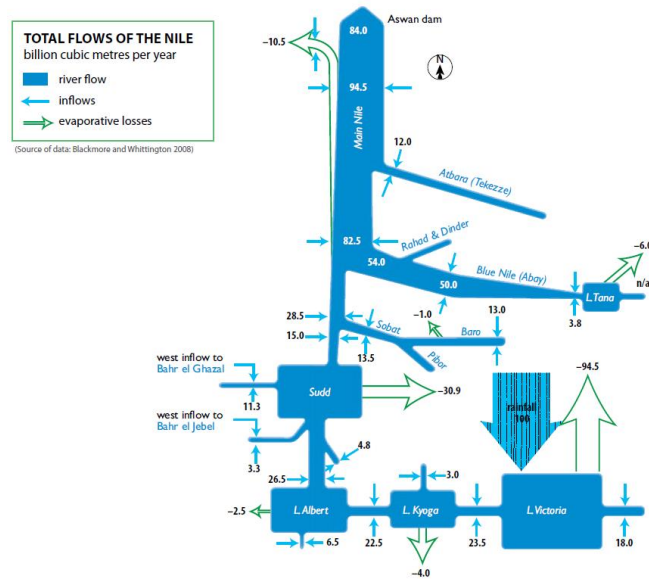


Figura 2.4 Sistema afflussi-deflussi Nilo (Blackmore and Whittington, 2008)

## 2.2.3 Precipitazioni

### 2.2.3.1 Distribuzione annuale delle precipitazioni

Le precipitazioni lungo l'area del Nilo sono caratterizzate da una distribuzione stagionale e spaziale fortemente diseguale. La maggior parte del bacino vive solo una stagione delle piogge, tipicamente nei mesi estivi. Solo la zona equatoriale ha due distinti periodi piovosi. Il bacino del Nilo, come in molte altre parti del mondo, presenta aree in cui i dati sulle precipitazioni sono scarsi o distribuiti in modo non uniforme e addirittura inesistenti in alcune situazioni. L'affidabilità e il volume delle precipitazioni generalmente diminuiscono spostandosi verso nord, con le regioni aride dell'Egitto e la regione settentrionale del Sudan che ricevono precipitazioni annuali insignificanti. La variabilità spaziale delle precipitazioni si riflette guardando l'andamento della vegetazione e dalla distribuzione dei corpi idrici superficiali nel bacino. Gran parte dello spartiacque del Nilo non genera deflusso. La piovosità media annua del bacino registra di norma un minimo inferiore a 50 mm nelle aree aride della parte settentrionale del Sudan e dell'Egitto e, un massimo di precipitazione nella regione dei laghi equatoriali, nelle aree intorno al lago Vittoria ed agli altopiani etiopi. Infatti, le principali aree di produzione del deflusso sono limitate all'Etiopia Highlands e all'altopiano dei laghi equatoriali, con qualche contributo dal Sud Sudan occidentale. In linea generale, l'area dei laghi equatoriali e degli altopiani etiopi riceve generalmente precipitazioni annuali superiori a 1000

mm, mentre le altre parti del bacino ricevono meno di 700 mm annuali [29]. La dimensione relativamente piccola dell'area di produzione del deflusso è fondamentale per spiegare come mai il volume idrico totale del Nilo presenti una profondità inferiore a 30 mm se distribuito sull'intero spartiacque (Figura 2.5).

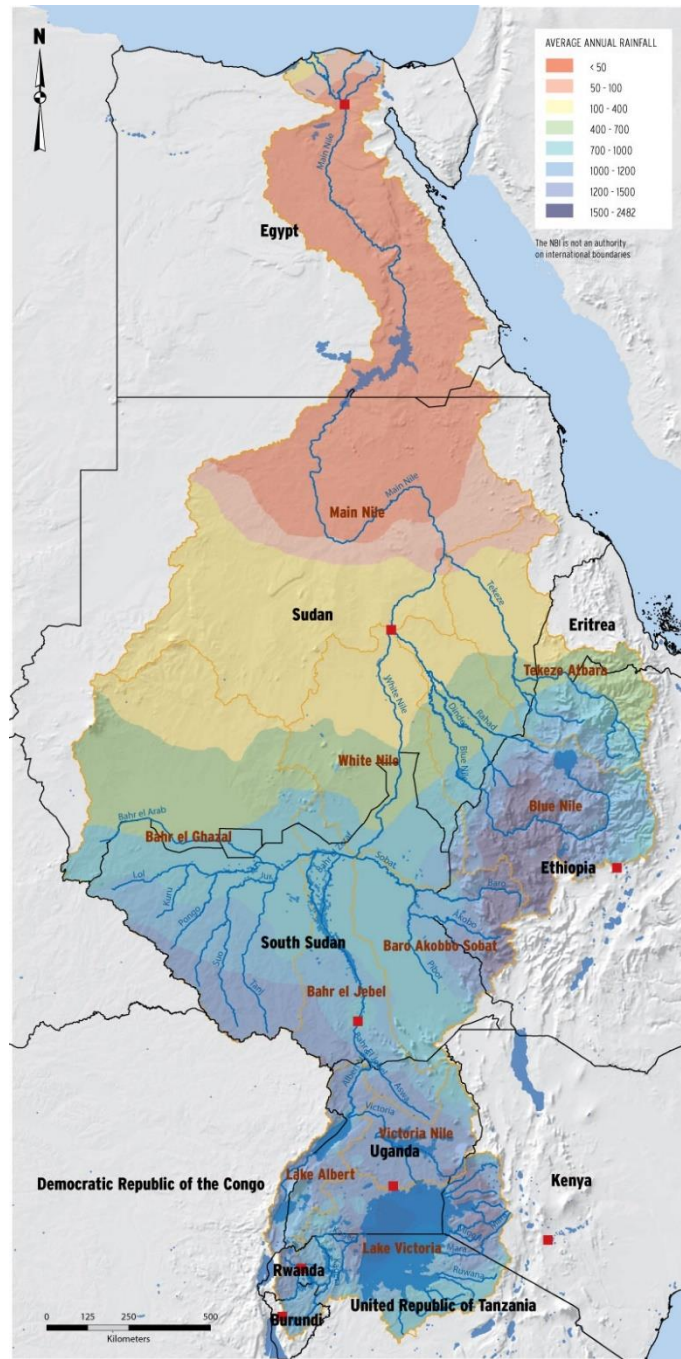


Figura 2.5 Distribuzione delle precipitazioni medie sul bacino del Nilo (FAO)

### 2.2.3.2 Distribuzione stagionale delle precipitazioni

L'elevata variabilità temporale delle precipitazioni nel bacino è dimostrata dalle registrazioni mensili delle precipitazioni. Di norma, vengono a presentarsi tre modelli di variazione stagionale delle precipitazioni:

- Un unico picco di pioggia da giugno a ottobre, con precipitazioni scarse o assenti negli altri mesi. Viene a presentarsi nei sottobacini del Nilo orientale e del Nilo principale.
- Una piovosità abbastanza uniforme, con un unico picco da aprile-ottobre. Viene a presentarsi nell'Uganda settentrionale e nel Sud Sudan.
- Una distribuzione a doppia punta, con picchi in marzo-maggio e settembre-novembre, con piogge considerevoli ma inferiori negli altri mesi, che si riscontra nell'altopiano dei laghi equatoriali del Nilo.

A livello spaziale, viene a manifestarsi una graduale diminuzione delle precipitazioni da monte del bacino sino a valle, con alcune aree a monte che registrano fino a massimi mensili di 700 mm nelle stagioni piovose (marzo-maggio) mentre le parti aride inferiori del bacino registrano precipitazioni di un massimo a circa 60 mm nella stagione delle piogge (luglio-settembre). Nel territorio dei laghi equatoriali esistono due distinte stagioni umide separate da stagioni secche, che gradualmente si trasformano in un'unica stagione umida, seguita da una secca nelle altre parti del bacino [30].

### 2.2.4 Temperatura

Lungo tutto il bacino del Nilo si presenta un'ampia variazione di temperatura, con la regione dei laghi equatoriali e degli altopiani etiopi che riportano il picco massimo della temperatura a circa 30°C, mentre lungo il corso del Nilo principale, parti del Nilo Azzurro ed il Nilo Bianco in Sudan arrivano fino a temperature di ben 45°C. L'area del bacino più a valle, quella più vicina al mar Mediterraneo, arriva invece a temperature relativamente basse, se confrontate con quelle presenti nel corso del Nilo principale, con massime di circa 38°C. Come per le precipitazioni, la temperatura mostra differenze temporali e spaziali nel bacino. Ci sono maggiori variazioni di temperatura nelle regioni aride del Sudan settentrionale e della maggior parte dell'Egitto, con deviazioni minori intorno all' equatore [31], (Figura 2.6).

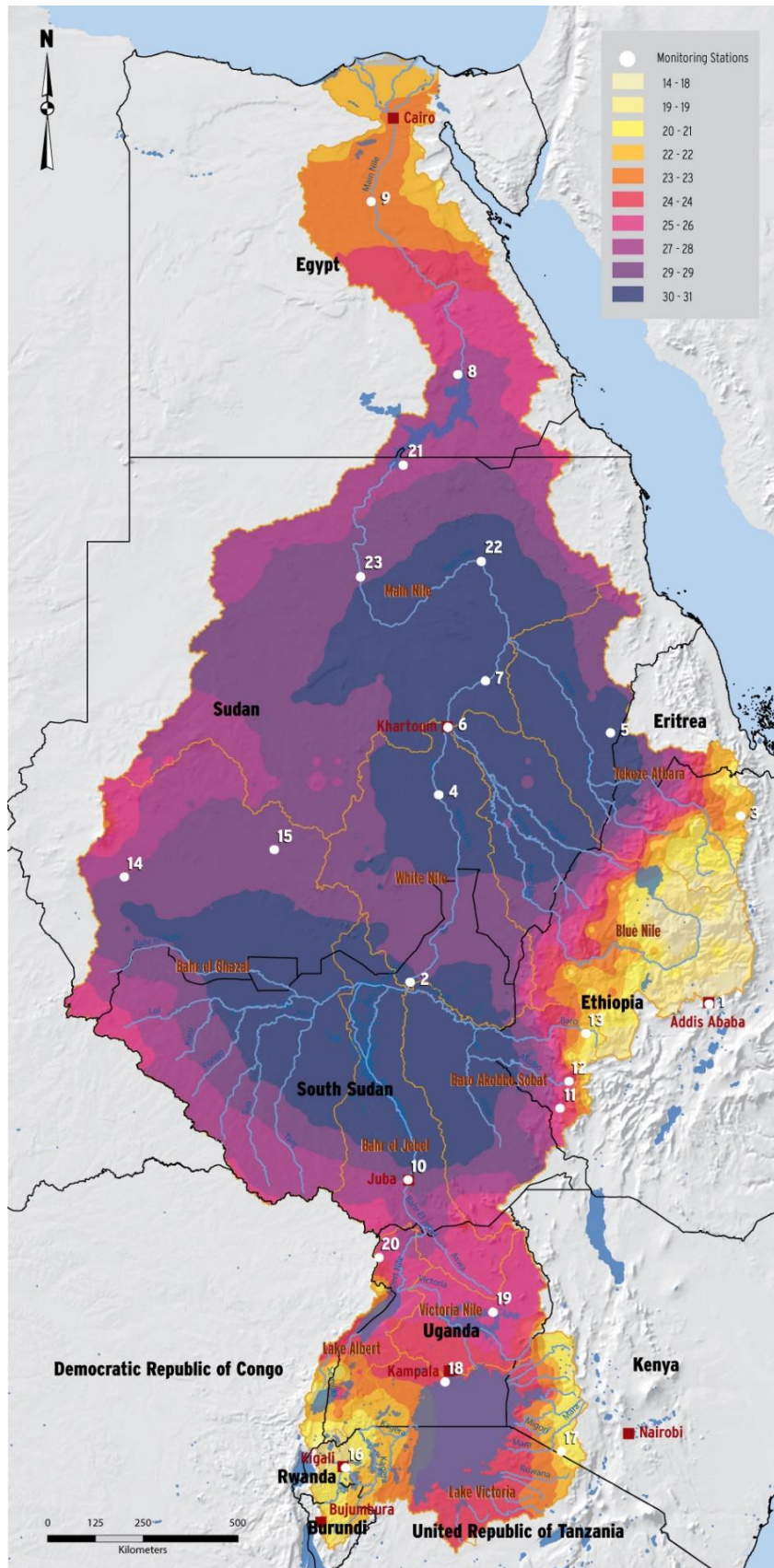


Figura 2.6 Distribuzione delle fasce di temperatura sul bacino del Nilo (FAO)

### **2.2.5 Evaporazione ed Evapotraspirazione**

L'evapotraspirazione (ET) risulta una delle costituenti principali nel bilancio idrico del bacino del Nilo, rappresenta circa l'87% delle precipitazioni dei bacini, cambiando da un sottobacino all'altro in base ai cambiamenti di uso/copertura del suolo che si manifestano ed alle condizioni climatiche prevalenti. Nell'analisi del vasto territorio del bacino del Nilo vengono a presentarsi valori di evapotraspirazione estremamente variabili in seguito alle variazioni di altitudine e di clima lungo tutto il territorio. Le aree umide e gli schemi di irrigazione rappresentano i picchi di valore dell'evapotraspirazione all'interno dei sottobacini a cui appartengono. Di fatto, i principali corpi idrici aperti (laghi e dighe), il lago Vittoria, il lago Nasser, il lago Tana, il lago Albert e il lago Kyoga vengono a identificarsi come i principali responsabili della perdita d'acqua nel bacino dovuta all'evaporazione.

In tutta l'area del bacino del Nilo quindi, l'evapotraspirazione effettiva e potenziale variano notevolmente. Infatti, le terre aride del Sudan e dell'Egitto hanno tassi di evapotraspirazione effettivi molto bassi poiché vi è scarsa presenza di acqua e di vegetazione disponibile per alimentarne il tasso. L'evapotraspirazione totale annua è massima nel sottobacino del Lago Vittoria, stimato a circa 307 miliardi di m<sup>3</sup>, seguito dal sottobacino del Nilo Azzurro, stimato a 264 miliardi di m<sup>3</sup>, quindi dal sottobacino Sudd stimato a 260 miliardi di m<sup>3</sup>. Il sottobacino del Nilo principale a valle di Khartoum ha i tassi di evapotraspirazione più bassi, stimati in 7 miliardi di m<sup>3</sup> all'anno [32] Figura 2.7.

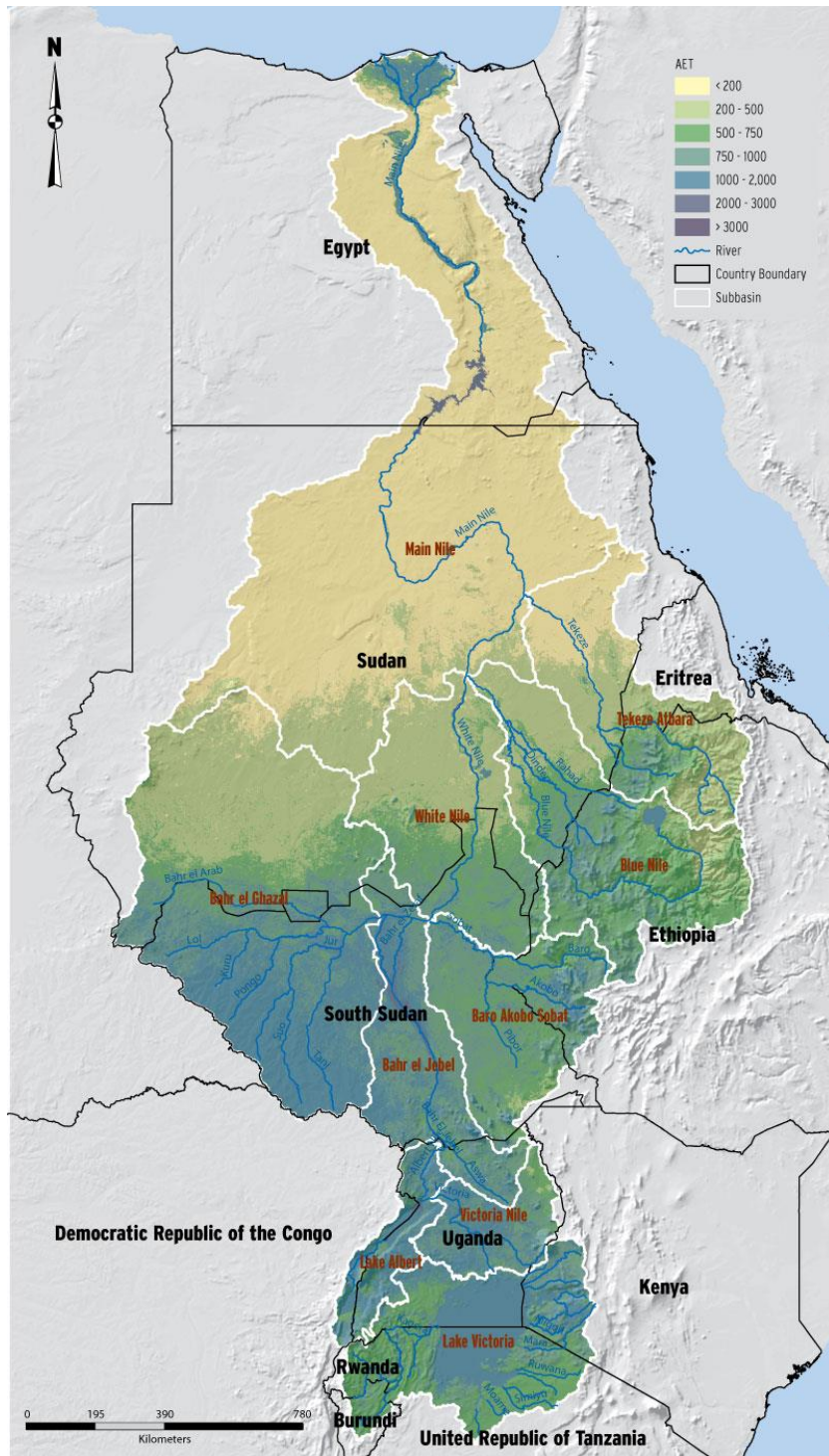


Figura 2.7 Distribuzione dei Tassi di Evapotraspirazione lungo il bacino del Nilo (FAO)



## 2.3 Gestione delle risorse idriche

I flussi relativamente modesti delle acque del Nilo devono essere condivisi tra popolazioni di paesi continuamente in crescita. Nel 2012 circa 238 milioni di persone popolavano l'area del bacino, cifra che si stima dovrebbe salire a 352 milioni entro il 2030 e continuare la sua crescita nel corso di tutto il XXI secolo [33]. La continua ed inesorabile crescita della popolazione sta mettendo una pressione senza precedenti sulle risorse naturali, socioeconomiche e gestionali [34].

L'interesse degli stati in questione però va a differenziarsi a seconda della relativa posizione geografica rispetto al corso del fiume. Attualmente, infatti, nelle acque a valle oltre 100 milioni di persone dipendono interamente dal Nilo per il loro approvvigionamento idrico; il rifornimento fornito attraverso le precipitazioni sull'Egitto e su gran parte del Sudan è minimo, se non addirittura nullo. Entrambi i paesi più settentrionali del bacino hanno una grande agricoltura irrigua, la quale rappresenta un settore che fornisce continua occupazione, riduce le costose importazioni di cibo e genera entrate estere. Egitto e Sudan non hanno alternative ai flussi del Nilo; quindi, un ridotto accesso alle sue acque comprometterebbe gravemente le loro economie [35].

La dipendenza quasi esclusiva dell'Egitto e del Sudan dal Nilo e la loro conseguente fragilità, è una caratteristica determinante del contesto idro-politico del fiume. La situazione è infatti diversa nei paesi a monte che, caratterizzati da un clima totalmente differente, ricevono precipitazioni significative, sebbene estremamente variabili. Gli stati a monte hanno grandi popolazioni rurali, le quali dipendono primariamente dall'agricoltura per il loro sostentamento, settore alimentato sia dalle abbondanti acque piovane che da un organizzato sistema di irrigazione il quale aumenta la resa di produzione. Nonostante la rapida crescita dell'urbanizzazione, le popolazioni rurali, di fatto, rimarranno dominanti anche nel 2050 nei paesi del Burundi, dell'Etiopia, del Kenya, del Ruanda, del Sud Sudan e dell'Uganda [32].

Gli sforzi che i vari stati mettono in atto per ridurre la dipendenza dalle risorse idriche vengono ulteriormente complicati dalle diverse problematiche di sviluppo che caratterizzano i paesi del Nilo, tra cui l'elevata crescita demografica, l'elevata disoccupazione, la povertà diffusa e le istituzioni governative sovraccaricate [30]. Gli stati del Nilo si trovano in diverse fasi di sviluppo, ma nessuno, a parte l'Egitto, ha raggiunto la fascia media dell'indice di sviluppo umano del Programma di

sviluppo delle Nazioni Unite (UNDP) utilizzato per classificare 187 paesi in base allo sviluppo umano. È significativo sottolineare che, sei paesi del Nilo sono tra gli ultimi venticinque del mondo. L'indice di sviluppo umano (HDI) è una statistica composta dagli indicatori di aspettativa di vita, istruzione e reddito pro capite, e viene reso noto ogni anno dal Programma delle Nazioni Unite per lo sviluppo (UNDP).

### **2.3.1 Confini idrici del Nilo**

Le acque disponibili del Nilo sono ad oggi completamente utilizzate per vari scopi produttivi, la domanda di acqua però continua a crescere a causa del costante aumento della popolazione e il conseguente sviluppo economico. Nell'Egitto e nel Sudan il consumo di acqua a scopo irriguo rappresenta la principale fonte di utilizzo della risorsa del fiume.

Tuttavia, gli altri paesi a monte stanno tentando negli ultimi anni di attuare o pianificare investimenti che potrebbero utilizzare una parte delle risorse rinnovabili date dal flusso del fiume. Ad esempio, il grande progetto della diga del GERD in Etiopia e lo sviluppo di un'irrigazione produttiva nei pressi del lago Tana, questi e molti altri, mostrano punti salienti riguardanti l'equità sull'appropriazione delle risorse idriche del Nilo tra gli stati. Infatti, soprattutto a causa della geografia e della storia che si è avvicinata nei secoli lungo il fiume, non vi è di fatto alcun tipo di integrazione economica tra le regioni a monte ed a valle del Nilo. Le zone umide di Sudd nel Sud Sudan creano una straordinaria barriera alla navigazione lungo il corso del Nilo, motivo per il quale, persino durante il dominio britannico i governanti non hanno mai completato la ferrovia da Capo al Cairo e le strade di collegamento nord-sud. Quindi, escluso il fiume è poco ciò che unisce gli undici paesi del Nilo. In Figura 2.8 vengono mostrati i confini politici del Nilo.



Figura 2.8 Confini politici del Nilo

### 2.3.2 Disponibilità di acqua pro-capite tra gli Stati partner

La crescita della popolazione, l'urbanizzazione ed il progresso socioeconomico sono le ragioni principali della diminuzione della disponibilità di acqua pro-capite negli stati del bacino del Nilo. Con una disponibilità di risorse idriche interne pro capite inferiore a  $1000 \text{ m}^3$ , Sudan, Ruanda, Kenya, Egitto e Burundi possono essere classificati come stati con scarsità d'acqua [29].

Tutto ciò richiede un migliore stoccaggio dell'acqua in questi stati del bacino del Nilo. Con una capacità di stoccaggio aggregata a livello di bacino di poco più di 200 miliardi di  $\text{m}^3$ , la maggior parte dei paesi del bacino ha un minor stoccaggio d'acqua pro-capite rispetto agli standard mondiali. In una regione caratterizzata da una forte variabilità stagionale e intra-annuale l'assenza di un'adeguata capacità di stoccaggio significa maggiore vulnerabilità agli impatti degli eventi climatici. Si evidenzia una tendenza tra l'indice di sviluppo umano (HDI) di un paese e lo stoccaggio di acqua pro-capite presente. Lo stoccaggio dell'acqua nei paesi con un HDI elevato ( $>0.85$ ) tende a essere compreso tra  $2.500$  e  $3.000 \text{ m}^3$  pro-capite, i

paesi con HDI di 0.55 tendono ad avere invece uno stoccaggio di circa 173 m<sup>3</sup> pro-capite. Ciò contribuisce ancor di più a confermare la netta disuguaglianza tra i vari paesi del mondo, soprattutto in ambito di disponibilità di risorsa idrica [36].

### **2.3.3 Infrastrutture lungo il bacino**

In seguito alle affermazioni riportate nel paragrafo precedente viene a spiegarsi perché l'espansione delle infrastrutture lungo il corso del Nilo negli ultimi dieci anni sia vertiginosamente aumentata. È ben mostrato dalla Figura 2.9, la quale mette a confronto le infrastrutture presenti ad inizio del XXI secolo e quelle nel successivo decennio. Le attività edilizie piuttosto frenetiche che si sono svolte nell'ultimo decennio, tuttavia, non sono state coordinate a livello di bacino o sottobacino; piuttosto, arriviamo a parlarne a livello nazionale. Le decisioni sui piani di investimento sono generalmente guidate da priorità locali o nazionali. A livello di bacino le implicazioni o i potenziali guadagni da progetti di sviluppo idrico generalmente non vengono presi in considerazione. Sebbene, l'infrastruttura idroelettrica progettata ed ultimata rappresenti una realtà inevitabile che ha dimostrato di essere un forte motore della cooperazione tra gli stati più a monte del Nilo, la diga del GERD è un esempio di questo sviluppo. Tuttavia, è bene sottolineare che questa collaborazione tra gruppi non considera per niente la prospettiva dell'intero bacino, né mira a ottimizzare i benefici ad un livello più ampio di bacino.

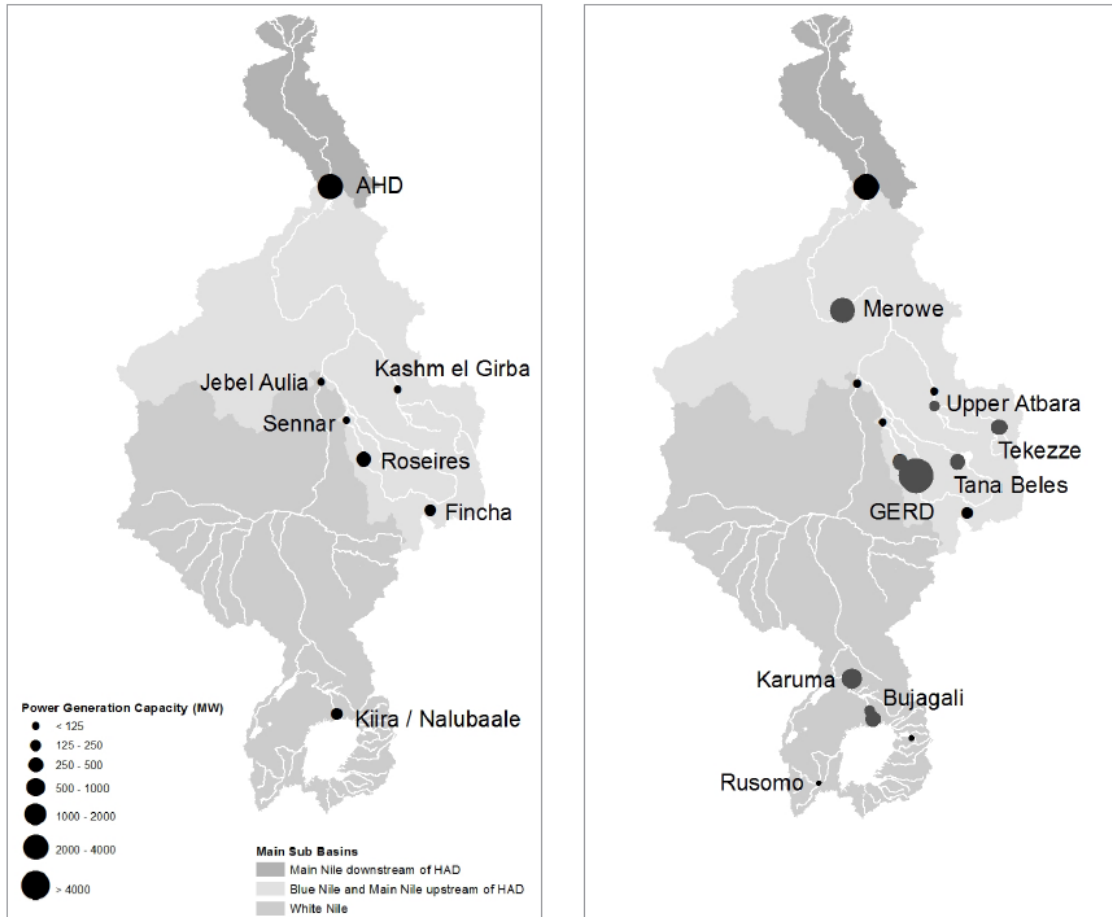


Figura 2.9 Confronto tra infrastrutture esistenti sul Nilo nel 2005 ed infrastrutture esistenti ed in costruzione nel 2015 [33]

I dati ottenuti dagli stati membri dell'NBI mostrano che nel 2014 c'erano 14 dighe di stoccaggio in tutto il bacino con una capacità di stoccaggio totale di circa 203 miliardi di m<sup>3</sup> (Figura 2.10) [37].

Degno di interesse è il fatto che dopo un periodo di quattro decenni di quasi stagnazione nella costruzione, da circa il 1968 al 2007, il bacino sta assistendo all'aggiunta al sistema di un numero sempre maggiore di dighe di stoccaggio. Inoltre, la diga di Owens Fall (Nalubalee) costruita allo sbocco del Lago Vittoria in Uganda fornisce ulteriori 200 miliardi di m<sup>3</sup> di stoccaggio vivo al lago. Il lago Nasser, invece, in Egitto, si è formato dopo la costruzione della diga di Asswan nel 1970. La capacità totale del bacino idrico di Assuan (162 miliardi di m<sup>3</sup>) consiste in un volume morto di stoccaggio di 31.6 miliardi di m<sup>3</sup>, un volume attivo di 90.7 miliardi di m<sup>3</sup> e un volume di emergenza per la protezione dalle inondazioni di 41 miliardi di m<sup>3</sup> [30].

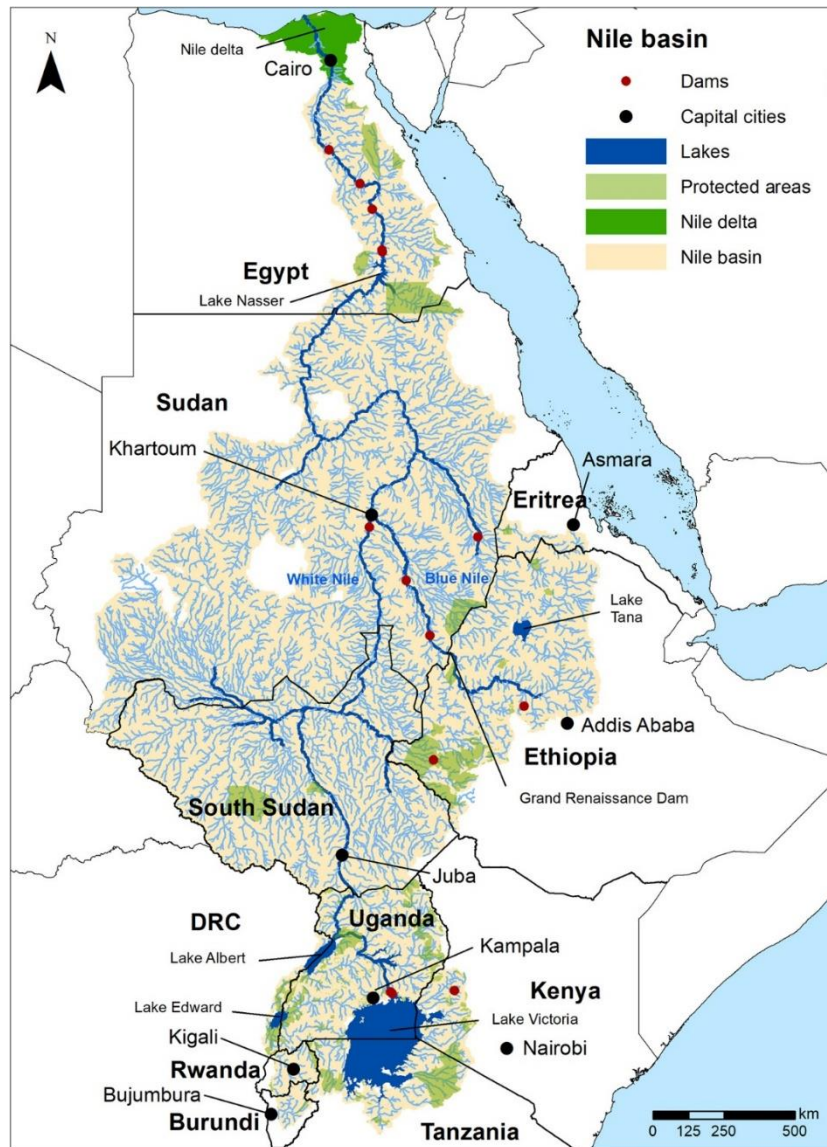


Figura 2.10 Infrastrutture Idrauliche lungo il bacino del Nilo [37]

Dopo la costruzione della diga di High Aswan, completata nel 1970, nessun deposito è stato aggiunto al bacino del Nilo fino al 2009, quando è stata costruita la diga di Tekeze in Etiopia con una capacità di 9.29 miliardi di  $m^3$ . Altre dighe di stoccaggio costruite da allora includono la diga di Merowe a nord del Sudan (capacità di 12.39 miliardi di  $m^3$ ) e l'innalzamento della diga di Roseries in Sudan (a 5.9 miliardi di  $m^3$ ) completate rispettivamente nel 2009 e nel 2012. La diga di Bujagali con una capacità di 0.75 miliardi di  $m^3$  è stata costruita in Uganda. Il consumo di energia pro capite negli stati del Nilo, ad eccezione dell'Egitto, è inferiore al fabbisogno per l'approvvigionamento rurale nell'Africa subsahariana (si parla di circa 250kWh/capite/anno), il che richiederebbe un aumento della produzione. Per soddisfare tale aumento l'energia idroelettrica è fondamentale per

colmare il deficit energetico negli altri Stati. L'attuale capacità installata di energia idroelettrica sul Nilo è stimata intorno ai 5.660 MW di cui il 40% è generato in Egitto, segue il Sudan con il 28% e l'Etiopia con il 18%. [30]

Nel 2012 sono iniziati i lavori per il Grand d'Etiopia Renaissance Dam (GERD), il quale è diventato il progetto chiave nel piano nazionale, al fine di riuscire ad aumentare esponenzialmente la fornitura di elettricità per l'intero stato etiope, entro il 2015. Con una capacità installata stimata di 6000 MW e una capacità di stoccaggio di 74 miliardi di m<sup>3</sup>, la diga, insieme alla sua centrale elettrica, una volta completata, sarà la più grande centrale idroelettrica dell'Africa. Nella Tabella 2.2 vengono riportate le principali infrastrutture presenti lungo in corso del Nilo nel 2020, la loro capacità di stoccaggio e il tempo di operatività [30].

Tabella 2.2 Dighe esistenti sul bacino del Nilo

Dighe esistenti all'interno del bacino del Nilo					
Nome	Stato	Altezza diga [m]	Capacità [km <sup>3</sup> ]	Scopo	Anno di inizio funzionamento
Assiut	Egitto	16	NA	irrigazione, navigazione	1902
Esna	Egitto	16	NA	irrigazione, navigazione	1902
High Aswan	Egitto	111	162	irrigazione, controllo piene, idroelettrico	1970
Nag Hamady	Egitto	16	NA	irrigazione, navigazione	1930
Old Aswan	Egitto	53	5	irrigazione, idroelettrico	1933
Atwero	Etiopia	NA	0.075	irrigazione	1995
Fincha'a	Etiopia	25	0.65	irrigazione	1973
Tana Beles	Etiopia	corso del fiume	-	idroelettrico	2010
Tekezze	Etiopia	185	3	idroelettrico	2009
Tis Abay I+II	Etiopia	corso del fiume	3.5	idroelettrico	1953/2001
Jebel Aulia	Sudan	22	3.5	irrigazione, idroelettrico	1937
Khashm El Gibra	Sudan	35	1.3	irrigazione, idroelettrico	1964
Merowe	Sudan	67	12.5	irrigazione, idroelettrico	2009
Roseires	Sudan	60	3	irrigazione, idroelettrico	1966
Sennar	Sudan	48	0.93	irrigazione, idroelettrico	1925
Bujagali	Uganda	30	0.75	idroelettrico	2011
Owen Falls	Uganda	30	200*	irrigazione, idroelettrico	1954

\*capacità aggiuntiva sul lago Vittoria

### 2.3.4 Gestione dell'acqua ad uso agricolo, municipale ed industriale

L'agricoltura è una delle principali fonti di sostentamento nel bacino del Nilo, la quale sostiene decine di milioni di persone. Il settore primario fornisce occupazione per oltre il 75% della forza lavoro totale e contribuisce a un terzo del PIL nel bacino. Circa 5.4 milioni di ettari di terra sono sotto irrigazione in tutto il bacino, bisogna però considerare che oltre il 97% di quest'area si trova in Egitto e Sudan; l'estrazione

totale per l'irrigazione nel resto dei paesi del bacino del Nilo è stimata al 3%. La superficie effettiva coltivata in media è di circa 6.4 milioni di ettari ed è variabile a seconda di quale percentuale delle aree attrezzate per l'irrigazione è coperta da colture in un dato anno e se sono piantate più colture [35].

La domanda totale stimata di acqua per l'irrigazione è di circa 85 miliardi di m<sup>3</sup> all'anno; il prelievo effettivo dal Nilo per l'irrigazione a livello di bacino è stimato però intorno ai 82.2 miliardi di m<sup>3</sup>. Il fabbisogno idrico di irrigazione non viene però soddisfatto a pieno; la scarsità d'acqua in termini sia di scarsità d'acqua fisica che di scarsità idrica economica rimane il principale fattore limitante per lo sviluppo agricolo di tutti i paesi del bacino. Sia le variazioni spaziali delle precipitazioni nel sistema pluviale, sia la gestione del sistema nelle aree irrigate rappresentano la principale causa di una mancanza di sufficiente efficienza nella produttività.

La domanda totale di acqua per usi municipali ed industriali è stata stimata attorno ai 12.900 milioni di m<sup>3</sup> all'anno per l'intero bacino del Nilo; quasi il 97% di questa domanda proviene dall'Egitto. Nell'insieme, i paesi del Nilo utilizzano quasi il 90% delle risorse idriche rinnovabili della regione. L'Egitto e il Sudan, i quali hanno una maggior richiesta idrica rispetto ai paesi a loro confinanti, rappresentano i maggiori consumatori di acqua rispettivamente con il 57% ed il 31% del totale dei prelievi di acqua rinnovabile. I prelievi pro-capite per questi due paesi sono quasi 10-15 volte gli importi prelevati da altri paesi del bacino [38]. Si presume che la popolazione negli stati bagnati dalle acque del Nilo raddoppierà quasi entro il 2030, prevedendo un aumento della domanda di acqua domestica da cinque a sei volte nello stesso periodo.

Sebbene le attività di pesca siano generalmente occupazioni che non richiedono consumi particolari di acqua, necessitano tuttavia di quantità particolari e tempistiche stagionali dei flussi nei fiumi e nelle zone umide dipendenti, quindi laghi ed estuari. Le risorse ittiche d'acqua dolce nel bacino del Nilo sono probabilmente tra le risorse naturali raccogliibili più resistenti, a condizione che il loro habitat, compreso il periodo e la variabilità del flusso, sia mantenuto. La produzione annuale di pesce fresco del bacino del Nilo è stimata in tre milioni di tonnellate di cui il 57% si suddivide per la pesca di lago e di fiumi. L'Egitto ha il rendimento maggiore nella produzione di pesca con il 50%, seguito dall'Uganda con il 19% e dalla Tanzania con il 12%.



Nel complesso, l'agricoltura domina tutti gli altri usi idrici nel bacino, rappresentando oltre l'80% dei prelievi d'acqua [39]. A causa della maggiore intensità di raccolto, circa il 79% della superficie totale coltivata in agricoltura irrigua nel bacino del Nilo si trova in Egitto. L'area irrigua attrezzata è dominata dai grandi schemi in Egitto (3.45 milioni di ettari) e Sudan (1.764 milioni di ettari), mentre nelle restanti parti sono state sviluppate finora solo aree di irrigazione relativamente piccole.

La stragrande maggioranza del fabbisogno idrico di irrigazione è fornita da acque superficiali. Una valutazione realistica del fabbisogno alimentare futuro è quindi essenziale affinché i governi del bacino del Nilo prendano decisioni ponderate sulla pianificazione agricola e sull'uso delle risorse idriche. Nella maggior parte dei paesi del bacino, i sistemi di irrigazione utilizzano il metodo di distribuzione dell'acqua per gravità superficiale, nella quale l'acqua viene convogliata attraverso canali aperti e infine distribuita sui campi di irrigazione per gravità. Tuttavia, alcune irrigazioni pressurizzate sono praticate in Egitto, Sudan e in alcuni schemi in Etiopia, Kenya e Uganda. In tutti i paesi ad eccezione dell'Egitto e, in una certa misura, in Sudan, non esistono sistemi di drenaggio che consentano di rimuovere l'acqua in eccesso dai campi di irrigazione. Quindi, dai circa 82 miliardi di metri cubi di acqua prelevati per l'uso irriguo, solo 8.6 miliardi vengono riutilizzati nell'acqua di drenaggio, ed esclusivamente in Egitto si applica tale pratica [38].

## **2.4 Inquadramento storico-climatico**

### **2.4.1 Analisi delle piene nella storia**

Sin dai primi albori della storia è stata riconosciuta la stretta dipendenza tra il livello del Nilo e le variazioni climatiche della zona equatoriale e sahariana. Una delle più antiche registrazioni delle famose piene del Nilo affonda le radici nella Pietra di Palermo, una stele in diorite datata alla V dinastia (Figura 2.11). Essa rappresenta il più antico annale regale conosciuto nell'Egitto faraonico, e costituisce una fonte fondamentale per la ricostruzione cronologica dell'Antico Regno. La stele riporta in incisione l'elenco dei faraoni d'Egitto dalla prima alla quinta dinastia, i nomi delle loro madri ed il livello raggiunto anno per anno dalle piene del Nilo [40].



*Figura 2.11 Pietra di Palermo, Museo archeologico Salinas a Palermo*

Le iscrizioni dei valori di piena riportate sulla tavola vengono registrate con il sistema di misura adottato ai tempi della civiltà faraonica, nello specifico, in cubiti, spanne, palmi e dita, i quali secondo la traduzione riportata da Bell corrispondono a: 1 cubito = 7 palmi = 28 dita = 2 spanne = 0.524 m; [41]. Le incisioni riportate sulla pietra settano l'annotazione delle piene valutando l'escrescenza dell'acqua al di sopra dei campi al momento in cui l'inondazione registra il suo massimo; tutto ciò chiaramente non corrisponde all'altezza del fiume riportata invece nei Nilometri. Non meno degno di nota è il fatto che nella pietra di Palermo non sono riportate informazioni sui periodi di magra del fiume.

Sono così registrati un totale di 91 livelli: 43 livelli per la I dinastia, di cui 7 sono illeggibili, con un'altezza media di 2.8 m, 21 livelli per la II dinastia, in cui la media delle piene scende a 1.6 m. Un successivo incremento nelle piene si registra durante la III-IV dinastia con una media di 1.8 m. La fase umida dell'Olocene termina alla fine della V dinastia, e questo si ripercuote sulla storia dell'intero Egitto [23]. Il deserto inizia ad assumere l'aspetto attuale ed inizia a palesarsi un drastico cambiamento nella flora e nella fauna. Il risultato più evidente della fine dell'Olocene pluviale si ripercuote anche sulla portata del Nilo, la quale scende fino a raggiungere il minimo attorno al 2200 a.C. Da questo momento, e per circa 200 anni si assiste ad una serie di fluttuazioni, almeno due volte in questo periodo, in cui il Nilo cala bruscamente per un certo numero di anni successivi. Il primo di questi periodi segue la fine della VI dinastia e dura circa 50 anni, mentre il secondo episodio si verifica

circa 150 anni dopo alla fine della XI dinastia e dura poco più di una decina d'anni. Questi avvenimenti coincidono con periodi di disordini e crisi nella civiltà faraonica. All'inizio del Medio Regno invece ha avvio un momento di grande prosperità. In Egitto, in questa fase, vengono a susseguirsi piene generalmente normali e buone. Ancora una volta cambia il parametro di riferimento del livello zero per le registrazioni. Durante il Medio Regno, il livello di riferimento per la misurazione del Nilo è da intendersi più basso rispetto al livello del letto attuale. Le fonti di annotazione delle piene in quegli anni diventano i Nilometri, per cui i valori riportati si riferiscono al livello zero del letto del fiume. Sotto il regno di Sesostri I viene registrata una piena di 21.5 cubiti (ovvero 11.3 m) nel Nilometro di Elefantina ad Asswan, il quale aveva gradini equidistanti che conducevano direttamente al Nilo e indicatori sui muri a diversi livelli per ogni gradino (Figura 2.12).



*Figura 2.12 Nilometro sull'isola Elefantina, Asswan*

Nel frattempo, vengono registrati 12.5 cubiti (6.6 m) nella “casa dell'inondazione” a Menfi, e 6.5 cubiti (3.4 m) nell'allora Diospolis (Tell Balamoun) nel Delta [41]. Le misure per Asswan e Menfi, tuttavia, secondo recenti studi non possono ritenersi paragonabili a registrazioni contemporanee, in quanto riferite a punti zero diversi dalle misure attuali. La continua ricalibrazione del punto zero rappresenta l'ostacolo

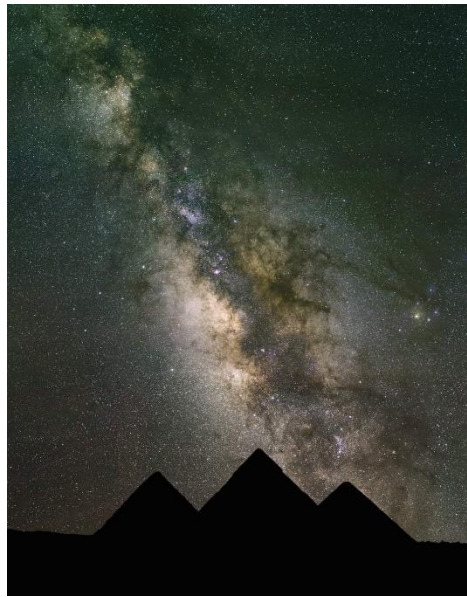
più grande per poter avere un effettivo e consistente confronto con i dati odierni. Sono state perciò corrette le misurazioni tenendo conto dei vari cambiamenti accorsi lungo il percorso sia storico che morfologico del Nilo. Nello specifico, la registrazione effettuata a Menfi viene ricalibrata tenendo conto del livello di abbassamento del Nilo dopo la confluenza col Fayyum; è stato infatti calcolato che circa il 40% della portata di una piena normale di 600 milioni di m<sup>3</sup> al giorno, può essere deviata nella depressione, fino a riempirla per la capacità di 10 miliardi di m<sup>3</sup> in meno di 40 giorni. Per tener conto di ciò il livello delle acque a Menfi deve essere ridotto di 1 m. Una simile discrepanza si riscontra anche per le misurazioni effettuate ad Asswan, confrontando la piena registrata in passato con misurazioni di piene più recenti. La soluzione a questa problematica è stata risolta ammettendo che il livello zero del Medio Regno fosse in realtà più basso di quello moderno. L'omologazione di tutti i dati ad un unico punto zero di riferimento risulta ancora ardua, considerando sia la variabile di errore umano nella trascrizione, sia quella di tipo naturale e idrogeologico, in quanto viene supposto che il Nilo depositi e aumenti il livello del letto di circa 10 cm ogni 100 anni [23].

Dall'inizio del Nuovo Regno sino alla fine del regno di Ramesse II le piene furono normali, sempre leggermente più alte di quelle attuali. Seguì un periodo di piene scarse dal 1200 a.C. per un periodo di 225 anni che vide l'abbandono dell'agricoltura nell'allora Nubia, e l'insabbiamento del ramo Pelusiaco del Delta. Ulteriori registrazioni dei livelli di piena furono effettuate nel tempio di Karnak [42]. Lungo il periodo greco-romano sino alla conquista araba i pochi dati disponibili indicano un Nilo alto, ad eccezione degli anni tra fine VI e inizio VII secolo d.C. in cui Plinio il Vecchio ricorda una piena bassa di 5 cubiti ad Assuan nel 48 a.C. e una alta a 18 cubiti nel 45 d.C. Solo successivamente alla costruzione del Nilometro sull'isola di Roda al Cairo nel 715 d.C., sono disponibili letture ufficiali del livello del Nilo fino al XX secolo [43].

#### **2.4.2 Periodo Arcaico e Pre-Dinastico (3500- 2686) a.C.**

La storia egiziana può cominciare dall'età paleolitica, sebbene sia una storia fatta prevalentemente di ipotesi e supposizioni. Nel paleolitico, infatti, la vallata del Nilo era molto diversa da come si presenta oggi: il fiume copriva pressoché tutta la regione, in concomitanza ad un clima molto più umido di quello attuale faceva sì che un immenso acquitrino si estendesse lungo la vallata fino al Delta. Per gli antichi

egizi il Nilo rappresentava la fonte della vita, l'ordine cosmico e la creazione stessa (Figura 2.13).



*Figura 2.13 Via Lattea vista dalle piramidi, Egitto*

La natura ciclica degli eventi scanditi dal ripetersi delle fasi del Nilo, della Luna e del Sole regolava l'ordine delle cose. Il dio Osiride impersonificava questo concetto fondamentale di rinascita, crescita e morte. Si credeva inoltre che il Faraone, per estensione, mezzo dio e mezzo uomo, fosse la causa delle acque vivificanti che portavano fertilità in Egitto e garantivano le stagioni [44]. La vita degli Egizi era fortemente influenzata e dipendente dalle acque del Nilo e dal mutare del clima.

Le condizioni climatiche in Africa sono variate sostanzialmente durante il tardo quaternario con periodi umidi e aridi alternati, controllati principalmente dal regime monsonico africano. I monsoni condizionano le precipitazioni atmosferiche e danno origine a due stagioni che si alternano nell'anno; una umida e piovosa, quando soffiano dal mare verso la terra, e l'altra secca, quando soffiano dalla terra verso l'oceano.

I cosiddetti periodi umidi del passato, caratterizzati appunto da una maggiore acquosità atmosferica rispetto alle condizioni attuali sono stati associati anche al fenomeno della migrazione verso nord della cintura delle precipitazioni, governata dalla Zona di Convergenza Intertropicale (ITCZ; [45]), l'ITCZ è un'area del pianeta Terra, mediamente situata in prossimità dell'equatore, dove si ha la convergenza degli alisei dell'emisfero boreale e dell'emisfero australe, e la risalita di masse d'aria calda che determinano l'area di instabilità equatoriale, con piogge e temporali. Questa migrazione è governata da cambiamenti di

insolazione guidati dalla precessione e modulata dall'eccentricità ([46]; [47]). I periodi umidi passati erano caratterizzati da una maggiore portata ed esportazione di sedimenti dai grandi sistemi fluviali africani ai margini oceanici circostanti. Il periodo più recente di piogge più intense, il periodo umido africano (AHP, African Humid Period: compreso tra i 14'600 e 5'500 anni fa; Shan [26]), ha portato all'espansione dei corpi idrici continentali [47], allo sviluppo di copertura vegetale sull'attuale deserto saheliano-sahariano [26] e apporti terrigeni indotti da fiumi molto elevati. L'analisi stratigrafica dei sedimenti fornisce un archivio adeguato che permette la ricostruzione delle variazioni climatiche del passato. Precedenti studi hanno dimostrato che i periodi umidi passati venivano sistematicamente accompagnati da tassi di deposizione più elevati e da una maggiore offerta terrigena, riflettendo la forte erosione fisica e i processi di trasporto dagli altopiani etiopi legati all'attività monsonica africana.

Un altro fattore di influenza, che gioca un ruolo chiave in molte delle principali fasi di modificazione del delta, è legato ad eventi climatici legati all'oscillazione e variazione meridionale di El Niño (ENSO). El Niño-Oscillazione Meridionale (ENSO - El Niño-Southern Oscillation) è un fenomeno climatico periodico che provoca un forte riscaldamento delle acque dell'Oceano Pacifico Centro-Meridionale e Orientale nei mesi di dicembre e gennaio in media ogni cinque anni. Il fenomeno provoca inondazioni nelle aree direttamente interessate, ma anche siccità nelle zone più lontane da esso e altre perturbazioni che variano a ogni sua manifestazione. [48].

A causa della sua posizione geografica con un intervallo latitudinale che passa dai 4° S ai 31°N e dei collegamenti con altre zone climatiche del mondo, la valle del Nilo è una regione chiave per studiare la possibile natura globale della variabilità climatica e il suo ruolo nel guidare il cambiamento sociale. Il sistema idrico del fiume durante il trascorrere dell'Olocene ha risposto ad una progressiva diminuzione nel tempo dell'insolazione estiva la quale ha conseguentemente ridotto il contrasto terra/mare dell'Africa e il movimento settentrionale delle fasce piovose monsoniche, quindi dell'ITCZ, che, nel caso del sistema in esame, si trovavano a 500 km a nord del presente durante la prima fase dell'Olocene [47]. L'attività convettiva all'interno dell'ITCZ è stata inoltre ridotta da una graduale diminuzione della forza del vento monsonico sull'Africa orientale, e dall'afflusso di umidità dall'Oceano Indiano meridionale [49]. La fine delle condizioni umide dell'Olocene medio in Nord Africa

sembra essere contrastata spazialmente e temporalmente [46]; [50]. In Egitto e Sudan, l'intensificazione delle condizioni aride ha probabilmente raggiunto una soglia circa 6000 anni fa, dopodiché le attività pastorali oltre la valle del Nilo non furono più sostenibili [51]. Tutti questi cambiamenti hanno comportato una graduale diminuzione dei siti di occupazione e un conseguente spopolamento della regione sahariana, la quale iniziava a presentare condizioni climatiche sempre più inospitali. È possibile risalire alla fine della fase umida dell'Olocene studiando i tassi di sedimentazione, i quali registrano un significativo aumento che potrebbe essere coerente con il quadro di iniziale deperimento della vegetazione sahariana. La produzione di polvere legata alle condizioni aride del Sahara ha ulteriormente accentuato le condizioni di siccità, riducendo le precipitazioni monsoniche mediante un raffreddamento diretto della superficie [45]. Tutto ciò risulta coerente con uno spostamento verso sud della posizione media estiva dell'ITCZ. Questi cambiamenti nelle dinamiche climatiche hanno partecipato alla concentrazione delle società lungo il corridoio fluviale del Nilo e hanno agito da precursore dell'emergere delle sue prime civiltà politicamente centralizzate ( [7]; [52]; [51]). La proliferazione delle antiche civiltà della valle del Nilo derivava sia in parte dalla capacità di quest'ultimi di adattarsi alle mutevoli condizioni ambientali sia grazie alla ridotta portata del fiume, legata all'indebolimento del monzone etiope, la quale è stata particolarmente favorevole all'espansione dell'agricoltura nelle immense terre delle pianure alluvionali. Diversi studi, hanno suggerito che l'aridità accorsa con la fine della fase umida globale potrebbe aver migliorato l'incisione del fiume e il drenaggio di terreni precedentemente paludosi in prossimità del canale principale del Nilo. Tutto ciò ha permesso di fondare le radici dei primi alberi dell'immensa civiltà Faraonica.

### **2.4.3 Antico Regno (2686 - 2181) a.C.**

L'Antico regno è il periodo dell'Antico Egitto che va dalla III alla VI dinastia e che, indicativamente è compreso tra il 2700 a.C. ed il 2100 a.C. A questo periodo risalgono le costruzioni più famose ed imponenti della civiltà egizia: le piramidi di Giza, la Grande Sfinge e la statua di Chefren in trono. (Figura 2.14 e Figura 2.15).



*Figura 2.14 Piramidi di Giza*

All'inizio dell'Antico Regno era già avvenuta la graduale transizione in un unico Stato unitario, guidato dal susseguirsi delle dinastie faraoniche, delle popolazioni stanziate lungo le sponde del fiume. Durante questo periodo, il rafforzarsi dell'istituzione monarchica faraonica centralizzò il controllo dello Stato lungo tutto il territorio dominato.



*Figura 2.15 La Grande Sfinge, Egitto*

Venne regolato il possesso e l'utilizzo della terra, il realizzarsi delle opere pubbliche e la gestione delle risorse necessarie per la sussistenza e la crescita della civiltà. I faraoni, dei fra gli uomini, facevano inoltre concessioni terriere ai propri culti funerari e ai templi locali, al fine di garantirsi i mezzi necessari al rispettivo culto



post-mortem. Gli egittologi ritengono che tale pratica, abbia lentamente consumato il potere economico e la ricchezza della casa reale, al punto di non poter più sostenere adeguatamente questa ingente amministrazione sviluppata. Vennero così fuori i primi sintomi di una crisi interna, tra il 2200 a.C. e il 2150 a.C., nella quale le reggenze locali iniziavano a sfidare l'autorità del Faraone. Tutto ciò, unito ad un grave cambiamento climatico, portò l'Egitto in 150 anni di carestia e guerre civili e alla conseguente caduta dell'Antico Regno.

La fine dell'Antico Regno coincide con periodi piovosi e con eventi di deflusso d'intensità sorprendentemente elevata. L'analisi delle strutture funerarie, nell'area del Saqqara le quali mostra prove di danni causati dal deflusso intensivo di acqua e macerie. Prove di schemi simili di condizioni mesoclimatiche sono state attestate anche in altri siti archeologici nella regione dell'allora capitale, Menfi. Ad esempio, a Tabbet el-Gesh, nel sud di Saqqara, gli archeologi francesi hanno scavato un frammento di un'ampia necropoli della fine della VI dinastia [53]. La maggior parte delle tombe scoperte porta ancora segni di distruzione, compresi i bordi arrotondati dei mattoni che non lasciano dubbi sul fatto che siano dovuti a piogge durature e molto intense [53]. Gli scavi indicavano stagioni molto più umide in passato, nettamente diverse da quelle attuali [54]. Un confine stratigrafico tra versante e depositi eolici a Saqqara indica una trasformazione relativamente rapida circa 4000 anni fa da un clima temperato secco (con intervalli umidi alternati) all'estremamente secco, simile a quello odierno. La deposizione di pendii e depositi eolici si è verificata contemporaneamente a basse inondazioni catastrofiche del Nilo, riportate in diverse iscrizioni negli anni 2200-1950 a.C. Nello stesso arco temporale è stato rilevato in realtà un cambiamento climatico sincrono a livello mondiale, conseguenza dei monsoni più deboli in Etiopia in concomitanza di uno spostamento verso sud della zona di convergenza intertropicale in Africa. La concomitanza delle basse inondazioni del Nilo e l'inizio della desertificazione del nord Egitto dovute allo spostamento progressivo verso sud della ITCZ hanno presumibilmente contribuito al crollo della dell'Antico Regno. Inoltre, piogge intense e ripetute allo stesso tempo hanno provocato accumuli diffusi di inondazioni detritiche nel nord dell'Egitto. Presumibilmente innescati dalla variazione dell'oscillazione del Nord Atlantico.

#### 2.4.4 Medio Regno (2055-1650) a.C.

Il Medio Regno è la fase della storia egizia che si colloca tra il 2055 a.C. ed il 1650 a.C., arco temporale in cui il potere è passato dalla XII alla XIII dinastia e che corrisponde ad una rinascita dello stato unitario dopo la fase di frammentazione accorsa in seguito crollo dell'Antico Regno. Il visir Amenemhet assunse il pieno potere intorno al 1985 a.C. diventando faraone sotto il nome di Amenemhet I e dando origine alla XII dinastia, una delle più potenti e fiorenti dell'intera storia egizia. Il Medio Regno, scrive Said [22] rappresenta un periodo di grande prosperità per la civiltà. Ad eccezione di un intervallo di circa 90 anni (1840-1770 a.C.) in cui vengono registrate piene eccezionalmente alte, l'Egitto ha goduto generalmente di piene normali e buone. L'allora faraone, Amenemhet I spostò la capitale a Ity Tawy (Amenmehmat-Ity-Tawy, ovvero "Amenemhat Dominatore delle Due Terre" ) nella regione del Fayyum. (Figura 2.16).



Figura 2.16 Posizione dell'oasi del Fayyum rispetto al corso del Nilo

I reggenti della XII dinastia si promulgarono più attivamente rispetto al passato nella progettazione di diversi piani di irrigazione per incrementare la resa agricola della zona. I faraoni della XII dinastia, in particolare Amenemhet III, riuscirono a stabilizzare il livello del lago Qarun, allora chiamato Moeris, tra i 17 e i 20 m.slm ripristinando ed allargando il canale di collegamento fra i due, il Bahr Yusef. Il lago si colloca nella grande depressione Birket Qarun, nella regione del Fayyum e fungeva da protezione per le terre da eccessive inondazioni, costituendo inoltre una fonte di riserva di acqua nei periodi più asciutti. Le più importanti registrazioni dei livelli di piena del Medio Regno vengono dalla Nubia dalle zone di Semna e Koumma [22], tra 1840 e 1770 a.C. Attorno al 1970 a.C. le condizioni umide presero campo bruscamente nell'Africa orientale; il lago Rudolf divenne 75 metri più profondo e traboccò inondando il Nilo [55], portando il livello del Nilo Bianco ad un valore più alto di circa 2-3 metri rispetto a quello attuale, con una portata 10 volte maggiore [56]. Nelle cataratte della Nubia sudanese sono presenti almeno ventisette iscrizioni datate 1840-1770 a.C. le quali riportano inondazioni di circa 8-11 metri superiori a quelle moderne [57]. Il repentino aumento di portata si manifestò con volumi d'acqua tre o quattro volte maggiori delle piene massime registrate sino ad allora, le quali, probabilmente portarono a creste di 2-4 metri superiori a quelle delle inondazioni più grandi registrate ad Assuan dal 1870 d.C. Un Nilo così irregolare e sregolato in Egitto, con un intervallo di ricorrenza di circa un anno su tre, non è del tutto senza precedenti; un evento simile, infatti, si è verificato ben 12.000 anni fa, ed è stato ben riportato da Butzer [58]. Questi gravi straripamenti del fiume contribuirono al lento declino del regno di Amenemhet III, provando ancora di più l'economia del paese. Durante il suo periodo di reggenza infatti; Amenemhet III permise ad alcune popolazioni cananee d'origine semitica di stanziarsi nella zona orientale del Delta, reclutando così una nuova ingente forza-lavoro per le proprie attività minerarie e per i progetti architettonici del regno. I progetti ambiziosi del faraone, le anomale inondazioni del Nilo e l'invasione da parte della popolazione asiatica degli Hyksos portarono alla lenta ma inesorabile caduta del Medio Regno e all'affacciarsi di un periodo intermedio di disordini e tumulti, culminato con la nascita di una nuova dinastia e l'inizio del più grande periodo di fioritura della civiltà egiziana, il Nuovo Regno.

### 2.4.5 Nuovo Regno (1550-1075) a.C.

Il Nuovo Regno è il periodo della storia egizia nella quale si susseguono le dinastie XVIII, XIX e XX. I faraoni del Nuovo Regno a partire da Amosi I diedero vita a un'era di ineguagliato splendore ristabilendo ed ampliando i confini, riprendendo il programma di bonifiche territoriali e tessendo strette relazioni diplomatiche con le reggenze vicine. La capitale del regno divenne Tebe, dove aveva sede il culto del dio Amon, destinato a diventare durante questa fase, il più importante di tutto l'Egitto. Il figlio di Amosi I, Amenofi I iniziò i lavori delle grandi costruzioni di Karnak; differenziandosi dai suoi predecessori, avvezzi all'utilizzo delle piramidi come monumenti sepolcrali, scelse di farsi seppellire in una tomba a camera scavata nelle pareti rocciose di una valle vicino Tebe, vallata che diventerà poi la celebre Valle dei Re (Figura 2.17).



*Figura 2.17 Valle dei Re, Egitto*

Dopo di lui, anche i suoi successori seguirono questa consuetudine e la tipologia della piramide venne definitivamente abbandonata (Figura 2.18, maschera del faraone Tutankhamon). Le campagne di conquista militare guidate prima da Thutmosi I e dal nipote Thutmosi III estesero l'autorità faraonica sul più vasto impero che l'Egitto avesse mai posseduto; nell'intercorrere tra i due, governò come reggente Hatshepsut, madre di Thutmosi III. Durante il suo regno, vennero intensificati gli scambi commerciali, mentre venne sospesa la politica espansionistica dei predecessori.



*Figura 2.18 Maschera del faraone Tutankhamon, Museo egizio del Cairo*

Alla morte di Thutmosi III, nel 1425 a.C., l'impero egiziano si estendeva dalla Siria alla quarta cateratta del Nilo in Nubia (odierno Sudan) e non era stato mai così esteso, era inoltre attivo ad importazioni di ogni genere. I faraoni del Nuovo Regno avviarono ingenti campagne edilizie, soprattutto in onore del dio nazionale Amon, come il grande tempio di Amon, a Luxor (Figura 2.19) e, quello di Karnak (Figura 2.20), a Tebe, il più grande tempio egizio mai costruito.

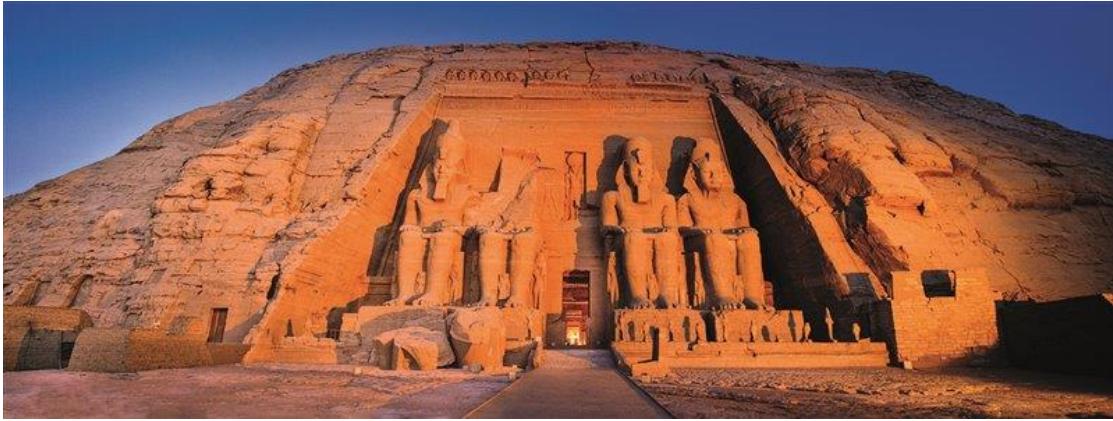


*Figura 2.19 tempio di Amon, Luxor*



*Figura 2.20 tempio di Karnak, Tebe*

Nel 1279 a.C. fu incoronato Ramesse II soprannominato "il Grande". A lui si deve la costruzione e l'ampliamento di gran parte dei monumenti di Luxor e di Karnak, dei templi di Abu Simbel (Figura 2.21) e dei santuari di Abido e di Menfi. Valente condottiero, Ramesse II guidò il proprio esercito contro gli Ittiti nella battaglia di Qadeš, per poi firmare il primo trattato di pace documentato della storia. Di fatto, le armate egizie ed ittite non furono mai in grado di prevalere una sull'altra ed entrambi gli eserciti temevano talmente tanto l'aggressività dell'impero assiro da riuscire ad instaurare una tregua che portasse vantaggio ad ambedue.



*Figura 2.21 Tempio di Abu Simbel, Egitto*

I faraoni che poi succedettero a Ramesse II dovettero affrontare le insurrezioni da parte degli ormai numerosi popoli assoggettati a quello che poteva ritenersi un vero e proprio impero. Per più di 300 anni dall'inizio del nuovo Regno alla fine del regno di Ramesse II (1570-1240 a.C.) le piene furono normali, sempre leggermente più alte di quelle attuali. Venne a presentarsi in seguito un periodo di 225 anni (XX-XXI dinastia) di piene scarse a partire dal 1200 a.C., che vide l'abbandono dell'agricoltura in Nubia, allora regione estremamente fertile e verdeggiante e l'insabbiamento del ramo Pelusiaco del Delta [23]. Le tensioni provocate da pressanti attacchi esteri mirati alla conquista delle ricchezze egizie, il sorgere di continui problemi interni come la corruzione, la razzia delle tombe, il malcontento popolare ed il sempre più accresciuto potere della casta clericale dei sacerdoti di Amon portò all'indebolimento e alla successiva divisione del regno, sfociata nell'inizio del Terzo ed ultimo Periodo Intermedio. Dopo un lungo periodo travagliato di conquiste e battaglie con l'impero persiano nel 332 a.C., il governatore persiano Mazace consegnò l'Egitto ad Alessandro Magno senza combattere.

#### **2.4.6** Periodo Tolemaico (332 - 30) a.C.

Alessandro Magno, nel 332 a.C. conquistò l'Egitto, senza di fatto alcuna resistenza da parte dei persiani, la provincia egiziana venne così annessa nel suo vasto impero. Salutato come un liberatore dalla popolazione che aveva mal sopportato la dominazione persiana, Alessandro assunse i titoli regali tradizionali e si recò poi al santuario del dio Amon, nel deserto, dove venne riconosciuto dai sacerdoti come figlio del dio. Alla foce del Nilo fondò una città che da lui prese il nome, Alessandria, che in pochi anni diventò il più importante centro culturale dell'età ellenistica. La suddivisione amministrativa stabilita dopo lunghe guerre dai successori di

Alessandro portò all'instaurazione del Regno tolemaico che perdurò sino all'istaurarsi dell'egemonia romana a fine del I secolo a.C. Degno di nota è il fatto che, durante la conquista romana, Giulio Cesare, giunto in Egitto, affidò il regno a Cleopatra che fu l'ultima grande sovrana della dinastia tolemaica, dinastia che terminò con la sua morte nel 30 a.C. Lo stato tolemaico fu una forza importante nell'era ellenistica, un periodo segnato da conflitti su larga scala ma anche da conquiste materiali e culturali. La capitale Alessandria venne arricchita di importanti costruzioni, tra cui la Grande Biblioteca ed il Faro. Fiorente centro di invenzioni, ospitò personalità dal calibro di Euclide e Archimede. Dipendente dall'imprevedibile ciclo nilotico, come ogni civiltà che si è susseguita in quella regione, quella tolemaica fece dei progressi tecnologici come il saqiya, una macchina per il sollevamento dell'acqua a ruota rotante documentata dalla metà del III secolo a.C., la coltivazione del maslin (misto di frumento-orzo) e lo stoccaggio del grano, importanti strumenti di risposta e mitigazione agli impatti dovuti alle mutevoli inondazioni del Nilo. Le famiglie di agricoltori, inoltre, per proteggersi dal rischio di cedimento del fiume, distribuirono la terra in quote individuali geograficamente disperse e, allo stesso modo, anche i territori esterni, capaci di un'agricoltura pluviale, aiutarono a proteggere lo stato dal fallimento del Nilo. Lo studio di Manning [59] individua nelle eruzioni vulcaniche una delle cause per un eventuale fallimento del Nilo. Le eruzioni esplosive possono perturbare il clima iniettando zolfo gas nella stratosfera; questi gas reagiscono per formare aerosol di solfato riflettente che rimangono in quota in concentrazioni decrescenti per circa uno o due anni. La diffusione dell'aerosol nell'atmosfera riduce le temperature troposferiche; se le umidità relative inferiori della zona troposferica rimangono invariate, la massa d'acqua convergente da una data distribuzione del vento diminuisce; quindi, si riducono le precipitazioni e diminuisce anche l'evaporazione superficiale. Inoltre, le eruzioni extratropicali aumentano gli aerosol di solfato su un lato dell'equatore, raffreddano quell'emisfero e ne alterano conseguentemente precipitazione ed evapotraspirazione tropicale principalmente cambiando i venti. In particolare, un pozzo di energia ad alta latitudine in un emisfero, forza una circolazione anomala di Hadley, spostando la zona di convergenza intertropicale (ITCZ) lontano da quel pozzo di energia. Manning conferma che la risposta del Nilo ad un'eruzione vulcanica si manifesta con inondazioni estive mediamente inferiori rispetto agli anni non eruttivi, di circa 22 cm [59]. Lo studio si concentra soprattutto sull'analisi del



periodo ellenistico, durante il quale rivolte di varia gravità ed entità sono segnalate su papiri e iscrizioni, come durante la grande rivolta tebana ventennale iniziata nel 207 a.C. Queste rivolte sono storicamente considerate "nazionaliste" per gli egiziani, risentiti del dominio, e/o tassazione statale onerosa. Raramente vengono correlate agli stress socioeconomici successivi al fallimento del Nilo. Confrontando però le date di insorgenza delle rivolte e gli anni dell'eruzione viene osservato un aumento della frequenza di insorgenza delle rivolte in questi anni, implicando il cedimento del Nilo indotto dai vulcani come ulteriore e finora poco riconosciuto potenziale catalizzatore per la rivolta contro il dominio tolemaico. Le fonti storiche vengono in aiuto a supportare tale tesi. Ad esempio, nel contesto delle principali eruzioni conosciute del 247 e del 244 a.C. gli scritti superstiti dello storico romano Giustino del 245 a.C., durante la terza guerra, riportano che se Tolomeo III "non fosse stato richiamato in Egitto da disordini interni, si sarebbe fatto padrone di tutti i domini di Seleuco". Un papiro del III secolo a.C. avvalorava di fatto il richiamo di Tolomeo ad affrontare la "rivolta egiziana", mentre il decreto sacerdotale Canopo del 238 a.C. si riferisce esplicitamente al fallimento del Nilo negli anni precedenti e continua lodando Tolomeo III per l'ampia importazione di grano dai territori esterni bagnati dalle piogge, un'impresa raggiunta solo "a grandi spese" avendo "sacrificato gran parte della rendita reale per la salvezza della popolazione". Ulteriore prova a sostegno di questa tesi è rappresentata dalla vendita di terreni extrafamiliari, ipotizzando che tale vendita avvenga in risposta a stress di tipo socioeconomico. Per verificare se le eruzioni avessero effettivamente indotto o no la vendita di terreni, sono state analizzate le registrazioni delle cessioni di quest'ultimi, trovando un aumento significativo della loro frequenza post-eruzione. Il tutto suggerisce una risposta pluriennale al fallimento del Nilo indotto dai vulcani da parte delle famiglie, potenzialmente costrette a vendere terreni dopo i bassi raccolti e le difficoltà associate a soddisfare le tasse statali e altri obblighi. Anche l'intervento statale attraverso la vendita di terreni all'asta è evidenziato per la prima volta alla fine del III secolo a.C., in particolare associato alla grande rivolta tebana, iniziata nel 207 a.C. che seguì l'eruzione tropicale del 209 a.C. Mentre la dinastia tolemaica terminò ufficialmente con il suicidio di Cleopatra (Figura 2.22) nel 30 a.C., dopo la sua sconfitta navale da parte di Roma ad Azio nel 31 a.C., lo stato venne fortemente colpito alla fine del decennio precedente da ripetuti insuccessi del Nilo, carestie e pestilenze, inflazione, corruzione amministrativa, spopolamento rurale, migrazione

e abbandono della terra. Quest'ultimo decennio ha inoltre vissuto la terza eruzione più grande degli ultimi 2500 anni nel 44 a.C., a seguito di un'eruzione extratropicale del 46 a.C. La storia tolemaica, quindi, evidenzia la necessità di considerare le future eruzioni nella valutazione e pianificazione del rischio per le regioni agricole dipendenti dai monsoni, le quali, allo stato attuale comprendono circa il 70% della popolazione mondiale.



*Figura 2.22 Regina Cleopatra*

### **2.4.7 Periodo romano (30 a.C. - IV secolo d.C.)**

Dal 30 a.C. dopo la morte della regina Cleopatra e la conquista da parte di Ottaviano Augusto, l'Egitto divenne una delle più importanti colonie dell'Impero Romano. Roma iniziò ad approvvigionarsi sfruttando al meglio la provincia acquisita e prelevando enormi risorse alimentari, come il grano, dalla fertile valle del Nilo. Allo stesso tempo l'esercito romano, con la supervisione di un prefetto incaricato dall'imperatore, si preoccupava di tenere sotto controllo le tensioni sociali, sedando rivolte interne e prevenendo attacchi da parte dei banditi esterni. Le grandi modifiche apportate dai romani crearono una ben distinta rottura con l'amministrazione precedente, tanto da fare distinguere nettamente agli storici la differenza fra Egitto romano ed Egitto tolemaico. I Romani, però, una volta assimilato il nuovo territorio, non lo snaturarono, molti greci continuarono il loro lavoro, come greca rimase la lingua in uso, tranne che in ambito militare, la stessa cultura ed educazione rimasero greche anche durante la presenza romana.

Vennero inoltre rispettate tutte le usanze e le credenze religiose allora praticate, introducendo il solo culto all'Imperatore [60]. Dal regno di Nerone e per circa un secolo, l'Egitto conobbe un lungo periodo di prosperità, divenendo una pedina fondamentale all'interno della scacchiera rappresentata dall'Impero. Lo stesso Vespasiano, una volta acclamato "Imperator" dalle proprie truppe, come prima cosa si preoccupò di avere l'appoggio dell'Egitto. I decenni successivi al I secolo d.C. si presentarono come i turbolenti figli della grande confusione e crisi nelle quali stava inevitabilmente scivolando l'Impero, culminando poi con l'evento determinante per le sorti della provincia egizia e per tutto l'Impero, l'avvento del cristianesimo. Inizialmente vi furono varie persecuzioni contro i cristiani: con l'editto del 303 d.C., Diocleziano operò l'ultimo serio tentativo romano di porre un freno al cristianesimo su tutto l'Egitto, tentativo che non andò di fatto a segno. Durante il 391 d.C. l'imperatore cristiano Teodosio I, emanò leggi che bandivano i riti pagani e disponevano la chiusura dei templi. Portando così al deciso declino della nativa cultura egizia. Mentre gli Egizi continuarono a parlare il proprio antico idioma, la capacità di scrivere i geroglifici scomparve insieme alla progressiva sparizione dei sacerdoti e delle sacerdotesse dei templi tradizionali. Gli antichi templi eretti per le divinità pagane egizie furono convertiti in chiese o abbandonati alle sabbie del deserto. Sotto il comando di Anastasio arrivò una vera e propria pace religiosa, sebbene la condizione economica dell'Egitto riversasse in una vera e propria crisi radicata. Lo spopolamento e la crescente miseria, dovuta in parte a un sistema fiscale arbitrario, accompagnate dalla diffusione dei grandi latifondi a scapito delle piccole proprietà terriere, erano alcuni dei mali persistenti nella grande vallata del Nilo. Alla morte di Teodosio I (395 d.C.) l'Egitto entrò definitivamente a far parte della Impero romano d'Oriente, sino al 616 d.C. anno in cui i Persiani conquistarono Alessandria e occuparono il territorio. Nel 640 d.C. il califfo Omar ibn al-Khattab, con un immenso esercito arabo, pose definitivamente fine al dominio persiano-romano sull'Egitto. Durante il periodo di conquista romana non sono disponibili dati o registrazioni che permettano di ricostruire con maggior accuratezza l'andamento del livello del fiume. Per tutto il periodo quindi, sino alla successiva conquista araba non si evidenziano particolari fenomeni rivoltosi della popolazione dovuti a piene scarse o particolari cambiamenti climatici, anzi, i pochi dati disponibili, riportati da Plinio il Vecchio, rivelano un Nilo alto e generoso, fatta eccezione degli anni tra il VI e VII secolo d.C. [23]. Un'eccezionale stabilità climatica caratterizza i secoli

dell'ascesa dell'Impero Romano; alcune regioni godevano di condizioni insolitamente favorevoli. I principali fattori di forzante climatica, durante il periodo di reggenza latina, mostrano un'insolita stabilità; caratterizzata da un'attività solare generalmente uniforme, un livello eccezionalmente basso di attività vulcanica e un clima con temperatura relativamente calda e precipitazioni stabili ed equilibrate. L'Egitto, il granaio dell'Impero Romano, sembra aver goduto di condizioni eccezionalmente favorevoli per la produzione di cereali. Studi riguardanti il periodo antecedente all'annessione dell'Egitto da parte di Roma, rivelano che i livelli del Nilo durante il I secolo a.C. erano ben al di sotto della media, mentre, per i successivi 330 anni, dall'inglobamento nel 30 a.C. al 299 d.C., documenti attendibili consentono una stima del patrimonio fluviale annuo, il quale risulta abbondante e soddisfacente; dopodiché i dati disponibili sulle piene risultano scarsi fino al 642 d.C. Viene così a confermarsi che gli eventi più favorevoli, sinonimo di una crescita prospera, si verificarono più frequentemente tra il 30 a.C. e il 155 d.C.. Seguirono poi gradualmente cambiamenti verso temperature più fredde, un'attività vulcanica più intensa e piogge più sporadiche e irregolari i quali iniziano a manifestarsi a partire dal 200 d.C. Dalle tre alle cinque grandi eruzioni vulcaniche che si sono concentrate a partire dal 235 al 285 d.C. hanno potenzialmente innescato episodi proporzionati di rapido cambiamento climatico, probabilmente rafforzandone la forzatura solare, in concomitanza ad una probabile migrazione di El Niño ed un aumento delle condizioni umide attorno al 300 d.C. [48]. Questi rapidi cambiamenti a breve termine hanno di fatto avuto una grande capacità di ridurre e influenzare la produzione alimentare nella fertile vallata del Nilo, durante i decenni più difficili che l'Impero Romano avesse mai affrontato sino a quel momento. Tre grandi catastrofi colpirono contemporaneamente l'Egitto tra VI e VII secolo d.C.: la peste tra 542 e 600 d.C., bassi livelli del Nilo e la sommersione della costa settentrionale del Delta. Analisi effettuate sui livelli del Mar Morto rivelano il presentarsi di un lungo e grave periodo di siccità che persistette dal VI all'VIII secolo d.C.

#### **2.4.8 Periodo Arabo-Islamico (640-1517) d.C.**

All'inizio della conquista islamica dell'Egitto, quest'ultimo faceva parte dell'Impero Romano d'Oriente (anche detto Impero Bizantino). Tuttavia, era stato invaso appena un decennio prima dalla Persia sasanide sotto Cosroe II (616-629). Nel 639 d.C. il califfo Omar ibn al-Khattab conquistò l'allora capitale d'Egitto, Alessandria,

con un ingente esercito di circa 4000 soldati ed iniziò ufficialmente così nel 640 d.C. la dominazione araba sull'intero territorio. Nel primo periodo della conquista araba, L'Egitto fu diretto da governatori che agivano per conto dei califfi Ommayadi di Damasco. In seguito, varie reggenze arabe si susseguirono nel controllo del territorio, evidenziando periodi ben precisi e definiti di comando. Nel 747 d.C. gli Ommayadi furono detronizzati e l'unità del mondo arabo si ruppe. L'Egitto rimase comunque sotto il dominio del Califfato abbaside, i cui sovrani riuscirono a stabilire dinastie semi-indipendenti, le quali vengono di seguito riportate:

- Periodo Tulunide (868 – 904) d.C.
- Periodo Ikhshidide (904 – 969) d.C.
- Periodo Fatimide (969 – 1171) d.C.
- Periodo Ayyubide (1171 – 1250) d.C.
- Periodo Mamelucco (1250 – 1517) d.C.

La dinastia dei Mamelucchi governò così sotto la sovranità dei califfi abbasidi, fino al 1517 d.C., quando l'Egitto divenne parte dell'Impero ottomano. Vari eventi di rilevanza storica e sociale accorsero durante tutto questo periodo, evidenziando ancora di più lo stretto intrecciarsi del mondo arabo con il mondo occidentale. Le campagne di invasione conosciute come Crociate promosse dalla Chiesa di Roma per rafforzare la propria posizione nel Levante, divamparono in tutto l'oriente e arrivarono persino in Egitto tra il 1154-1169 d.C., approfittando della debolezza dei sovrani Fatimidi, in quanto il califfato fatimide, scita, era dilaniato da lotte intestine per il potere. Questo lungo susseguirsi di battaglie con l'esercito ecclesiastico e di conseguenti disordini interni ebbe fine nel 1174 d.C., quando Saladino, grande stratega della dinastia degli Ayyubidi, poté realizzare l'unione tra la Siria e l'Egitto e quindi circondare gli stati crociati. Seguì un periodo di relativo sviluppo economico, sebbene i continui disordini interni per la presa del potere non mostrassero segni di spegnimento. Nel 1347 d.C., tuttavia, l'incredibile sviluppo economico e politico venne bruscamente arrestato dal diffondersi in Egitto, come in tutta Europa, della peste o Morte Nera. Le continue epidemie di peste bubbonica continuarono a piagare a ondate l'Egitto sino agli inizi del Cinquecento, minandone le capacità produttive. Lo stato venne colpito ulteriormente sul finire del Quattrocento dalla crisi dei commerci provocata dalla scoperta delle nuove rotte circumafricane aperte dai portoghesi, i quali spostarono definitivamente il centro del commercio dal Mar

Mediterraneo, intercettando direttamente in India e Arabia le preziose spezie e sete orientali. Nel gennaio 1517 gli ottomani di Selim I sconfissero i Mamelucchi, conquistando e sottomettendo Il Cairo e l'Egitto ed assumendo il califfato.

Le registrazioni a livello del Nilo delle variazioni delle inondazioni dal IX secolo al XV secolo d.C. rivelano episodi pronunciati di piene basse e alte. I dati storici rivelano inoltre che questo periodo fu caratterizzato dalle peggiori carestie mai registrate. Lo studio di Hassan [61], riporta che l'intervallo temporale che va dal 930 al 1500 d.C. è dominato da piene basse. Nello specifico dal 930 al 1070 d.C., le inondazioni del Nilo furono dominate da piene basse. Dal 1070 al 1180 d.C. permanevano le stesse condizioni di alluvioni di bassa intensità, intervallate da due occasioni di alluvioni estremamente elevate. Successivamente, dal 1180 al 1350 d.C., il numero di inondazioni elevate aumentò a spese però, di inondazioni estremamente basse. Gli eventi di carestia del 1200–1202 d.C. sono registrati in modo dettagliato da Abdel-Latif Al-Baghdadi, uno studioso iracheno che a quel tempo era in visita al Cairo [62]. Al-Baghdadi riferì che per considerare un raccolto abbondante fossero necessari 18 cubiti. Una bassa inondazione, considerata sotto i 16 cubiti, causa nella vallata gravi disagi e mancanza di raccolti proficui e quindi di cibo. Al-Baghdadi ha inoltre notato una correlazione tra le basse alluvioni e lo spirare dei venti orientali e meridionali, mentre un vento da nord-ovest è in realtà portatore di una buona piena. L'anno 1200 d.C. si presentava come un mostro la cui furia causò la distruzione di tutte le risorse ed i mezzi di sussistenza dell'Egitto. L'acqua del Nilo durante i periodi di bassa alluvione venne analizzata da Al-Baghdadi, poiché presentava un aspetto verdastro, puzzolente e con presenza di alghe e detriti vegetali che pullulavano la superficie [62]. L'aspetto stagnante dell'acqua era dovuto alla terribile siccità che dilaniò dalla fascia equatoriale dell'Etiopia sino allo sbocco del Nilo nel Mediterraneo. Nello stesso periodo una devastante carestia divampò per tutto il paese, i prezzi aumentarono e il cibo divenne così scarso che molte persone morirono di fame finché le strade non furono piene di cadaveri. Il tutto sfociò in una pestilenza che causò ancora più morti tra la popolazione. Il periodo che va dal 930 al 1500 d.C. fu anche un periodo di drammatico cambiamento climatico globale, incluso il cosiddetto "periodo caldo medievale" (MWP; Medieval Warm Period) in Europa. Un'altra probabile influenza a livello climatico nel regime del Nilo è rappresentata dagli Alisei. Questi venti soffiano da nord-est nell'emisfero settentrionale e da sud-est nell'emisfero australe.

La convergenza degli alisei definisce la Zona di Convergenza Intertropicale (ITCZ). La principale stagione delle piogge nell'Africa subtropicale, nel subcontinente indiano e in Indonesia è legata al movimento dell'ITCZ verso nord in estate, poiché i venti migrano in quella direzione seguendo il movimento stagionale del Sole. Questi venti assorbono umidità e calore sull'Oceano Atlantico e sull'Oceano Indiano, garantendo così un'elevata pioggia stagionale [63]; [64]. Una riduzione della variazione di temperatura tra gli emisferi sopprime le fluttuazioni annuali dell'ITCZ. Come risultato di questi cambiamenti, l'Africa tropicale diventa più fresca e molto più secca, riducendo così la quantità di portata delle inondazioni del Nilo. È possibile quindi concordare sul fatto che la stagionalità delle precipitazioni monsoniche africane, che controlla principalmente la portata alluvionale del Nilo Principale, è governata dalla posizione del massimo riscaldamento solare, dalla migrazione dell'ITCZ e dal comportamento del dipolo tra l'Atlantico settentrionale e meridionale [62], le gravi siccità nel Sahel africano durante gli ultimi 14'000 anni sono state coincidenti con grandi iniezioni di acqua dolce nell'Oceano Atlantico settentrionale. Questo afflusso di acqua dolce riduce la formazione di acque profonde del Nord Atlantico e anomalie della temperatura superficiale del tipo associato alla diminuzione delle precipitazioni nei tropici. Kondrashov [65] ha anche concluso che la periodicità di questi eventi è di 7 anni e sembra dovuta alle influenze del Nord Atlantico. Il legame tra la portata massima del Nilo e la temperatura dell'Atlantico nordorientale riflette la relazione tra la NAO e le precipitazioni in Etiopia, che sono la principale fonte d'acqua quando si misurano i massimi di piena del Nilo in estate. Il record in quegli anni di frequenti inondazioni estreme nel Nilo principale di fatto è strettamente legato alle brusche transizioni climatiche le quali avrebbero comportato, oltre ad un cambiamento nell'entità della portata alluvionale, un cambiamento nella stagionalità, nei tempi, nel numero di alluvioni, nella durata delle condizioni di massima alluvione e probabilmente anche un cambiamento nel carico sedimentario, il quale potrebbe alterare i processi fluviali e la geomorfologia del fiume.

#### **2.4.9** Periodo Ottomano (1517-1914) d.C.

L'Egitto venne conquistato dall'Impero ottomano nel 1517 d.C., approfittando di un momento di debolezza della reggenza Mamelucca. La conquista fu guidata dal sultano ottomano Selim I, il quale conquistò prima la Siria e poi deposto l'ultimo

esponente della dinastia mamelucca, diventò governatore dell'Egitto e delle città di Medina e Mecca. Il sultano riuscì nell'intento di annettere la Persia al suo regno e a stringere alleanze con Venezia e il Regno d'Ungheria per non avere nemici nel mondo europeo durante le sue campagne. Sotto l'impero ottomano i Mamelucchi continuarono ad amministrare l'Egitto. I mamelucchi mantennero di fatto il controllo e l'amministrazione diretta delle diverse provincie in cui era diviso il territorio egiziano, che si presentava quindi, più come uno "stato vassallo" che non una semplice provincia dell'Impero. Il periodo della dominazione ottomana in Egitto durò dal 1517 d.C. al 1798 d.C. e può essere divisa in tre grandi periodi. (Figura 2.23)



*Figura 2.23 Estensione impero Ottomano*

Dal 1517 al 1620 d.C. periodo della conquista: gli ottomani sconfissero i Mamelucchi e li costrinsero alla totale subordinazione e a rispettare le decisioni del governo centrale.

Dal 1620 al 1671 d.C. l'impero ottomano si indebolì inesorabilmente a causa delle innumerevoli battaglie combattute in zona balcanica e contro il potentissimo impero asburgico. Approfittando perciò di un periodo di debolezza dell'impero ottomano, i Mamelucchi riuscirono a conquistare sempre più potere e a governare i territori in base alle loro decisioni e principi.

Dal 1671 al 1798 d.C. si riaffacciano concrete speranze per la classe mamelucca. Durante questi anni i Mamelucchi riuscirono a riunire le proprie forze, tentando in tutti i modi di deporre il pascià ottomano. La situazione già da tempo instabile, fu poi resa ancora più difficile per gli Ottomani dall'arrivo dei francesi di Napoleone che, nel 1798 d.C., entrarono ad Alessandria per diminuire il potere dell'esercito britannico sulle colonie del mediterraneo. A questo punto, gli ottomani, stremati dalle



pesanti sconfitte subite in Europa, e schiacciati dalla potenza napoleonica a Nord, dovettero desistere nel loro controllo a favore del popolo arabo dei Mamelucchi. Una volta che i Francesi abbandonarono il controllo del Paese, il potere fu assunto nel 1805 d.C. da Muhammad 'Ali Pascià, un comandante militare albanese al servizio delle forze militari ottomane in Egitto, che detronizzò efficacemente e velocemente la presenza neo-mamelucca al comando. Muhammad 'Ali Pascià, dopo aver preso il controllo dell'intero paese, richiese per sé stesso il titolo superiore di Chedivè (Viceré), assumendo di fatto il controllo sull'autoproclamato, sebbene non ufficialmente riconosciuto, Chedivato di Egitto.

Eliminò fisicamente i bey mamelucchi sopravvissuti nel 1811 d.C., consolidando in tal modo il pieno controllo del Paese. Per tale motivazione viene considerato dagli storici il vero fondatore del moderno Egitto, grazie inoltre alle incisive riforme militari che portò a compimento, oltre a quelle agrarie, economiche e culturali. Nel 1867 d.C., il sultano ottomano concesse a Ismā'īl il titolo di Chedivè, il quale tentò di porre fine alla predominanza europea, soprattutto inglese e francese che si stava in quel momento spartendo le risorse dell'Egitto.

Nel 1869 d.C. la fine della costruzione del Canale di Suez (Figura 2.24) dette al Regno Unito una via più veloce per raggiungere l'India. D'altro canto, lo stesso evento conferì all'Egitto un ruolo chiave nel controllo delle rotte dei traffici commerciali, soprattutto quelle relative al regno britannico e allo stato francese.



*Figura 2.24 Canale di Suez*

Per ristabilire un certo regime di controllo sul territorio bagnato dal Nilo, nell'aprile del 1882 d.C. Francia e Regno Unito inviarono delle navi da guerra ad Alessandria d'Egitto, con la scusante di dover calmare il clima turbolento del chedivato, alimentando però di fatto la paura nella popolazione di una possibile invasione da

parte di potenze straniere, invasione che alla fine si concretizzò. I britannici riuscirono a sconfiggere l'esercito egiziano a Tell el-Kabīr nel settembre del 1882 d.C. e presero il controllo del paese, l'Egitto divenne così un protettorato britannico e il comandante in capo britannico dell'esercito egiziano aveva il grado di *Sirdar*, ruolo che venne attribuito al futuro chedivè Tawfīq Pascià. L'occupazione britannica terminò di fatto con la deposizione dell'ultimo chedivè Abbās Ḥilmī II il 5 novembre 1914 e la fondazione del protettorato britannico in Egitto con l'insediamento del sultano Ḥusayn Kāmīl il 19 dicembre 1914.

Durante la dominazione ottomana, i dati di registrazione delle piene del Nilo vengono riportati e catalogati dal principe Omar Toussoun, il quale, con la massima accuratezza consentita dalle registrazioni disponibili trascrive nel volume (Memoir X) per ogni anno dal 652 d.C. sino al 1921 d.C. i dati dei livelli del fiume nel caso di massima e minima piena, basandosi sul Nilometro di Rhoda. Confrontando i livelli delle piene con alcuni studi effettuati sulla condizione climatica del periodo denominato "piccola era glaciale" o LIA (Little Ice Age) [66] è possibile stabilire un'ulteriore correlazione tra gli eventi accorsi in ambito sociopolitico e le transizioni climatiche. La LIA rappresenta un periodo della storia della Terra che va dal 1350 o 1450 d.C. circa al 1850 d.C. in cui si verificò un brusco abbassamento della temperatura media terrestre. La piccola era glaciale arrivò in coda ad un lungo periodo di temperature relativamente elevate, il periodo caldo medievale (900–1300 circa d.C.). Dalla fine dell'anomalia climatica medievale, infatti, a livello globale si assistette ad un graduale avanzamento dei ghiacciai ed ulteriore formazione di nuovi. Tali ghiacciai raggiunsero il loro picco di volume verso la metà dell'Ottocento, quando le temperature ripresero ad aumentare causando una nuova riduzione della massa. Per individuare un'ulteriore causa dell'avvento della LIA e spiegare l'eventuale risposta del Nilo a tale cambiamento sono stati studiati gli effetti climatico-globali della sequenza di eruzioni avvenute in quell'intervallo temporale [66]. Nel lavoro di Brönnimann viene riportato che tutte le eruzioni portano a sostanziali cali della temperatura estiva sulle aree terrestri dell'emisfero settentrionale. Oltre all'effetto radiativo diretto, che dura circa 2-3 anni, lo scambio termico oceano-atmosfera ha rinforzato il raffreddamento climatico per diversi anni dopo queste eruzioni. Il continente africano è stato colpito da due decenni di siccità, i monsoni globali si sono indeboliti e le tracce dei sistemi di bassa pressione sul Nord Atlantico si sono spostate a sud [67].

Il periodo di transizione che viene a presentarsi intorno al 1300 d.C. potrebbe quindi essere stato avviato da eruzioni vulcaniche, sebbene i contributi relativi della forzatura solare e vulcanica rimangano tutt'ora poco chiari. Degno di nota è il fatto che tutte le transizioni, compresa la transizione dalla LIA al periodo del riscaldamento antropogenico, non sono di fatto ben comprese nel breve termine. In quanto, dopo una fase piuttosto calda intorno al 1800, il clima globale si è nuovamente raffreddato all'inizio del XIX secolo e per diversi decenni, accompagnato da un pronunciato avanzamento dei ghiacciai nelle Alpi.

Le dieci stagioni calde più fredde (aprile-settembre) sulle aree extratropicali settentrionali nel periodo che va dal 1750 al 1900, nella media dell'insieme della paleo-analisi, erano esclusivamente stagioni post-eruttive seguite da eruzioni di diversi grandi vulcani tropicali. Le estati che seguirono le eruzioni dell'inizio del diciannovesimo secolo furono in media di 0.5 °C più fresche del periodo di 30 anni che precedette la sequenza delle eruzioni (1779–1808). Analizzando invece l'andamento delle precipitazioni dopo le eruzioni, le paleo-analisi nello studio di [68] mostrano una diminuzione delle precipitazioni nella regione dei monsoni africani immediatamente dopo ogni eruzione, sostenendo di fatto che attraverso le ricostruzioni effettuate, la regione africana della vallata del Nilo sia rimasta arida per gran parte della prima metà del diciannovesimo secolo. Nelle registrazioni effettuate da Toussoun [43] viene a riscontrarsi una conferma di questo andamento, sebbene le annotazioni del livello di piena presentino mancanze di registrazioni per alcuni anni. Considerato che le eruzioni vennero a manifestarsi negli anni tra il 1780 ed il 1808 d.C., da un confronto con le annotazioni risulta che i livelli di piena compresi in quegli anni presentano un minimo rispetto agli anni precedenti. Il livello massimo di piena nel periodo che intercorre tra il XVII e XVIII secolo si presenta nel 1739 d.C. con un valore pari a 20.32 metri riportato sul Nilometro di Roda, mentre il minimo per quell'intervallo temporale corrisponde al livello del 1804 d.C. nella quale le acque del Nilo raggiunsero il minimo di 17.89 metri. Con la fine della piccola era glaciale nel 1850 d.C. e l'inizio del periodo di riscaldamento globale si assistette ad un nuovo aumento della portata delle acque del Nilo, con la registrazione di un livello di inondazione massimo nel 1874 d.C. di ben 21.40 metri.

#### 2.4.10 Periodo Moderno (1914-presente) d.C.

Gli inglesi mantennero la piena posizione in Egitto fino al 1922, senza però definirne un preciso status politico. Questa pesante condizione di sottomissione ad uno stato straniero stava stretta alla popolazione egiziana già agli inizi del 1900, così, il 28 febbraio 1922 venne riconosciuto dalla Gran Bretagna che il protettorato inglese era terminato e l'Egitto divenne un vero e proprio stato sovrano chiamato sultanato. Il Regno d'Egitto fu il primo vero Stato moderno egiziano come nazione indipendente, iniziato nel 1922 e durato sino al 1953, anno in cui, a seguito della Rivoluzione Egiziana del 1952 venne abolita la monarchia.

Durante il periodo del Sultanato d'Egitto nello stato dilaniava la corruzione all'interno, e gli stessi sudditi vedevano il paese come una marionetta nelle mani della Gran Bretagna. La corruzione, il crescente malcontento scaturito dalla manipolazione britannica e la sconfitta nella guerra arabo-israeliana del 1948, portò ad un colpo di stato nel 1952 da parte di un gruppo di ufficiali dell'Esercito chiamato Movimento dei Liberi Ufficiali. Nel 1953 la Monarchia egiziana venne formalmente abolita, il Re e la sua famiglia mandati in esilio e venne proclamata la Repubblica Araba d'Egitto.

### 2.5 Contesto politico

A partire dalla metà del XX secolo il fiume Nilo è divenuto simbolo di un'accesa disputa fra tre dei maggiori paesi bagnati dal suo passaggio: Etiopia, Sudan ed Egitto. L'Egitto, con la sua antichissima storia di sfruttamento delle piene nilotiche, nell'immaginario collettivo viene da sempre ritenuto l'erede legittimo del controllo sul grande fiume e anche se la storia avvalora tale ipotesi, la geopolitica non è assolutamente della stessa opinione. La caratteristica portata relativamente bassa del Nilo rende le sue acque molto preziose, addirittura fondamentali per rispondere alle necessità degli agglomerati urbani, dell'industria e dell'agricoltura, ma anche per la produzione di energia elettrica, grazie ai numerosi sbarramenti costruiti nel corso dei decenni. Tuttavia, i vari territori che si susseguono lungo il suo letto sono interessati alla "risorsa blu" in modo diverso. Nella situazione attuale circa 100 milioni di persone a valle delle sue acque ne risultano totalmente dipendenti, in quanto l'apporto necessario per soddisfare la richiesta idrica in tali zone non può essere minimamente soddisfatto dall'afflusso meteorico presente. Il Sudan e

l'Egitto, di fatto non hanno alternative ai flussi del Nilo, senza contare che la costante crescita della popolazione aumenta sempre più la richiesta idrica, mettendo così maggiore pressione sulle risorse fluviali [37].

Questa dipendenza quasi esclusiva dell'Egitto e del Sudan dal Nilo e la conseguente vulnerabilità, è una caratteristica determinante del contesto idro-politico del bacino. La situazione è ben diversa nei paesi a monte che ricevono precipitazioni significative ma altamente variabili. Gli stati a monte delle acque, come l'Etiopia, hanno invece grandi popolazioni rurali che dipendono e continueranno a dipendere principalmente dall'agricoltura per il loro sostentamento. Nonostante le precipitazioni siano abbondanti sono tuttavia anche estremamente variabili, quindi per poter ottenere una buona resa dalle produzioni agricole risulta necessario l'impiego di un'ulteriore fonte di irrigazione e quale miglior fonte se non quella del Nilo.

La pressione sulle risorse idriche è in crescita in Egitto e in Sudan a causa del rapido aumento demografico e del clima arido. Ad aggravare la situazione, inoltre, si aggiungono le politiche di sviluppo agricolo mirate a estendere i terreni coltivabili intorno alle oasi principali del deserto occidentale egiziano, attraverso condotte che prelevano l'acqua del Nilo dal lago Nasser, creato dalla diga di Assuan, come nel caso del Toshka Project. Tra i contendenti in questa disputa però si aggiunge anche l'Etiopia, che nell'arco di 30 anni è passato da 48 a quasi 120 milioni di abitanti. Pur restando tra gli Stati più poveri del pianeta per PIL pro capite, la sua economia registra tassi di crescita fra i più alti al mondo, e domanda quantità sempre maggiori di energia. La scelta di Addis Abeba è stata quindi quella di volgere lo sguardo sempre più alla risorsa idrica sia come bene di consumo sia come fonte di energia [69].

Il primo accordo per disciplinare l'utilizzo delle acque del fiume risale al 1891. In quell'anno, l'Italia e la Gran Bretagna firmarono un protocollo con il quale Roma si impegnava a non costruire impianti idroelettrici nella sua colonia eritrea, capaci di alterare la portata degli affluenti dell'Atbara, il più settentrionale dei tributari principali del Nilo. Nel 1959, l'Egitto e il Sudan, da poco indipendente, rinegoziarono un trattato per la gestione dell'acqua del Nilo. L'accordo tra la Repubblica del Sudan e l'allora Repubblica Araba Unita (Egitto) per il pieno utilizzo delle acque del Nilo, venne firmato al Cairo l'8 novembre del 1959 e lo stesso anno venne stipulato l'ulteriore accordo per il progetto di costruzione della diga di Asswan [70].

Nel trattato si afferma il diritto storico e naturale dei due Paesi allo sfruttamento delle acque del Nilo, secondo una quota rispettiva del 75 e del 25%. I contraenti riservano per loro stessi il diritto di veto sulla realizzazione di progetti, capaci di limitare l'apporto idrico, anche se realizzati da Stati terzi. L'Etiopia non ha però mai riconosciuto la validità di questa clausola. In seguito, ulteriori tentativi di riformulazione del trattato, sono stati effettuati. Dopo anni di trattative, nel 2010 è stato redatto il Cooperative Framework Agreement; sebbene nessuno dei due stati abbia ratificato il documento il 13 giugno il parlamento etiope ha ratificato l'intesa.

## 3 Dati utilizzati

Per studiare e simulare l'idrologia del bacino del fiume Nilo viene utilizzato il modello idrologico Poli-Hydro, inizialmente calibrato sul periodo presente e in seguito utilizzato per le proiezioni di scenario. Affinché il modello possa essere calibrato e validato è necessario, in primo luogo, effettuare un'attenta ricerca dei dati meteorologici e idrologici presenti nella regione di studio, in questo caso il bacino del Nilo.

Essendo l'area di studio estesa a più stati del continente Africano è risultato doveroso fare una selezione dei dati a disposizione cercando di ottenere una serie di stazioni meteorologiche che si distribuisca il più omogeneamente possibile rispetto al bacino in esame, considerando che il modello ha bisogno di dati in input a scala giornaliera. Sono stati raccolti i dati su un arco temporale di 11 anni, nello specifico dal 1973 al 1984. Questo periodo corrisponde agli anni in cui sono disponibili i dati di portata da utilizzare per la calibrazione del modello: costituiscono infatti un periodo abbastanza lungo e continuo adatto alla calibrazione.

### 3.1 Precipitazioni e Temperatura

La ricerca di informazioni riguardanti dati di precipitazione e temperatura è risultata abbastanza complessa, considerato che gli enti coinvolti per la richiesta dati si trovano su suolo extra-Europeo, nel continente Africano, soggetti quindi ad un diverso metodo di catalogazione e registrazione. Nello specifico, per il seguente lavoro sono state ricercate stazioni di misura che potessero essere facilmente accessibili per un eventuale futuro confronto. Tali caratteristiche sono state individuate nel sito del NOAA, ovvero Nation Oceanic Atmospheric Administration, il quale fornisce dati di precipitazione e temperatura a scala giornaliera in varie parti del mondo, compresi gli 11 stati bagnati dalle acque del Nilo. Le stazioni in seguito selezionate sono dislocate su tutta l'area considerata, cercando di ricreare una distribuzione quanto più omogenea. Risulta necessario sottolineare che, nonostante l'abbondanza di stazioni presenti sull'area geografica, è stato riscontrato un problema di mancanza dati; infatti, si presentano periodi privi di misura, sia a livello di temperatura che di precipitazione giornaliera. Dopo una prima analisi dei "no

## | DATI UTILIZZATI

data” relativi ad ogni singola stazione per il periodo temporale considerato, è stato deciso di escludere alcune stazioni dal set di misura, nello specifico le stazioni che, sull’arco temporale di 11 anni, dal 1973 al 1984, presentavano un numero di “no data” superiori a 1500, che rappresenta il 37% sul totale della serie. Per ovviare alla carenza di dati inoltre è stato deciso di correggere i dati mancanti per la temperatura, attraverso la relazione di media, infatti, essendo disponibili dati per quanto riguarda la temperatura massima la minima o la media, nel caso di presenza di due informazioni su tre è possibile, attraverso la relazione prima citata ricostruirne la terza. Tale passaggio, sebbene approssimato, e a rigore non corretto risulta necessario per la mancanza di informazioni necessarie per la calibrazione del modello. Viene quindi ipotizzato che la media giornaliera delle temperature corrisponda alla media tra la massima e la minima. Una nota ulteriore da riportare riguarda il fatto che non tutte le stazioni presentano entrambe le informazioni di precipitazione e temperatura. Nello specifico, le stazioni considerate per la temperatura (Tabella 3.1) sono 13 e vanno a coprire gli stati dell’Egitto, del Sudan, dell’Etiopia e del Sud Sudan.

*Tabella 3.1 Coordinate e quote altimetriche delle stazioni di misura di temperatura utilizzate nel modello*

<b>Stazione</b>	<b>Latitudine [°]</b>	<b>Longitudine [°]</b>	<b>Quota [mslm]</b>	<b>Nazione</b>
Alexandria International	31.18	29.95	-1.8	Egitto
Asswan	23.97	32.78	200	Egitto
Mersa Matruh	31.33	27.22	25	Egitto
Abu Hamed	19.53	33.32	312	Sudan
Sennar	13.55	33.62	418	Sudan
Debremarcos	10.33	37.67	2515	Etiopia
Bahar Dar	11.6	37.42	1770	Etiopia
Gondar	12.55	37.42	1967	Etiopia
Harar Meda	8.73	38.95	1900	Etiopia
Addis Ababa Bole	9.03	38.75	2354	Etiopia
Wau	7.7	28.02	438	Sud Sudan
Juba	4.87	31.6	457	Sud Sudan
Malkal	9.55	31.65	388	Sud Sudan



## | DATI UTILIZZATI

Per quanto riguarda la precipitazione le stazioni (Tabella 3.2) validate sono invece 20 e sottendono gli stati dell'Egitto, del Sudan, dell'Etiopia, del Sud Sudan e dell'Uganda. Le stazioni forniteci dal NOAA, forniscono rapporti sulle due variabili a livello giornaliero, come precedentemente accennato, presentando però numerose mancanze lungo alcuni archi temporali necessari alla compilazione del modello; il caso della variabile temperatura è stato risolto con il metodo sopra riportato, mentre nel caso della variabile precipitazione e nello specifico delle stazioni riguardanti l'area egiziana, dopo averne riscontrato l'attendibilità, è stato aggiornato il dataset con i dati registrati dal sito meteorologico *it.tutiempo.net*.

*Tabella 3.2 Coordinate e quote altimetriche delle stazioni di misura di precipitazione utilizzate nel modello*

<b>Stazione</b>	<b>Latitudine [°]</b>	<b>Longitudine [°]</b>	<b>Quota [mslm]</b>	<b>Nazione</b>
Alexandria International	31.184	29.949	-1.8	Egitto
Asswan	23.9667	32.7831	200	Egitto
Il Cairo Airport	30.13	31.4	64	Egitto
Luxor	25.66	32.7	93	Egitto
Abu Hamed	19.533	33.317	312	Sudan
Sennar	13.55	33.617	418	Sudan
El Obeid	13.167	30.233	574	Sudan
Khartoum	15.6	32.549	380	Sudan
Debremarcos	10.333	37.667	2515	Etiopia
Bahar Dar	11.6	37.417	1770	Etiopia
Gondar	12.55	37.417	1967	Etiopia
Addis Ababa Bole	9.033	38.75	2354	Etiopia
Wau	7.7	28.017	438	Sud Sudan
Juba	4.867	31.6	457	Sud Sudan
Malkal	9.55	31.65	388	Sud Sudan
Gulu	2.75	32.333	1105	Uganda
Kasese	0.183	30.1	961	Uganda
Masindi	1.683	31.717	1147	Uganda
Kabale	-1.25	29.983	1869	Uganda
Jinja	0.45	33.183	1173	Uganda

## | DATI UTILIZZATI

Di seguito (Figura 3.1) vengono riportate le posizioni delle stazioni di misura rispetto al bacino del Nilo.

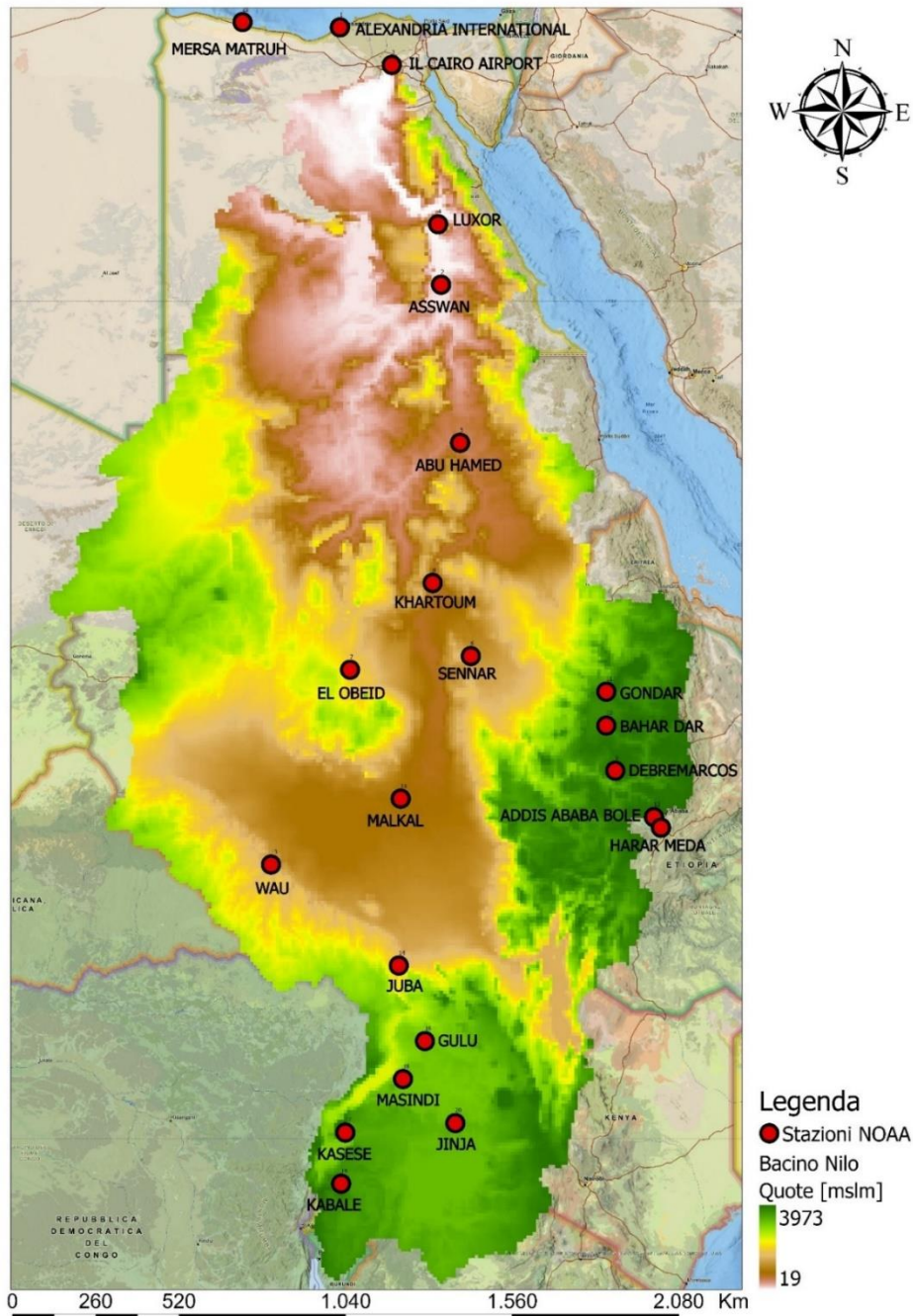


Figura 3.1 Stazioni meteorologiche NOAA situate nell'area di interesse.

## 3.2 Portate

Ai fini di eseguire una corretta calibrazione del modello sono necessarie, oltre alle informazioni su precipitazione e temperatura anche quelle relative alle portate del fiume.

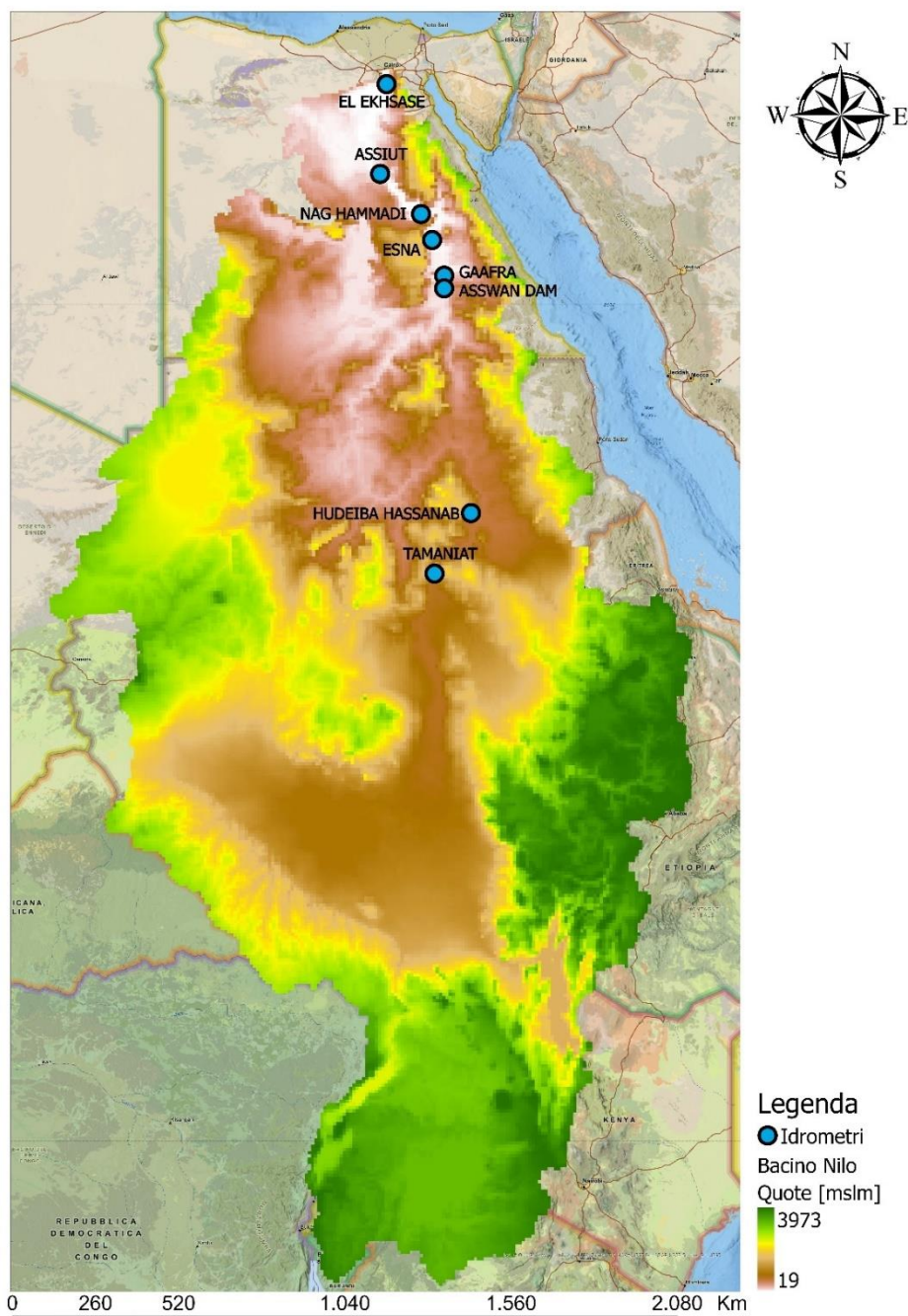


Figura 3.2 Stazioni di misura della portata GRDC nell'area del bacino del fiume Nilo.

Tali risorse sono state riscontrate in rete, dove è disponibile un database mondiale relativo alle misure di portata dei principali corsi d'acqua "The Global Runoff Data Centre, 56068 Koblenz, Germany". Essendo il percorso del Nilo, come specificato nel paragrafo 2.1, costituito da due grandi rami confluenti che si incontrano nei pressi della città sudanese di Khartum è stato scelto di considerare per la calibrazione solo le stazioni idrometriche posizionate a valle della confluenza, per un numero totale di 8 idrometri (Figura 3.2). I parametri di portata forniti dal "The

*Global Runoff Data Centre*” per il bacino del Nilo si concentrano per lo più negli anni che vanno dal 1970 al 1985. Nonostante la domanda per un’ulteriore fornitura di dati che comprendesse un arco temporale più recente non è stato possibile ottenere ulteriori informazioni, su base gratuita, sebbene il GRDC solleciti gli istituti idrologici competenti per una richiesta di serie temporali aggiornate.

Di seguito vengono riportati gli 8 idrometri utilizzati, i quali si collocano presso le 8 sezioni di chiusura dei sottobacini utilizzati per la calibrazione e validazione del modello (Tabella 3.3).

*Tabella 3.3 Coordinate e quota altimetrica delle stazioni di misura degli idrometri utilizzati nel modello.*

<b>Stazione</b>	<b>Latitudine [°]</b>	<b>Longitudine [°]</b>	<b>Quota [mslm]</b>	<b>Portata</b>
El Ekhsase	29.70	31.28	20	Mensile
Assiut	27.18	31.10	51	Mensile
Nag Hammadi	26.05	32.25	69	Mensile
Esna	25.32	32.56	80	Mensile
Gaafra	24.32	32.90	85	Mensile
Aswan Dam	23.96	32.90		Mensile
Hudeiba Hassanab	17.65	33.65		Mensile
Tamariat	15.95	32.63		Mensile

I dati di portata come evidenziato da Tabella 3.3 hanno risoluzione mensile. Mostrando di fatto una conferma di quanto affermato nel paragrafo 2.2, nella quale si osserva una massima intensità di portata tra luglio e agosto, ed una netta stagione di magra tra ottobre e marzo.

### **3.3 Modello digitale del terreno**

Un modello digitale di elevazione (DEM, Digital Elevation Model) è necessario per la costruzione del modello idrologico. Il DEM di fatto rappresenta la distribuzione delle quote di un territorio in formato digitale; tale modello viene prodotto in file raster il quale associa, a ciascuna cella, il valore relativo alla quota altimetrica assoluta in quell’area.

## | DATI UTILIZZATI

In questo studio è stato utilizzato un DEM di partenza a 90m x 90m, a partire dal quale mediante successive aggregazioni è stato ottenuto un raster con lato delle celle di 10000 m. Il DEM di partenza (Figura 3.3) è stato fornito dall'USGS Earth Resources Observation, scaricabile dal sito <https://www.sciencebase.gov> al database Hydrologic Derivatives for Modeling and Analysis (HDMA). La copertura dei dati forniti è globale (-180°, 180°, -90°, 90°) con il DEM che è un ibrido di tre set di dati: HydroSHEDS (dati idrologici e mappe basate su Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales), Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) e Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

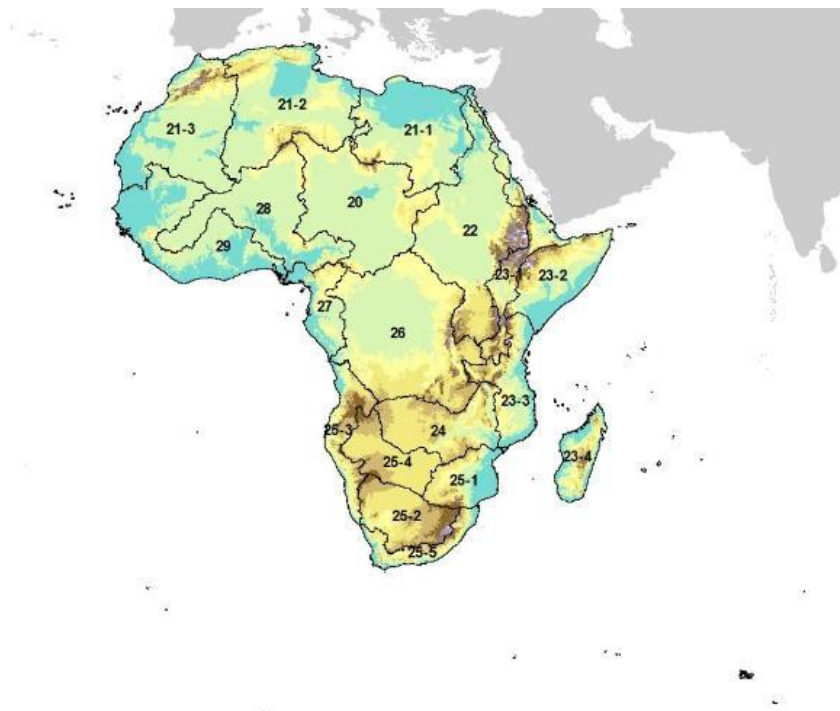


Figura 3.3 DEM fornito dall'USGS Earth Resources Observation

Il DEM così adattato mediante l'impiego del software ArcGispro, è necessario per poter ricavare le mappe di caratteristiche del terreno e per la costruzione dei bacini idrografici, quindi l'area di drenaggio, attraverso l'elaborazione della *flow direction* e della *flow accumulation*. Nello specifico, essendo l'area di lavoro relativamente estesa, per ottenere un maggior grado di precisione nella lavorazione del modello digitale è risultato necessario eseguire i processi di costruzione della *flow direction* e della *flow accumulation* su un DEM con lato celle di 180 m x 180 m e, solo

successivamente alla costruzione dei relativi bacini e sottobacini si è proceduti all'aggregazione finale con lato cella di 10000 m.

Per lo studio sono stati costruiti undici bacini idrografici, la cui sezione di chiusura corrisponde alla posizione dell'idrometro utilizzato, e di cui è stato parlato nel paragrafo precedente, per la misurazione delle portate. Per ogni bacino è stato esportato il relativo valore dell'area di drenaggio, necessario per una corretta calibrazione del modello. Nella seguente Tabella 3.4 vengono riportati gli spartiacque dei bacini in esame.

*Tabella 3.4 Sottobacini considerati per il modello e relativa area di influenza*

<b>Bacino</b>	<b>Area [Km<sup>2</sup>]</b>	<b>Fiume</b>
Nilo	3·930·510	Nilo
El Ekhsase	3·928·941	Nilo
Assiut	3·819·101	Nilo
Nag Hammadi	3·787·993	Nilo
Esna	3·753·568	Nilo
Gaafra	3·714·644	Nilo
Aswan Dam	3·708·353	Nilo
Hudeiba Hassanab	2·254·145	Nilo
Tamania	222·1372	Nilo

### 3.4 Copertura del suolo

Una volta realizzati i vari bacini e sottobacini, per completare la calibrazione del modello è necessario costruire la mappa di copertura del suolo. Tale lavoro si rende essenziale in quanto i parametri idrologici e le caratteristiche del deflusso vengono chiaramente influenzate dalla copertura del terreno e dal relativo utilizzo. Nello specifico, vanno a condizionare i meccanismi di infiltrazione, saturazione, evapotraspirazione e porosità del terreno.

I file di copertura del suolo vengono forniti dal *Copernicus Global Land Service*, CGLS, il programma europeo per l'osservazione della Terra. Il servizio di monitoraggio del territorio di Copernicus produce sistematicamente mediante statistiche sulla superficie, mappe globali della copertura del suolo e dei relativi cambiamenti.

## | DATI UTILIZZATI

Le mappe annuali globali fornite includono: una classificazione discreta con 23 classi, secondo il Land Cover Classification System (LCCS) dell'ONU-FAO e le relative statistiche sulla superficie (km<sup>2</sup>) per area amministrativa di livello 0 e 1 come definito nello strato dell'unità amministrativa globale UN-FAO; frazioni di copertura versatili (%) per le 10 classi base, un indicatore per distinguere i tipi di foresta per i pixel in cui la frazione di copertura supera l'1%; un indicatore della densità dei dati di input.

Il modello Poli-Hydro utilizza il metodo Curve Number o CN, che può essere valutato a partire dalla mappa di uso del suolo, tramite i valori indicati da Tabella 3.5. La quale permette di convertire mediante comando *reclassify*, di ArcGIS Pro, le classi di copertura della classificazione di CGLS al corrispondente valore di CN.

CGLS	Soil Type	CN	CGLS	Soil Type	CN
0	No Data	0	113	Dense forest, needle leaves, deciduous	25
20	Shrubs	50	114	Dense forest, broad leaves deciduous	25
30	Grassland	30	115	Dense forest, mixed	25
40	Vegetation, managed	46	116	Dense forest	25
50	Urban	46	121	Open forest, needle leaves evergreen	25
60	Sparse vegetation cover	50	122	Open forest, evergreen, broad leaves	25
70	Snow/Ice	60	123	Open forest, needle leaves	25
80	Water bodies	100	124	Open forest, deciduous, broad leaves	25
90	Wetland/grassland	85	125	Open forest, mixed	25
100	Musks, lichens	79	126	Open forest	25
111	Dense forest, needle leaves evergreen	25	200	Sea	100
112	Dense forest, evergreen, broad leaves	25			

Tabella 3.5 Conversion table CGLS to CN for soil moisture assessment

I risultati di tale classificazione vengono di seguito riportati sia nella Tabella 3.6 che rappresenta le percentuali delle aree e le stesse corrispondenti ad ogni singola classe presente che nella Figura 3.4.

Tabella 3.6 Classi di copertura del suolo presenti nel bacino del fiume Nilo

Classe CN	Area [%]	Area [km <sup>2</sup> ]	Tipo di copertura
30	0.15	598·028	Manto erboso
25	0.15	588·167	Foresta
50	0.52	2·058·236	Vegetazione sparsa
46	0.14	540·556	Urbana
85	0.01	43·527	Aree umide
100	0.03	101·995	Corpi idrici

## | DATI UTILIZZATI

Come ben si osserva dalla Figura 3.4, il territorio coperto dal bacino presenta una netta divisione in due aree ben distinte identificate nella zona equatoriale e nella zona desertica o sahariana, denominata *sparse vegetation*, dimostrando così la netta correlazione tra la copertura del suolo e la corrispondente area climatica.

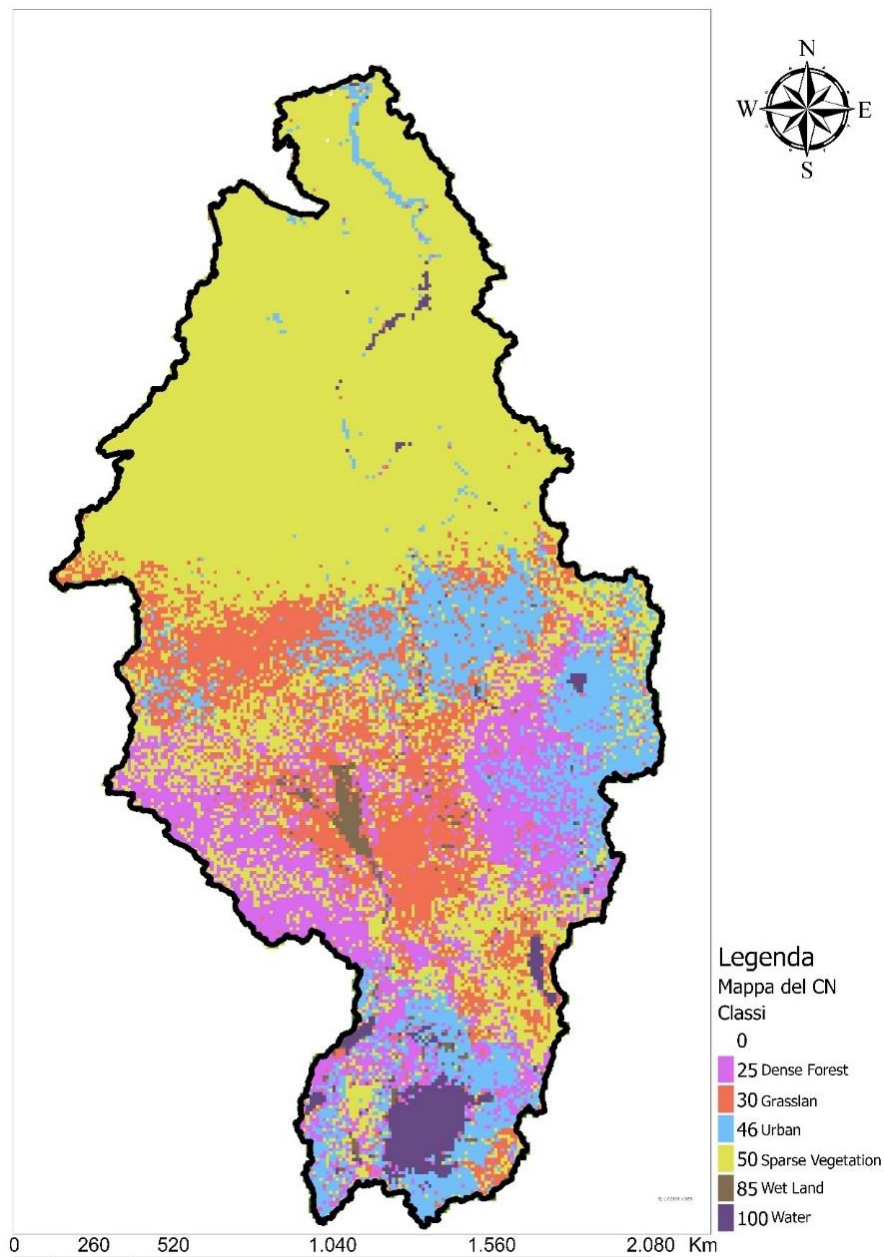


Figura 3.4 Mappa del Curve Number del bacino del fiume Nilo

In Figura 3.5 è invece visibile la distribuzione della vegetazione, senza distinzione di tipologia, rispetto all'area in esame.



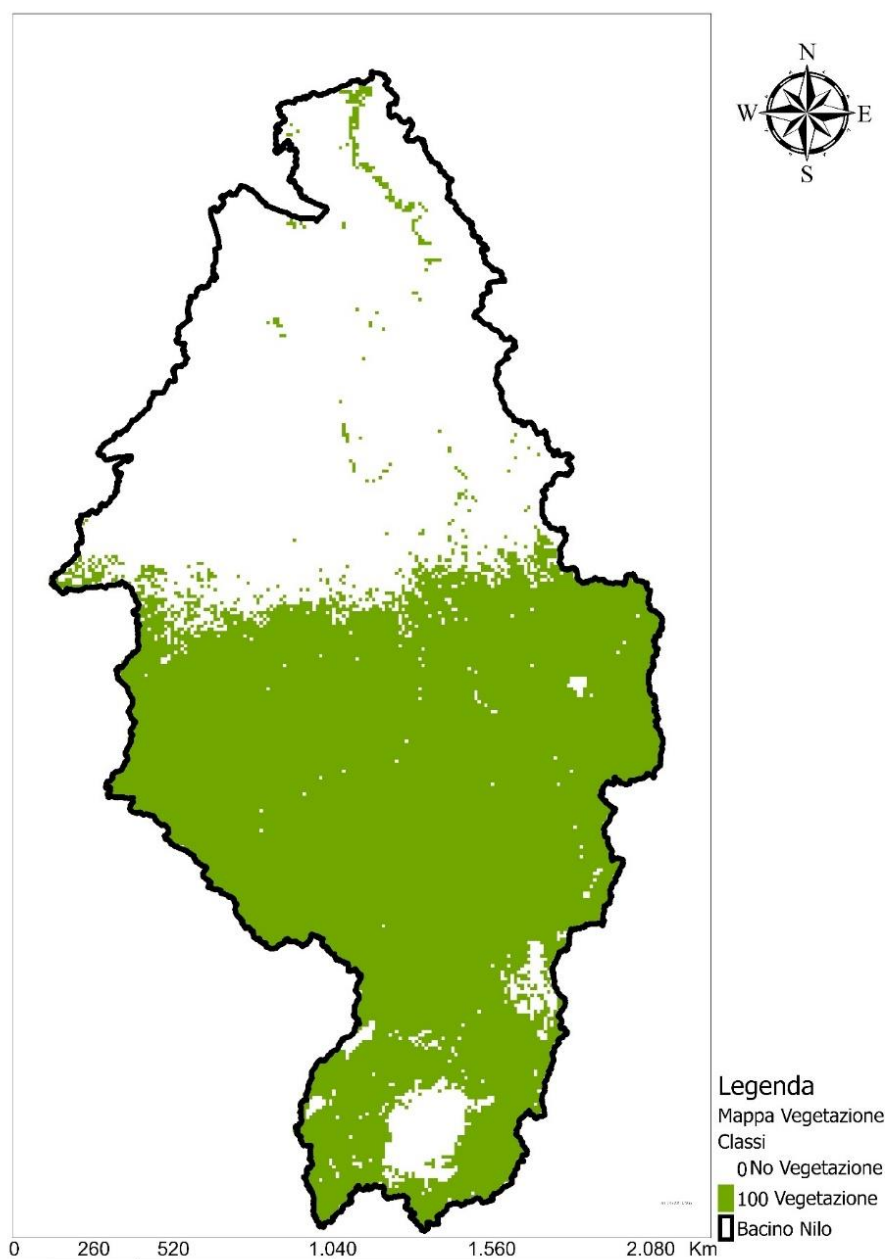


Figura 3.5 Mappa della distribuzione della vegetazione nel bacino del fiume Nilo.

Nel seguente caso di studio non sono presenti aree coperte da ghiacciai.

### 3.5 Elaborazione dati FAO

Nel presente caso di studio, ulteriormente ai valori ottenuti mediante le stazioni di misura, sono stati utilizzati dati presenti nelle varie pubblicazioni della FAO (Food and Agriculture Organization). La FAO è un'agenzia specializzata delle Nazioni Unite che guida gli sforzi internazionali per sconfiggere la fame nei vari paesi del mondo.

Il corso del Nilo attraversa vaste aree geografiche che sono sotto l'occhio d'indagine di questa organizzazione, motivo per il quale, in diversi report effettuati da quest'ultima sono presenti ricche informazioni che interessano il seguente caso di studio. Nello specifico, nei seguenti report [34], [35], [38], [39] vengono riportate annotazioni riguardanti le variabili di precipitazione e di evapotraspirazione mediate su tutto lo spartiacque. Le informazioni si presentano su scala annuale ed insistenti sull'intera area di studio, senza differenziarsi quindi a seconda della regione o della zona climatica. I dati reperiti sono stati utilizzati come ulteriore aiuto alla calibrazione del modello idrologico, fornendo così un aggiuntivo elemento di confronto.

Avendo reperito varie pubblicazioni della FAO, è stato deciso di effettuare una media dei valori dei parametri tra le diverse fonti, in modo da ottenere un risultato il più uniforme possibile. I dati mediati vengono di seguito riportati nella Tabella 3.7.

*Tabella 3.7 Media dei report FAO per i valori annuali [mm/y] di precipitazione ed evapotraspirazione*

<b>Anni</b>	<b>Precipitazioni [mm/y]</b>	<b>Evapotraspirazione [mm/y]</b>
1973	624	550
1974	677	600
1975	674	604
1976	724	680
1977	662	620
1978	680	624
1979	627	600
1980	645	610
1981	626	615
1982	590	550
1983	666	626
1984	532	608

### 3.6 Prelievo Irriguo

Per poter effettuare una calibrazione e quindi una comparazione con il caso reale la più veritiera possibile, è risultato necessario ricercare informazioni riguardanti il prelievo irriguo per l'utilizzo dell'acqua lungo il corso del fiume. Come ben descritto nei capitoli precedenti, la spartizione delle acque del Nilo è da sempre stata oggetto di numerose controversie tra i vari stati che ne usufruiscono; controversie che sono sfociate poi in veri e propri scontri di ambito politico-territoriale. A causa di questi continui dibattiti e di una scarsa organizzazione nella gestione da parte dei paesi africani, risulta abbastanza difficoltosa la ricerca di informazioni accurate riguardante il quantitativo di acqua prelevato e le relative tempistiche di estrazione. È possibile ricavare soltanto poche informazioni riguardanti il prelievo irriguo in alcune pubblicazioni della FAO, nello specifico, i dati forniti indicano il volume di acqua, su scala annuale, sottratto al bacino del Nilo da ciascun paese coinvolto. Poiché i vari report sono specifici per determinati anni di analisi è stato deciso di effettuare una media tra le varie informazioni disponibili. Considerato poi, che il prelievo d'acqua del fiume Nilo, non è solo di tipo artificiale ma la presenza di alcuni canali naturali, come il Bahr Yussef che collega il fiume alla grande oasi del Fayyum fornisce un'ulteriore fonte di sottrazione d'acqua al corso principale.

Nello specifico, sono stati considerati tre ulteriori punti di prelievo:

1. Il canale del Bahr Yussef: canale situato a sud-ovest del Cairo che sfocia nella famosa depressione del Fayyum. L'estensione dell'area di depressione spazia da circa i 1·270 ai 1·700 km<sup>2</sup>; comprendendo campi irrigati attraverso il Bahr Yussef. Grazie quindi al Bahr Yussef, la depressione del Fayyum si presenta come una terra fertile e coltivabile con il punto di sbocco del canale nel grande lago del Birket Qarun.
2. La valle di Wadi El-Rayan: situata a 65 km a sud-ovest della città di Fayyum, la quale ospita due grandi laghi artificiali creati per deviare l'acqua di drenaggio agricola in eccesso dall'oasi di Fayyum. Il lago Qarun è in grado di contenere solo un certo volume di acqua di drenaggio. Superate le sue capacità il livello del lago si innalzerebbe a tal punto da allagare il terreno circostante, causando danni irreparabili al territorio. Così nel 1974, un canale aperto di 9 km ed un tunnel di 8 km sono stati scavati attraverso il deserto dal lato occidentale della depressione del Fayyum alla grande depressione

secca di Wadi El-Rayan. L'acqua di drenaggio ora, come riporta Amusingplanet.com, scorre nel Wadi El Rayan formando due grandi laghi. L'acqua raggiunge prima il lago settentrionale e quando viene travolta, un torrente scorre verso una parte più profonda della depressione, dove si forma un altro lago. Poiché il corso del torrente è stato eroso, le rocce naturali sono state esposte e sopra di esse si sono formate delle cascate.

3. L'area della Toshka: il Toshka Project era un progetto, nato nel 1978, mirato a creare un nuovo delta a sud del Sahara occidentale, parallelo al Nilo nell'area di Toshka Meadow in Egitto. Ciò avrebbe contribuito ad aggiungere un'area di circa 540 mila acri alla trama agricola, irrigata con l'acqua del Nilo, deviata dal lago Nasser attraverso il canale Sheikh Zayed, canale che avrebbe dovuto prelevare, ad opera compiuta, 5.5 miliardi di m<sup>3</sup> di acqua all'anno. Purtroppo, molti problemi hanno rallentato il progetto che non ha raggiunto gli scopi nei tempi stabiliti, causando un ingente dispendio di denaro e di risorse. I laghi avevano una superficie massima di 1.450 km<sup>2</sup> e contenevano oltre 25 miliardi di m<sup>3</sup> d'acqua. Con il fallimento del progetto, il quale ha portato alla realizzazione di un'opera di fatto incompiuta ora la superficie rimasta è solo il 20% di quella di dieci anni fa (Figura 3.6) [71].



Figura 3.6 Laghi della Toshka 21 giugno 2012 e 11 settembre 2002 (Nasa/Jsc).

## | DATI UTILIZZATI

Sebbene ad oggi, la regione della Toshka non contribuisca più di tanto come fonte di prelievo, viene comunque considerata come contributo alla sottrazione di portata del fiume Nilo, poiché attiva nell'intervallo temporale considerato per lo studio.

Di seguito vengono riportati in Tabella 3.8 i contributi al prelievo considerati i termini di volume di acqua prelevato annualmente, distribuiti tra le varie aree dei sottobacini utilizzati nello studio.

*Tabella 3.8 Distribuzione dei contributi al prelievo irriguo tra le varie aree dei sottobacini.*

<b>Sottobacini</b>	<b>Q Irriguo [km<sup>3</sup>]</b>	<b>Q Fayyum [km<sup>3</sup>]</b>	<b>Q Wadi El-Rayan [km<sup>3</sup>]</b>	<b>Q Toshka [km<sup>3</sup>]</b>
El Ekhsase	95.21	10	0.2	25
Assiut	92.53	0	0	25
Nag Hammadi	91.78	0	0	25
Esna	90.94	0	0	25
Gaafra	90.00	0	0	25
Asswan Dam	36.461	0	0	25
Hudeiba Hassanab	33.487	0	0	0
Tamariat	33.000	0	0	0

## 4 Modello Idrologico

Il modello di "trasformazione afflussi-deflussi" raggruppa l'insieme dei diversi processi idrologici che concorrono alla formazione del deflusso a partire dalla precipitazione meteorica, prima ancora che il deflusso si incanali nella rete idrografica, fornendo una riproduzione dei processi idrologici che si svolgono all'interno di un bacino idrografico. Questo procedimento viene identificato come rappresentativo del bilancio di massa idrica per una porzione elementare di un bacino idrografico, il cui input è costituito dalla precipitazione e temperatura misurata in prossimità del suolo e il conseguente output è costituito dalle portate defluenti nel tempo. La precipitazione viene in parte intercettata dalla vegetazione, in parte s'infiltra nel suolo, in parte va ad accumularsi in piccoli invasi, la parte rimanente, infine, va a costituire il deflusso superficiale che scorrerà verso la rete idrografica secondo le linee di massima pendenza del terreno.

Dal punto di vista matematico, il modello idrologico di previsione può essere visto come la messa a punto di un filtro, il cui input è costituito dalle misure di due variabili di tipo distribuito  $P(x, t)$  e  $T(x, t)$ , ovvero le precipitazioni e le temperature, dipendenti dalla coordinata spaziale  $x$  e temporale  $t$  insistenti sul bacino, e il cui output è una variabile  $Q(t)$ , portata integrata nello spazio nella sezione di chiusura del bacino, perciò dipendente solo dal tempo.

Il modello opera sul bacino suddiviso in una griglia regolare di celle quadrate  $10\text{km} \times 10\text{km}$ , ciascuna con propri valori caratteristici per poter elaborare meglio la diversità spaziale dei fenomeni fisici. La risoluzione scelta per la dimensione delle celle è risultata necessaria data l'ampia estensione del bacino in studio. La modellizzazione viene eseguita per poter correlare le varie componenti del sistema bacino e stimare, predire e confrontare le risposte a diversi ed eventuali stimoli. Questo permetterà di conoscere le interazioni tra le varie componenti facenti parte il sistema e quindi di stimare le eventuali risposte a diversi eventi futuri.

## 4.1 Modello Poli-Hydro

Il modello idrologico utilizzato è un modello semi-distribuito, programmato e successivamente aggiornato presso il *Climate-Lab* del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA) del Politecnico di Milano [72]. Il modello si fonda sull'equazione di conservazione della massa applicata al contenuto d'acqua nel terreno, tra due intervalli temporali consecutivi.

$$S_{t+\Delta t} = S_t + R + M_s + M_t - ET - Q_g \quad [4.1]$$

Dove:

- $S_t$  [mm] è il contenuto d'acqua nel suolo all'istante di tempo  $t$ ;
- $S_{t+\Delta t}$  è il contenuto di acqua ad un istante di tempo  $t + \Delta t$ ;
- $R$  [mm] la precipitazione liquida;
- $M_s$  [mm] la fusione nivale;
- $M_i$  [mm] la fusione glaciale;
- $ET$  [mm] l'evapotraspirazione effettiva;
- $Q_g$  [mm] il deflusso sub-superficiale.

L'intervallo temporale  $\Delta t$  utilizzato nel modello è posto pari a 24 h. Le componenti di fusione nivale e glaciale a causa delle elevate temperature e del territorio privo di aree glaciali, possono ritenersi non contribuenti al deflusso finale e considerate quindi come nulle.

Il deflusso alla sezione di chiusura si avrà solo se c'è un eccesso d'acqua rispetto al massimo contenuto di acqua nel suolo  $S_{max}$  [mm], ovvero:

$$\begin{cases} Q_s = S_{t+\Delta t} - S_{max} & \text{se } S_{t+\Delta t} > S_{max} \\ Q_s = 0 & \text{se } S_{t+\Delta t} < S_{max} \end{cases} \quad [4.2]$$

$S_{max}$  viene stimato per ciascuna cella in base al metodo del Curve Number (SCS-CN) proposto dal Soil Conservation Service (SCS) dell'USGS (SCS. 1986):

$$S_{max} = S_0 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad [4.3]$$

Dove:

- $S_0$ [mm] 254;
- $CN$  valutato attraverso la mappa di copertura del suolo (Paragrafo 3.8).

## 4.2 Deflusso sub-superficiale

La portata d'acqua che fluisce tramite infiltrazione nel sottosuolo del bacino è calcolata in base a relazioni matematiche (Formula 4.4) dipendenti del contenuto di acqua nel suolo  $S$  e della permeabilità del suolo  $K$ . Per permettere una corretta elaborazione del modello viene assunto che la sezione di sbocco delle portate sotterranee coincida con quella degli spartiacque superficiali, in modo da poterne studiare correttamente gli scambi di flusso.

$$Q_g = K \left( \frac{S}{S_{max}} \right)^{k_g}$$

[4.4]

Dove  $K$  e  $k_g$  sono i parametri da calibrare per una corrispondenza il più veritiera possibile tra idrogramma osservato e modellato.

## 4.3 Evapotraspirazione

In mancanza di stazioni di misura giornaliere relative all'evapotraspirazione del territorio in esame, viene utilizzata la formula di Hargreaves per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale. Tale formulazione, riportata di seguito, è dipendente solo dalle variabili temperatura e radiazione libera in atmosfera

$$ETP = 0.0023S_0\sqrt{\delta t}(T + 17.8)$$

[4.5]

Dove:

- $S_0$ [mm/d] equivalente in acqua evaporata della radiazione extraterrestre;
- $T$ [°C] la temperatura media giornaliera dell'aria;
- $\delta t$ [°C] escursione media mensile della temperatura.

L'evapotraspirazione reale o effettiva  $ET$  (Formula 4.6) si differenzia dalla potenziale  $ETP$  e deve essere calcolata per poter effettuare un confronto sulla validità dei risultati ottenuti, considerando che l' $ET$  non può necessariamente essere maggiore di  $ETP$ .



$$ET = E_s + T_s \quad [4.6]$$

Dove:

- $E_s$  [mm] evaporazione effettiva dal suolo;
- $T_s$  [mm] traspirazione effettiva della vegetazione.

Che vengono calcolate da letteratura come:

$$E_{eff} = \alpha(\vartheta) \cdot ETP(1 - f) \quad [4.7]$$

$$T_{eff} = \beta(\vartheta) \cdot ETP \cdot f \quad [4.8]$$

Con:

- $f$  copertura vegetativa;
- $\theta$  contenuto relativo di acqua nel suolo  $\theta = \frac{S}{S_{max}}$ .

$$\alpha(\theta) = \theta \quad [4.9]$$

$$\beta(\theta) = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_w}{\theta_l - \theta_w} & \text{se } \theta > \theta_w \\ 0 & \text{se } \theta < \theta_w \end{cases}$$

[4.10]

Con:

- $\theta_w$  [0.15] contenuto d'acqua corrispondente al punto di appassimento;
- $\theta_l$  [0.35] contenuto d'acqua che il suolo è in grado di trattenere.

## 4.4 Flow Routing

Il modello Poli-Hydro esegue, come affermato precedentemente il bilancio di massa mediante l'equazione X applicato ad ogni cella per ogni passo temporale. La portata generata viene poi trasmessa alla sezione di chiusura mediante un modello di propagazione attraverso un algoritmo di *flow routing* semi-distribuito [72]. Per simulare questa propagazione viene utilizzato il modello lineare di Nash per serbatoi a cascata, considerando due sistemi lineari in parallelo, quello superficiale e quello sotterraneo. Il modello di Nash stima la portata come integrale di convoluzione secondo cui l'idrogramma unitario istantaneo (IUH, definito come l'idrogramma di piena che si origina in un bacino in seguito ad un impulso unitario) esprime la relazione tra i vari serbatoi a cascata secondo:

$$Q = \int_0^t P(\tau)u(t - \tau)d\tau$$

[4.11]

Dove:

- $P(\tau)$  precipitazione istantanea nel bacino;
- $u(\tau)$  risposta del bacino ad una sollecitazione unitaria[IUH].

Nel caso del modello di Nash lo IUH ha valore definito dalla seguente formulazione:

$$u(t) = \frac{1}{k + \Gamma(n)} \left(\frac{t}{n}\right)^{n-1} \exp\left(-\frac{t}{k}\right)$$

[4.12]

Dove  $n$  è il parametro di forma, numero di serbatoi ognuno con un coefficiente di esaurimento pari a  $k$ , il parametro di tempo.

I parametri di stimare, modificare e valutare quindi durante la calibrazione possono riassumersi nei seguenti:

- $K$  permeabilità del suolo;
- $k_g$  esponenziale della portata sub-superficiale;
- $t_{sup}$  tempo di lag del sistema superficiale;
- $t_{sub}$  tempo di lag del sistema sotterraneo.

## 4.5 Calibrazione modello idrologico

Per poter confermare la bontà di adattamento del modello al caso di studio risulta necessario un confronto sia visivo che analitico tra le serie di dati osservate e quelle modellate. In una prima fase viene effettuato un confronto visivo tra l'idrogramma di portata osservato e modellato. In seconda fase, invece, al fine di ottenere una miglior calibrazione possibile è stato impiegato un indice statistico di errore:

- Bias o Errore percentuale:

$$e = \frac{Q_{mod} - Q_{oss}}{Q_{oss}} \cdot 100$$

[4.13]

I valori dei bias consentono di determinare la sovrastima ( $e > 0$ ) o la sottostima ( $e < 0$ ) del modello. Nel presente caso di studio, tale indice di errore è stato applicato alla valutazione sulla portata simulata. I dati osservati di portata utilizzati sono quelli registrati mediante le stazioni idrometriche, riportati nel Capitolo 3.2. Ulteriore

elemento considerato per valutare la bontà di adattamento della risposta del modello ai parametri in input inseriti, è stato il riscontro mediante ulteriori analisi, attraverso l'impiego dell'indice di errore statistico per i valori di precipitazione e di evapotraspirazione. L'unico paragone possibile è quello effettuabile su tutta l'area del bacino del Nilo a livello annuale, in quanto i dati disponibili, forniti dalla FAO, sono rappresentativi dell'intera area di influenza del fiume.

I parametri da stimare per la calibrazione vengono di seguito riportati:

- $K$  [mm/h] è la permeabilità del suolo;
- $k_g$  [1/h] è l'esponente della portata  $Q_g$ ;
- $S_{fatt}$  [-] è il fattore moltiplicativo di  $S_{max}$ ;
- $t_{lag}$  [h] tempi di lag superficiali e sub-superficiali per valutare il tempo che intercorre tra il picco di precipitazione ed il picco dell'idrogramma.

Considerato che l'area di estensione del bacino del Nilo, copre sostanzialmente due zone climatiche con comportamenti e risposte completamente diversi l'una dall'altra, nello specifico la zona equatoriale e quella sahariana, è stato deciso di utilizzare valori di parametri di calibrazione specifici a seconda delle due aree climatiche.

La suddivisione nelle due zone è stata effettuata assegnando al sottobacino corrispondente alla stazione idrometrica di Tamaniat i valori dei parametri caratteristici della zona equatoriale, mentre, per la restante area individuata dal bacino e dalla stazione di chiusura a valle di El Ekhsase la calibrazione è avvenuta utilizzando parametri consoni ad una zona climatica di tipo desertico sahariana.

Ulteriore discorso a parte deve essere effettuato per il parametro  $S_{fatt}$ , ovvero il fattore moltiplicatore da applicare al contenuto di acqua nel suolo  $S_{max}$ . Come accennato precedentemente, data l'evidente differenza tra le due aree climatiche, è stato deciso di considerare un valore di  $S_{fatt}$  più piccolo nell'area equatoriale sottesa dal sottobacino Tamaniat, rispetto al resto del bacino, è risultata necessaria questa scelta poiché, un valore elevato di  $S_{max}$ , simile a quello utilizzato in area desertica, nella parte del territorio corrispondente alla fascia tropicale, comporterebbe un contributo maggiore della portata sub-superficiale, superiore a quello di fatto presente. L'obiettivo è stato quindi quello di ridurre il valore del massimo contenuto d'acqua nel suolo per far sì che il deflusso superficiale possa cominciare prima e non si abbia un contributo significativo e costante in tutto l'anno del deflusso  $Q_g$ , maggiore quindi di quello attuale. Per poter rappresentare al meglio

il contenuto di acqua presente nel suolo è stata quindi creata una maschera nella quale ad ogni valore di cella, 10x10 km, è stato assegnato un corrispondente valore di  $S_{fatt}$ , in base alla caratteristica di suolo presente (che è stata precedentemente valutata con il metodo CN nel Capitolo 3.8).

Risulta poi necessario specificare che, al fine di avere una calibrazione il più veritiera possibile, per poter realisticamente confrontare le portate modellate con quelle osservate, è risultato necessario sottrarre al valore di portata modellato il volume di acqua compatibile a quello prelevato da ogni stato per il consumo, mediante il criterio precedentemente riportato nel Capitolo 3.6.

## 5 Risultati della calibrazione

### 5.1 Sottobacino Tamaniat

Dovendo adattare la calibrazione del modello al tipo di comportamento e conseguentemente di clima di una determinata area, la stazione idrometrica di Tamaniat, data la sua posizione, risultava la più idonea a rispecchiare l'intera zona corrispondente al clima di tipo equatoriale. Permettendo così di ricercare un andamento il più possibile fedele alla realtà.

Di seguito vengono riportati i valori dei parametri calibrati (Tabella 5.1):

*Tabella 5.1 Valori definitivi dei parametri calibrati per il sottobacino Tamaniat.*

<b>Bacino</b>	<b>Tempo Lag<sub>sup</sub> [h]</b>	<b>Tempo Lag<sub>subsup</sub> [h]</b>
Tamaniat	12'007	36'022

<b>K</b>	0.03	[mm/d]
<b>expQg</b>	4	esponenziale
<b>S<sub>fatt</sub></b>	3	[-]

Di seguito viene riportato il grafico a barre con l'andamento delle portate medie annuali osservate e quello delle portate medie annuali modellate del sottobacino del Tamaniat, valutate sull'intero periodo di simulazione Grafico 5.1.

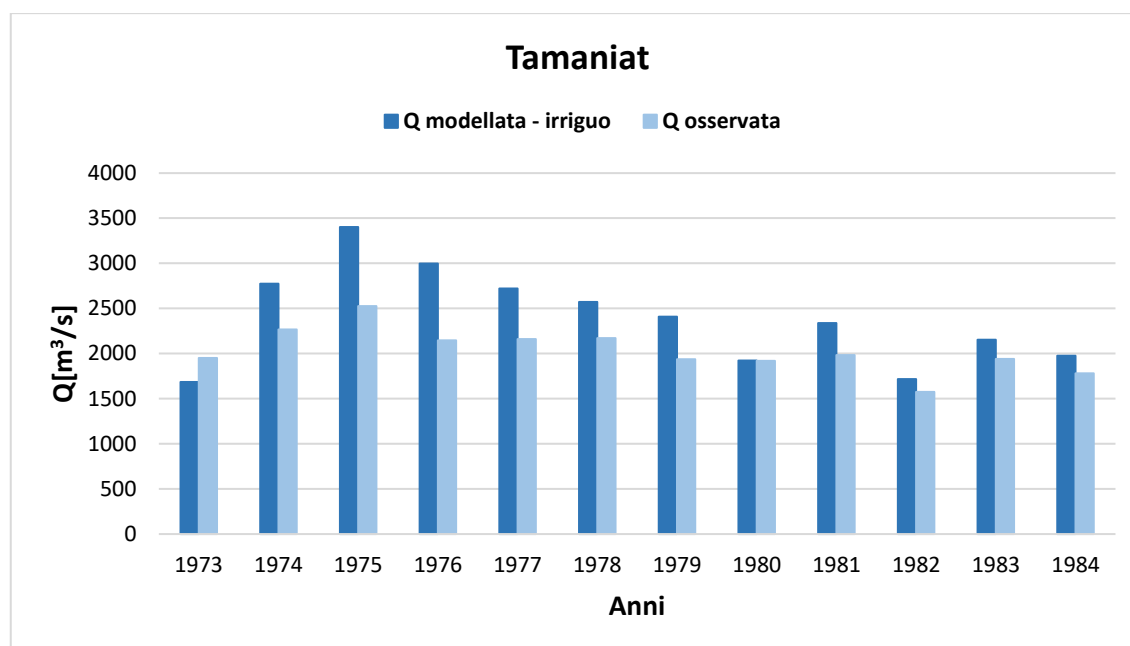


Grafico 5.1 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino Tamaniat

A causa della mancanza di dati disponibili per il consumo di acqua relativo al prelievo irriguo su base mensile, è stato possibile effettuare un confronto per i valori di portata modellata e osservata solo su scala annuale.

## 5.2 Sottobacino El Ekhsase

La seconda regione considerata presenta tempi di lag superficiali e sub-superficiali, permeabilità idraulica ed esponenziale della portata sotterranea diversi dal bacino sopra individuato. Nella restante area in esame, corrispondente alla regione con clima prevalentemente desertico-sahariano vi sono presenti ben 6 stazioni idrometriche di misurazione di portata, compresa la stazione di chiusura, tutte situate all'interno dell'area corrispondente allo stato d'Egitto.

I valori dei parametri vengono di seguito riportati in Tabella 5.2:

Tabella 5.2 Valori definitivi dei parametri calibrati per il sottobacino El Ekhsase.

Bacino	Tempo Lag <sub>sup</sub> [h]	Tempo Lag <sub>subsup</sub> [h]
El Ekhsase	21·238	63·713
Assiut	20·644	61·931
Nag Hammadi	20·476	61·427
Eсна	20·290	60·869
Gaafra	20·079	60·237
Asswan Dam	20·045	60·135

## | RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

<b>K</b>	0.06	[mm/d]
<b>expQg</b>	3	esponenziale
<b>S<sub>fatt</sub></b>	5	[-]

Per quanto riguarda l' $S_{fatt}$ , viene applicato lo stesso discorso fatto nel paragrafo precedente, ed in questo caso il valore assegnato per l'area con territorio desertico è pari a 5.

Di seguito vengono riportati i grafici (Grafici 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7) risultanti con l'andamento delle portate medie annuali osservate e quello delle portate medie annuali modellate dei relativi sottobacini calibrati, tenuto sempre conto del volume di acqua destinato all'uso irriguo, valutate sull'intero periodo di simulazione. Oltre alla rappresentazione grafica, vengono riportati di seguito anche i valori degli indici statistici di errore, la cui formulazione è spiegata nel paragrafo precedente (Tabella 5.3).

*Tabella 5.3 Indice statistico di errore calcolato per tra la media della portata annuale (considerato l'irriguo) e la media della portata osservata per ogni sottobacino considerato*

<b>Sottobacino</b>	<b>e [%]</b>
El Ekhsase	- 6.01
Assiut	22.77
Nag Hammadi	-3.25
Esna	3.31
Gaafra	-4.69
Asswan Dam	-0.28
Tamania	11.06

## | RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

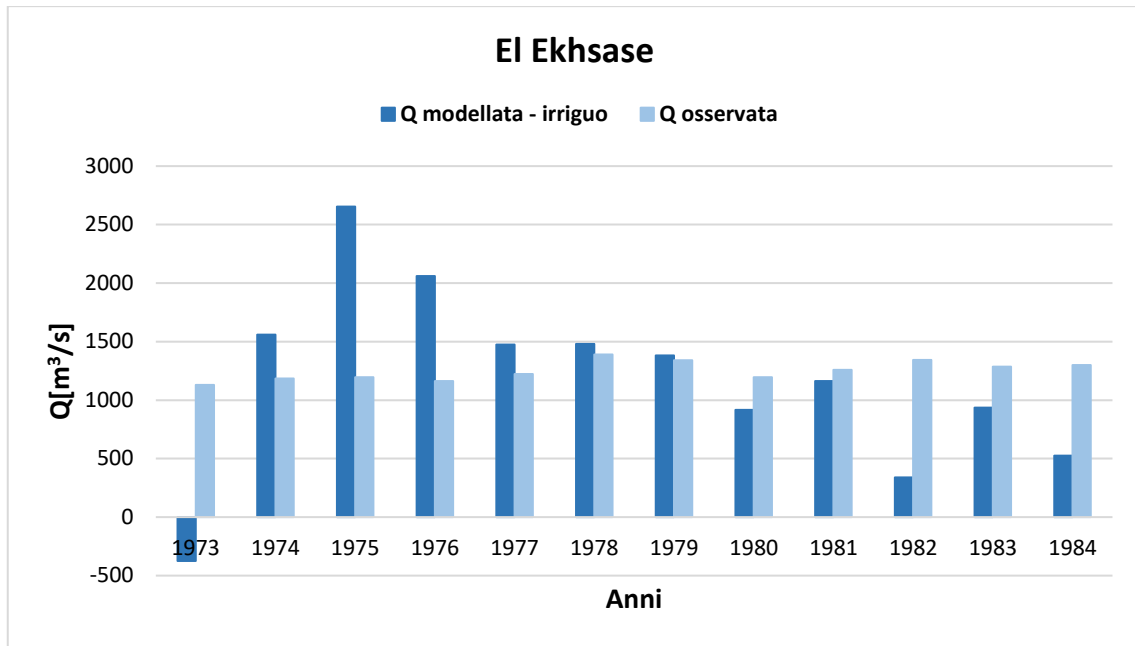


Grafico 5.2 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di El Ekhsase

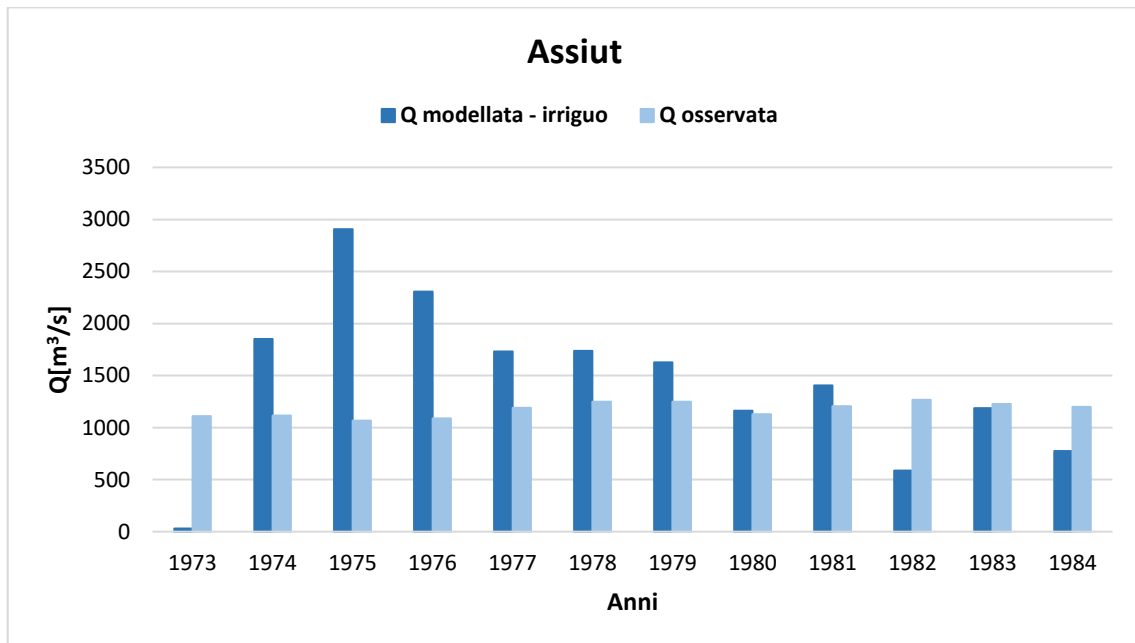


Grafico 5.3 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Assiut



## | RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

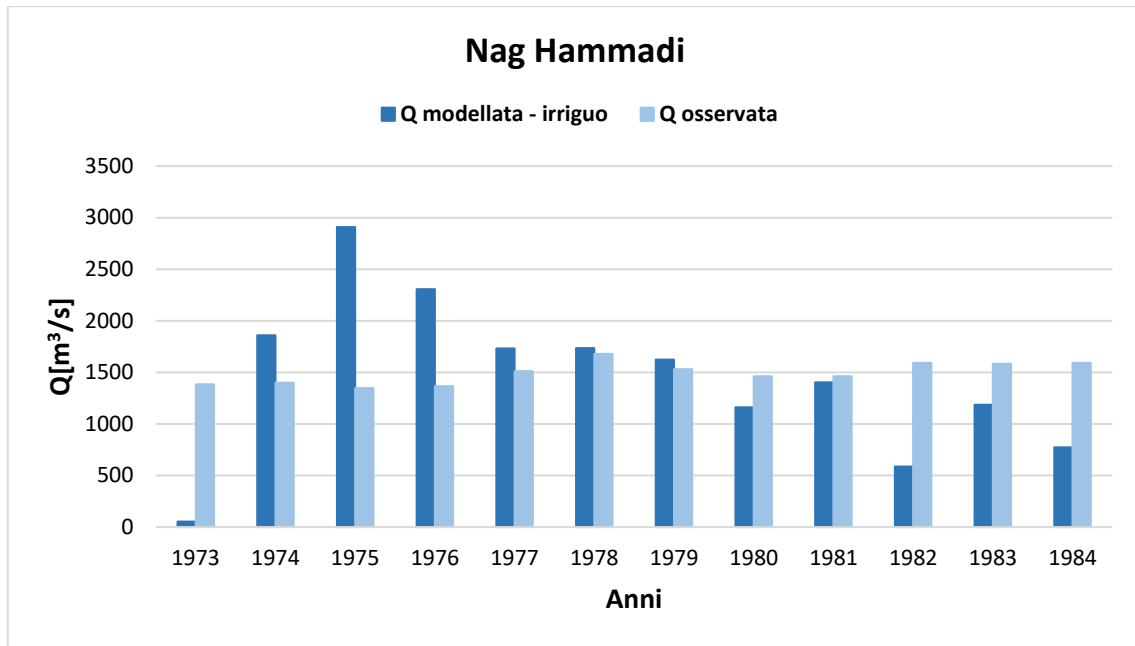


Grafico 5.4 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Nag Hammadi

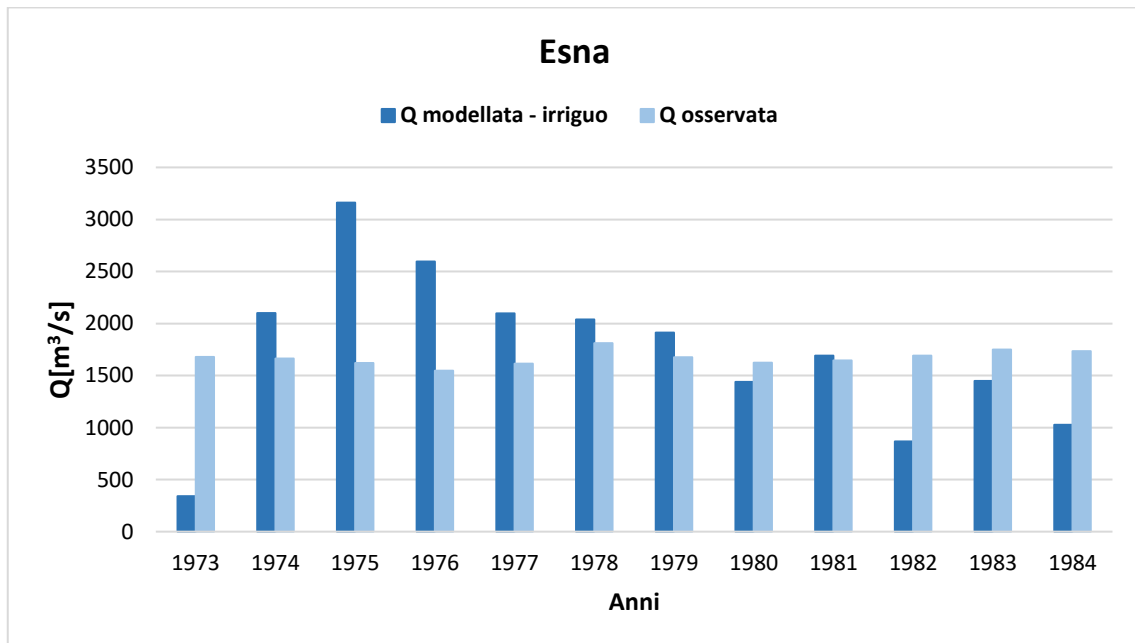


Grafico 5.5 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Esna

## | RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

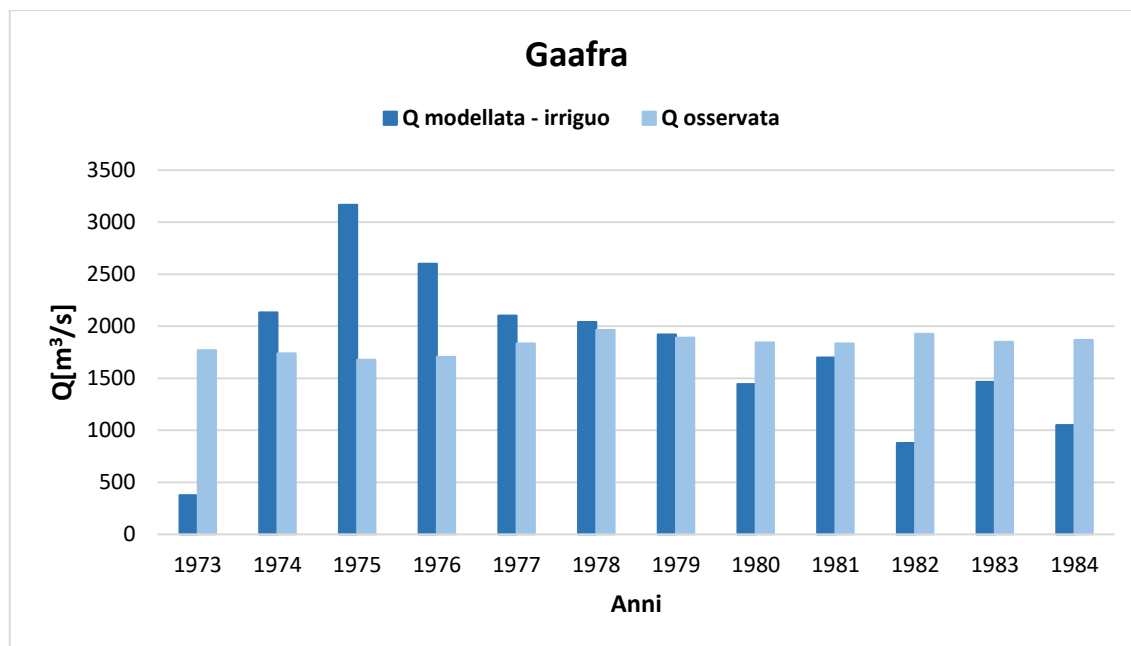


Grafico 5.6 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Gaafra

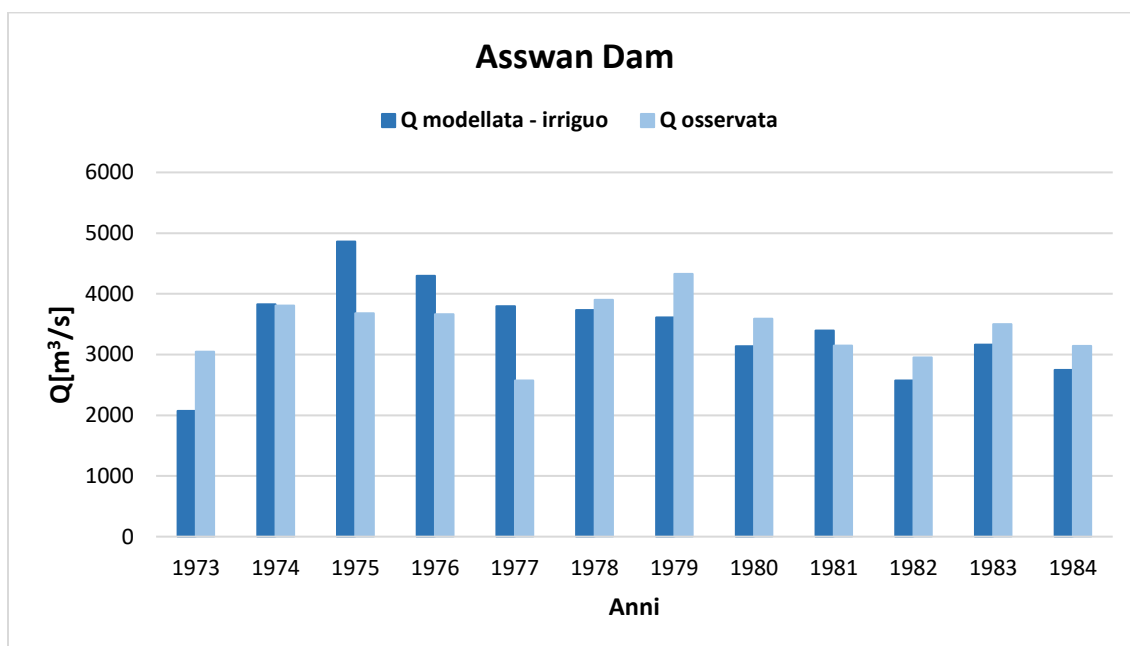


Grafico 5.7 Andamento portate medie modellate (compreso prelievo irriguo) e osservate a scala annuale nel sottobacino di Asswan Dam

Viene di seguito riportato il valore del bias, riferito su dati medi annuali della precipitazione e dell'evapotraspirazione insistenti su tutto il bacino e confrontati con i dati provenienti dai report FAO (Tabella 5.4).

## | RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

Tabella 5.4 Bias medi annuali tra il valore di precipitazione medio simulato ed il valore medio ottenuto dai Report FAO

	$e_{\text{precipitazione}} [\%]$	$e_{\text{evapotraspirazione}} [\%]$
1973	-4.8	-67.0
1974	-13.1	-36.1
1975	-0.7	-19.3
1976	-12.7	-15.5
1977	-7.2	-6.6
1978	-7.2	-5.4
1979	-7.5	0.7
1980	-11.2	-5.5
1981	-10.3	-5.5
1982	-12.8	-2.0
1983	-6.8	-6.2
1984	-10.5	-8.2

Con un errore medio su tutti gli anni pari a:

- $e_{\mu_{\text{prec}}} = -9\%$
- $e_{\mu_{\text{evapotraspirazione}}} = -15\%$

I Grafici 5.8 e 5.9 mostrano invece per i sottobacini principali Tamaniat ed El Ekhsase, caratterizzati dai parametri sopra riportati, il grafico a barre in pila dei contributi al deflusso superficiale con l'aggiunta della visualizzazione dell'evapotraspirazione. Come viene ben evidenziato, l'unico contributo al deflusso del bacino è quello corrispondente alle precipitazioni piovose, essendo l'area sottesa dal bacino del Nilo priva di contributi nivali o glaciali, come precedentemente spiegato nel Capitolo 2.1.

## | RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

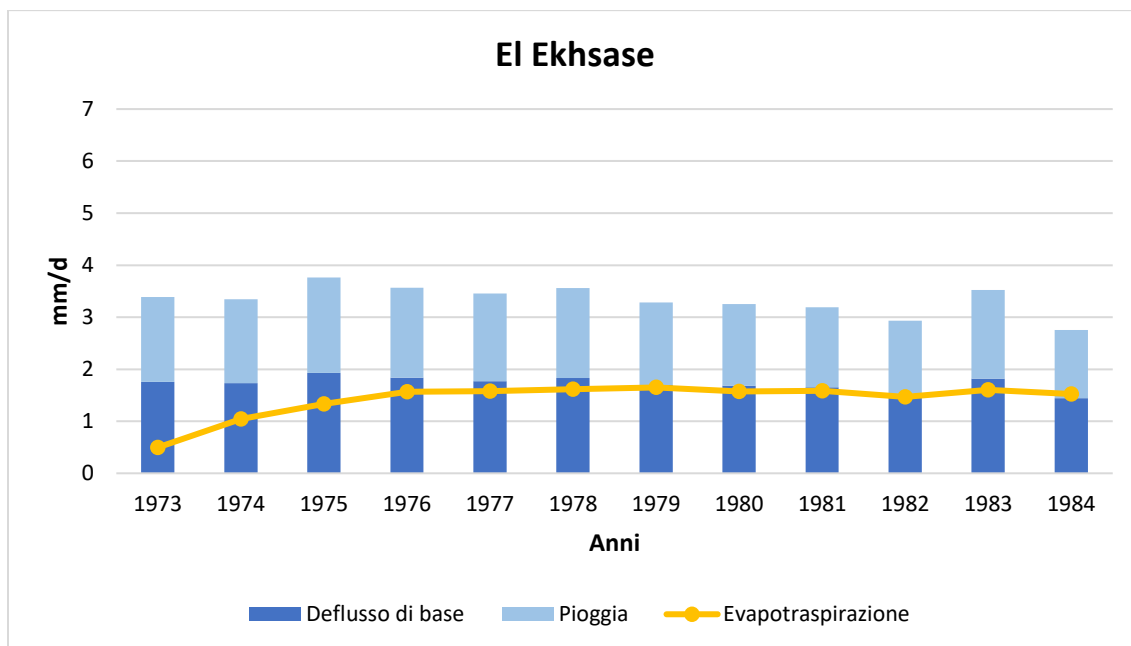


Grafico 5.8 Andamento dei contributi simulati del deflusso a scala media annuale sul bacino di El Ekhsase (1973-1984)

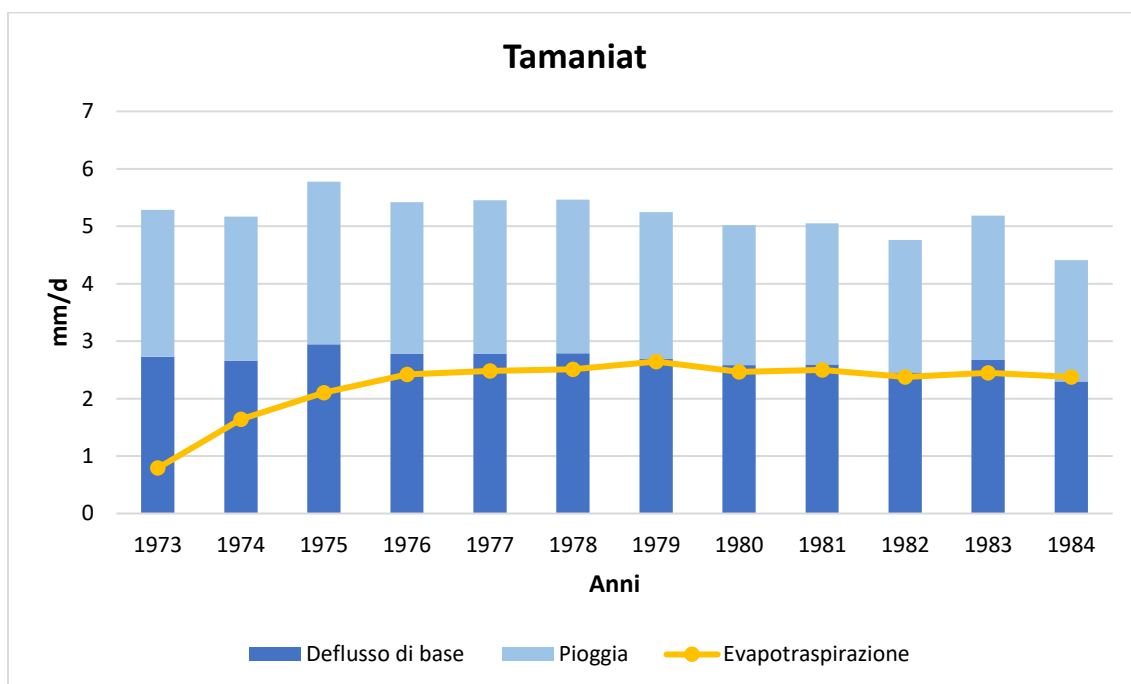


Grafico 5.9 Andamento dei contributi simulati del deflusso su scala media annuale del bacino del Tamaniat (1973-1984)

Questi due grafici mostrano con chiara evidenza la differenza tra le due aree climatiche, il contributo al deflusso principale di tutto il bacino del Nilo è infatti fortemente influenzato dalla fascia dell'altopiano etiope. Le precipitazioni piovose, che insistono durante la stagione delle piogge lungo la fascia equatoriale,

## | RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE

contribuiscono come maggior apporto all'intera portata del fiume. L'andamento del grafico 5.9 non fa altro che confermare il fatto che le precipitazioni insistenti sull'intero bacino, soprattutto in termini di quantità, provengano quasi interamente dall'area più meridionale di quest'ultimo, ovvero quella soggetta alle intense piogge caratteristiche del clima tropicale.

## 6 Scenari Climatici

### 6.1 IPCC

L'IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change* è l'organismo delle Nazioni Unite che studia ed elabora la scienza relativa al cambiamento climatico. L'IPCC prepara relazioni di valutazione complete sullo stato delle conoscenze scientifiche, tecniche e socioeconomiche riguardanti l'impatto del cambiamento climatico e gli eventuali rischi futuri, fornendo strumenti per ridurre la velocità con cui si sta verificando tale cambiamento. L'organismo, inoltre, redige rapporti speciali su argomenti concordati dai governi membri, nonché rapporti metodologici che forniscono linee guida per la preparazione degli inventari dei gas serra. [73]

L'organizzazione si divide in tre gruppi di lavoro (Working Group I, Working Group II, Working Group III) ed una task force.

- Il Working Group I esamina la scienza fisica alla base del cambiamento climatico passato, presente e futuro.
- Il Working Group II valuta la vulnerabilità dei sistemi socioeconomici e naturali al cambiamento climatico, le sue conseguenze, sia positive che negative, e le opzioni di adattamento.
- Il Working Group III si concentra sulle mitigazioni al cambiamento climatico, ricercando metodi per ridurre le emissioni di gas e rimuovere i gas serra dall'atmosfera.
- La task force sugli inventari nazionali dei gas serra (TFI), istituita dall'IPCC, nella sua 14esima sessione (1998), supervisiona il programma nazionale di inventari dei gas a effetto serra dell'IPCC (IPCC-NGGIP). Questa si occupa di sviluppare la metodologia ed i software concordati a livello internazionale per il calcolo e la comunicazione delle emissioni e degli assorbimenti nazionali di gas serra e incoraggia l'uso di questa metodologia da parte dei paesi partecipanti all'IPCC e dai firmatari della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC).

Dal 1992 ad oggi sono stati pubblicati sei Assessment Reports, l'IPCC sta attualmente lavorando al sesto rapporto di valutazione (AR6) formato dai tre

contributi del gruppo di lavoro e un rapporto di sintesi. I modelli di circolazione globale utilizzati in questo elaborato appartengono tutti all'AR6.

## **6.2 Modelli generali della circolazione**

Grazie ai modelli climatici, è possibile simulare la possibile evoluzione del clima, partendo dal clima attuale. I modelli climatici hanno una struttura simile a quella dei modelli utilizzati per le previsioni meteorologiche, non limitandosi tuttavia a descrivere lo strato inferiore dell'atmosfera, sede dei processi meteorologici, ma simulando anche le correnti oceaniche e in parte le interazioni con la neve, il ghiaccio e la vegetazione. I modelli forniscono una previsione delle possibili condizioni climatiche, con valenza rappresentativa e statistica. Di fatto, l'utilizzo di questi modelli permette una sorta di semplificazione delle interazioni e relazioni che avvengono nell'insieme del sistema terrestre.

I GCM (modelli di circolazione generale) si dividono in modelli della circolazione atmosferica, Atmospheric General Circulation Model (AGCM), o modelli dell'interazione con l'oceano, Ocean General Circulation Model (OGCM). Le due categorie di GCM, se accoppiate, generano un modello di circolazione accoppiato detto Coupled GCM (CGCM) o Atmospheric-Oceanic GCM (AOGCM). Sotto l'ipotesi, scientificamente provata, secondo cui tutti i corpi idrici interagiscono scambiando energia con l'atmosfera, i GCM permettono di descrivere tale interazione. Le variabili prese in considerazione dai modelli climatici sono la temperatura, la precipitazione, l'umidità dell'aria, la pressione atmosferica, la copertura nivale, l'umidità del suolo e l'irraggiamento solare. Per tutti i processi non descrivibili dai GCM vengono utilizzati gli Earth System Model (ESM), modelli che combinano i GCM ad altri sistemi in grado di simulare fenomeni come il ciclo del carbonio, i processi chimici in atmosfera e negli oceani, l'uso del suolo, la dinamica della vegetazione e le variazioni dell'albedo superficiale. La decisione di utilizzare l'uno o l'altro modello dipende quindi dalle ipotesi di partenza e dall'obiettivo a cui si vuole giungere; ai fini di avere una elaborazione la più rappresentativa possibile è opportuno considerare diversi modelli per confrontarne poi i risultati ottenuti.

## **6.3 Limitazioni dei modelli**

I modelli climatici considerati operano su larga scala, con risoluzione maggiore di 100 km, fornendo quindi proiezioni climatiche che non considerano le variabilità

locali, ma che sono rappresentative solamente a scala globale. I fenomeni atmosferici, inoltre, sono caratterizzati da un'alta variabilità intrinseca, la quale non può essere interamente rappresentata dalla bassa risoluzione dei GCM. Questo comporta imprecisioni nei valori simulati dai modelli, motivo per il quale viene effettuato un adattamento locale, il downscaling [17], statistico, deterministico e dinamico, che assicura una miglior rappresentazione delle grandezze climatiche considerate. I GCM, inoltre, non sono in grado di modellare fenomeni atmosferici come le nuvole, la forzante solare e la forzante vulcanica.

## **6.4 Modelli adottati**

Nel seguente caso in studio sono stati utilizzati nello specifico tre modelli climatici: CESM2, CMCC, EC-EARTH3 riportati tutti nel rapporto (AR6) dell'IPCC.

### **6.4.1 CESM2**

Il sistema CESM2, Community Earth System Model Version 2, è un modello open-source sviluppato da ricercatori e studenti del National Center for Atmospheric Research, che consiste in modelli accoppiati di oceano, atmosfera, terreni, terre e mari ghiacciati, fiumi ed onde, scambiando flussi tra loro [74]. Le interazioni tra le componenti del modello avvengono grazie ad uno specifico accoppiatore. La risoluzione utilizzata è di  $1.25^{\circ} \times 0.9^{\circ}$  con 31 livelli in verticale per la parte atmosferica e 60 livelli per la parte oceanica, per una griglia di  $320 \times 384$ .

### **6.4.2 CMCC**

Il modello CMCC, Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici Climate Model, nel quale ha recentemente preso parte anche il Politecnico di Milano, si basa sulle componenti atmosferiche, terrestri e del ghiaccio marino del modello comunitario del sistema terrestre accoppiato con il modello oceanico globale Nucleus for European Modeling of the Ocean. Viene utilizzata in questo elaborato la CMCC-CM2 [74]. La configurazione standard del CMCC-CM2, cioè il CMCC-CM2-SR5, utilizza griglie di risoluzione orizzontale di circa  $1^{\circ}$  per tutti i componenti del sistema. Per la componente atmosferica, è usata una griglia regolare di  $0.9^{\circ} \times 1.25^{\circ}$  e 30 livelli verticali.



### 6.4.3 EC-EARTH3

Il modello EC-EARTH3 rappresenta la versione più aggiornata del modello EC-EARTH, l'ESM sviluppato dal consorzio europeo prendendone lo stesso nome [74]. Le componenti sono combinate attraverso l'accoppiatore OASIS3-MCT. L'EC-EARTH3 può avere diverse risoluzioni: quella standard della parte atmosferica è 0.75° in orizzontale e 91 livelli in verticale, mentre la parte oceanica del modello utilizza una risoluzione di 75 livelli in verticale

## 6.5 Scenari climatici adottati

Gli scenari climatici forniscono una stima dello stato del clima del futuro. Essi permettono di simulare i possibili sviluppi delle azioni umane responsabili del cambiamento climatico (emissioni di gas serra, gas chimici, aerosol e sfruttamento del suolo), consentono la valutazione degli impatti sulla società e gli ecosistemi e valutano l'efficienza delle opzioni di risposta, come l'adattamento e la mitigazione. [75]. Un ruolo chiave nei cambiamenti climatici viene gestito anche dalle tendenze economiche e sociali, dagli sviluppi geopolitici, dalla cooperazione globale e dal progresso tecnologico. La capacità della società di cambiare ritmo e adattarsi ai cambiamenti futuri sarà un discriminante importante per limitare la povertà e la disparità, al fine di giungere ad una migliore qualità di vita.

Il CMIP, Coupled Model Incorporated Project, fornisce proiezioni basate su multipli modelli climatici validati su scenari alternativi rappresentativi di comportamenti sociali riguardanti la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Le proiezioni del CMIP6 sono basate sui più recenti scenari di emissioni e di uso del suolo, prodotti con Modelli di valutazione Integrati (IAM) basati sui nuovi futuri scenari sociali, gli Shared Socio-economic Pathways (SSP), e sui corrispettivi scenari di emissioni di gas serra, uso del suolo e inquinamento, cioè i Representative Concentration Pathways (RCP).

### 6.5.1 RCP (Representative Concentration Pathways)

I Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (*Representative Concentration Pathways, RCP*) sono scenari climatici espressi in termini di concentrazioni di gas serra. Il numero associato a ciascun RCP si riferisce al Forzante Radiativo (*Radiative Forcing – RF*) espresso in unità di Watt per metro quadrato ( $W/m^2$ ) ed indica l'entità dei cambiamenti climatici antropogenici fino al 2100, rispetto al

periodo preindustriale, vengono di seguito elencati i valori considerati di forzante radiativa [74]:

- RCP 2.6: scenario dai livelli radiativi molto bassi, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+2.6\text{W/m}^2$ , cioè di circa 490 ppm di  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ,
- RCP 4.5: primo scenario intermedio, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+4.5\text{W/m}^2$ , cioè di circa 650 ppm di  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ;
- RCP 7.0: secondo scenario intermedio, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+7\text{W/m}^2$ , cioè di circa 1100 ppm di  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ;
- RCP 8.5: scenario di livelli radiativi alti, che corrisponde ad una forzante radiativa di  $+8.5\text{W/m}^2$ , cioè di circa 1370 ppm di  $\text{CO}_{2\text{eq}}$ .

### 6.5.2 SSP (Shared Socio-Economic Pathways)

Gli SSP sono nati come integrazione agli RCP e si basano su cinque "narrazioni" che descrivono scenari evolutivi in ambito socioeconomico, senza applicare nuove politiche climatiche rispetto alle vigenti. Essi individuano diverse trasformazioni della società futura considerando investimenti in educazione, sanità e sviluppo energetico [74], che vengono di seguito elencate:

- SSP1: scenario a sviluppo sostenibile. Si assiste ad una crescita sostenibile, fondata sul rispetto dell'ambiente;
- SSP2: scenario a sviluppo intermedio. Le tendenze sociali, economiche e tecnologiche proseguono con lo stesso andamento che hanno avuto fino ad ora;
- SSP3: scenario a rivalità regionale. I vari Paesi sono incentrati su essi stessi, assicurandosi di essere competitivi e sicuri, ma ignorando il raggiungimento di uno sviluppo collettivo e non affrontando le questioni ambientali. Questo scenario può comportare una forte degradazione in alcune regioni;
- SSP4: sviluppo con forti disuguaglianze. Le disparità sociali si accentuano sia internamente che esternamente i confini dei Paesi. Si fanno investimenti sia su risorse non rinnovabili che su risorse energetiche a basso impatto ambientale. Le politiche ambientali vengono applicate solo nelle zone a medio-alto reddito;

- SSP5: scenario a sviluppo con tanti combustibili fossili. L'evoluzione umana è ottimistica, ma l'economia è basata principalmente sul fossile, conducendo dunque a problemi ambientali locali.

### 6.5.3 MIP per CMIP6

Lo Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) fornisce proiezioni climatiche multi-modello basate su scenari alternativi di emissioni future e cambiamenti nell'uso del suolo, elaborati con modelli di valutazione integrati, accoppiando cioè gli scenari a variabilità socioeconomica con quelli a variabilità radiativa. Viene di seguito elencata la spiegazione per ogni scenario [74]:

- SSP1-2.6: rappresenta la fascia bassa della gamma di percorsi di forzatura futuri nella letteratura e aggiorna il percorso RCP2.6. Prevede la produzione di una media multi-modello di riscaldamento inferiore ai 2°C entro il 2100, e pertanto può supportare le analisi che necessitano di considerare questo obiettivo politico. SSP1 è stato scelto poiché prevede un cambiamento contenuto di uso del suolo (con un aumento della copertura forestale globale). Lo scenario è rilevante poiché combina una situazione con poca vulnerabilità sociale con una bassa pressione ambientale, prevedendo un valore piccolo di forzante radiativa.
- SSP2-4.5: rappresenta la parte media della gamma di futuri percorsi di forzatura e aggiorna il percorso RCP4.5. SSP2 è stato scelto poiché la stima dell'uso del suolo e le vie di aerosol non sono così estreme rispetto ad altri SSP, inoltre viene considerato rilevante per la ricerca, in quanto scenario che combina società con vulnerabilità intermedie ed un livello di forzante radiativa intermedio.
- SSP3-7.0: rappresenta la fascia medio-alta della gamma dei futuri percorsi di forzatura. Colma una lacuna nei percorsi di forzatura CMIP5, la quale è particolarmente importante perché rappresenta un livello di forzatura simile anche alla forzatura nello scenario di base SSP2. SSP3-7.0 è uno scenario con un cambiamento sostanziale nell'uso del suolo (in particolare una diminuzione della copertura forestale globale) e un elevato valore di emissioni di gas serra, stimando scenari particolarmente importanti sulla sensibilità del clima regionale all'uso del suolo e agli aerosol. Inoltre, SSP3 è

particolarmente importante per gli studi poiché mette insieme l'alta vulnerabilità della società (SSP3) con una forzante radiativa relativamente alta.

- SSP5-8.5: rappresenta la fascia alta della gamma di percorsi futuri nella letteratura IAM, aggiorna il percorso RCP8.5. Per SSP5 è stato scelto per questo percorso di forzatura perché è l'unico scenario SSP con emissioni sufficientemente elevate da produrre un forzante radiativo di 8,5 Wm<sup>-2</sup> nel 2100.

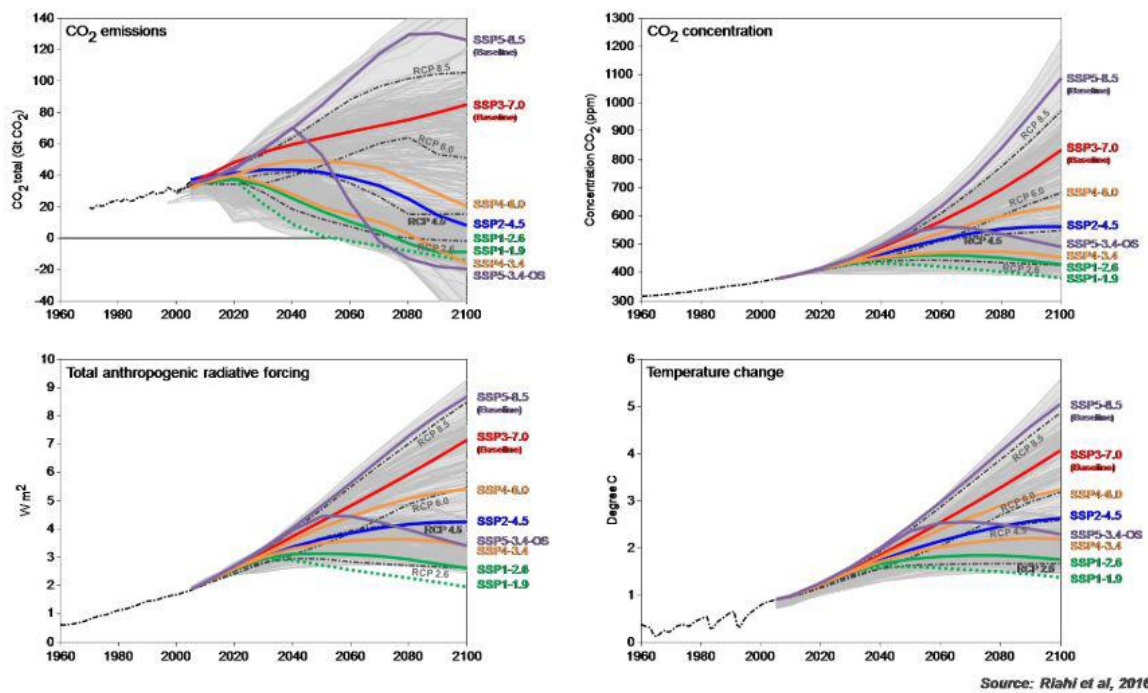


Figura 6.1 Emissioni e concentrazioni di CO<sub>2</sub>, forze radiative antropogeniche e temperatura media globale nel 21° secolo secondo il CMIP6 [74].

## 6.6 Downscaling

I dati in output dai GCM sono rapportati ad una griglia spaziale con celle di dimensioni comprese tra i 100 km ed i 200 km, quindi estremamente estese, motivo per il quale non permettono un diretto utilizzo nelle proiezioni a carattere locale.

La risoluzione così estesa dei GCM rappresenta una forte limitazione dei modelli, che risulterebbero poco rappresentativi di scale spaziali inferiori, come quella utilizzata per la valutazione del regime idrico a scala di bacino.

L'esigenza però di poter stimare come le variazioni di temperatura e precipitazione possano influire sulle dinamiche locali ha fatto sì che venisse elaborato un

procedimento in grado di utilizzare gli output calcolati a livello globale come input per i modelli idrologici a scala locale. Viene così definito downscaling il processo di disaggregazione temporale e spaziale che consente il passaggio dalla scala globale dei GCM ad una scala minore.

La procedura di downscaling statistico riportata in seguito è stata calibrata e applicata alle serie osservate di precipitazione e temperatura delle stazioni meteorologiche NAOO considerate anche per la calibrazione e precedentemente descritte nel capitolo 3.

### 6.6.1 Procedura di downscaling

L'iter eseguito per la procedura di downscaling si articola nella seguente procedura: Una prima fase di utilizzo di un modello di disaggregazione basato sul concetto di cascata casuale, [17] calibrato sulle serie di precipitazioni osservate nelle stazioni all'interno del bacino del Nilo per il periodo di riferimento 1973-1984. La disaggregazione spaziale sulle singole stazioni viene effettuata tramite la correzione dei bias mensili presenti sui valori cumulati di precipitazione e sull'intermittenza, effettuata singolarmente per ogni stazione. Il passo di correzione, specifico per ognuno dei GCM, serve a rendere consistenti le precipitazioni medie mensili nelle stazioni considerate. Vengono da prima calcolati i valori cumulati di precipitazione mensili osservati nelle stazioni:  $R_{OSS}$ , per il periodo di riferimento. Poi si corregge la precipitazione media mensile  $R_{GCM}$ , fornita dai modelli GCM, usando un processo moltiplicativo casuale che considera esplicitamente l'intermittenza:

$$Bias_{GAO} = \frac{R_{OSS}}{R_{GCM}} = B_{GAO} B_0 W_0$$

[6.1]

In cui:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(B_0 = 0) = 1 - p_0 \\ P\left(B_0 = \frac{1}{p_0}\right) = p_0 \\ E[B_0] = \frac{1}{p_0} + 0(1 - p_0) = 1 \\ W_0 = \exp w_0 - \frac{\sigma_{w_0}^2}{2} \\ E[W_0] = 1 \end{array} \right.$$

[6.2]

Dove:

- $B_{GAO}$ ,  $p_0$ ,  $\sigma_{w_0}^2$ : sono i parametri del modello,

- $B_{GAO}$ : termine costante che forza il valore medio mensile di  $R_{GCM}$  ad uguagliare il relativo valore medio osservato,
- $B_0$ : generatore di tipo  $\beta$ , che rappresenta la probabilità che il tasso di pioggia per un dato giorno  $R_{GAO}$  sia positivo, condizionato al valore di  $R_{GCM}$  positivo, modellato tramite una distribuzione binomiale,
- $W_0$  è un generatore strettamente positivo, utilizzato per aggiungere una quantità adeguata di variabilità alla precipitazione durante i periodi identificati come piovosi.

La procedura di stima dei parametri è stata condotta separatamente per ognuno dei GCM utilizzati.

Per quanto riguarda la temperatura si utilizzano le temperature giornaliere fornite dai modelli,  $T_{GCM}$  per il periodo di riferimento che vengono confrontate con le temperature osservate nelle stazioni considerate. Viene quindi valutata la differenza media mensile  $\Delta T$  tra quella osservata e quella fornita dai GCM e di conseguenza le temperature giornaliere corrette sono date da:

$$T_{corr d} = T_{GCM r d} - \Delta T$$

[6.3]

Dove:

- $T_{corr d}$ : la temperatura fornita dal GCM corretta per il giorno  $d$ ,
- $T_{GCM d}$ : è la temperatura giornaliera del GCM non corretta,
- $\Delta T$ : la differenza tra la media mensile osservata e la media mensile da GCM nel mese  $i$ -esimo.

## 6.7 Risultati

A valle del processo di downscaling, le serie di precipitazione e temperatura sono confrontati con i dati osservati disponibili nel periodo di riferimento. L'operazione di comparazione è stata svolta per tutte le stazioni meteo NOAA considerate, sia quelle di precipitazione che quelle di temperatura. Una volta sistemati i parametri di calibrazione è necessario effettuare il downscaling degli scenari climatici futuri, considerato che i dati disponibili coprono gli anni dal 1973 al 1984, l'intervallo temporale di analisi futura verrà quindi effettuato sugli anni che vanno dal 1985 al 2100, tenuto conto del fatto che l'arco temporale compreso tra il 1985 ed il 2020 viene considerato per la stabilizzazione del modello.

Per effettuare il confronto dei cambiamenti climatici sull'intero bacino del Nilo, sono state osservate le variazioni di temperatura, precipitazione e portata rispetto al periodo di controllo. Nello specifico sono state analizzate le medie di precipitazione, temperatura e portata sia sul periodo simulato, compreso tra il 2021 e il 2100, che sul periodo di controllo. Le medie ricavate sono state valutate sia a scala annuale che a scala decennale, individuando quindi otto decenni per l'analisi. Lo studio per le tre variabili di riferimento è stato effettuato su tutto il bacino del Nilo, la cui stazione di chiusura è individuata dall'idrometro di El Ekhsase. Mentre, per eseguire il confronto del livello idrometrico con i dati di livello storici, indicativi di un arco temporale più remoto, nello specifico dal 622 d.C. al 1921 d.C. riportati da Toussoun [43] è stato considerato il sottobacino relativo alla sezione di chiusura di Assiut.

### 6.7.1 Temperatura

In tabella 6.1 vengono riportate le variazioni di temperatura media mensile del bacino del Nilo per i diversi scenari climatici ed i diversi modelli utilizzati rispetto alle medie presenti nel periodo di controllo, 1973-1984, per un totale complessivo di 12 casistiche. Non riscontrando decenni con particolari criticità a titolo di riferimento vengono mostrati due intervalli considerati rappresentativi, (2041-2050 e 2091-2100) rispettivamente metà e fine secolo.

*Tabella 6.1 Variazione di temperatura a scala media mensile e media annuale, di ogni modello e per tutti gli scenari, nei decenni corrispondenti a metà secolo 2041-2050 e fine secolo 2091-2100 rispetto al periodo di riferimento 1973-1984*

Temperatura		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	annuale		
2041-2050	2.6	ec_earth	1.22	1.78	2.21	1.92	2.21	1.62	1.51	1.61	1.30	1.24	2.00	2.20	1.74	
		cesm	1.55	1.54	0.98	1.44	1.37	1.61	2.47	2.47	2.43	2.24	1.96	1.69	1.81	
		cmcc	1.96	1.87	1.44	1.20	1.51	1.52	1.48	1.22	1.38	1.31	1.45	1.56	1.49	
		ec_earth	1.88	2.53	2.45	1.70	1.89	1.70	1.76	1.35	1.34	1.16	1.47	1.35	1.71	
		4.5	cesm	1.99	1.29	1.53	1.48	1.81	1.44	2.24	2.16	2.33	2.47	2.60	2.10	1.96
		cmcc	2.14	1.91	1.62	1.28	1.31	1.45	1.42	0.70	1.24	1.31	1.31	1.33	1.42	
		ec_earth	2.01	2.36	2.21	2.29	2.41	1.75	1.76	1.50	1.24	1.31	1.94	2.33	1.92	
		7.0	cesm	2.05	2.29	1.35	1.58	1.52	1.50	2.37	2.30	1.96	2.28	2.50	1.73	1.95
		cmcc	1.40	1.62	2.02	1.43	1.22	1.31	0.72	0.28	0.53	1.07	1.48	1.78	1.24	
		ec_earth	2.72	2.81	3.01	2.19	2.56	1.82	1.69	1.40	1.14	1.15	1.18	2.51	2.01	
		8.5	cesm	2.67	2.48	1.89	1.82	2.04	1.95	2.51	2.38	2.18	1.82	2.68	2.32	2.23
		cmcc	2.11	2.36	2.32	1.66	1.92	1.84	1.21	0.73	0.62	1.07	1.23	1.42	1.54	

## | SCENARI CLIMATICI

Temperatura		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	annuale	
2091-2101	2.6	ec_earth	2.17	2.53	2.43	2.19	1.99	2.15	1.66	1.27	1.37	1.03	1.52	2.13	1.87
		cesm	2.35	2.06	1.93	1.23	1.41	1.75	2.58	2.40	2.18	1.96	2.47	1.99	2.03
		cmcc	2.55	2.42	2.49	1.58	2.03	1.95	1.63	0.73	1.15	1.57	1.95	2.35	1.87
		ec_earth	3.86	3.84	4.02	3.52	3.52	2.70	2.26	2.16	2.09	2.19	3.08	4.32	3.13
		cesm	3.65	3.80	2.55	2.83	3.22	2.90	4.09	4.00	3.28	3.56	3.52	3.40	3.40
		cmcc	3.63	3.34	3.29	2.64	2.66	2.82	2.14	1.41	1.80	2.22	2.73	3.18	2.65
		ec_earth	4.74	5.07	4.95	3.83	4.32	4.59	4.19	3.50	3.47	3.49	4.48	4.86	4.29
		cesm	4.64	4.90	4.37	3.81	3.98	4.48	5.64	5.02	4.70	4.65	4.96	4.76	4.66
		cmcc	3.76	3.78	3.62	3.13	3.31	3.42	3.10	2.19	2.12	2.41	2.99	3.38	3.10
		ec_earth	5.53	6.51	6.53	5.41	5.87	5.44	5.36	4.80	4.41	4.48	5.81	6.22	5.53
		cesm	7.45	6.54	6.19	5.88	5.95	5.84	7.24	6.44	6.00	5.90	6.48	6.66	6.38
		cmcc	5.22	5.51	4.87	4.45	4.70	5.10	4.48	3.51	3.58	4.10	4.31	4.83	4.55

Come mostrato in Tabella 6.1, è possibile osservare un aumento delle variazioni di temperatura in ogni casistica studiata. Considerando l'intervallo temporale rappresentativo di metà secolo, su scala annuale, osserviamo un aumento minimo delle temperature di almeno 1 °C, nello specifico 1.24 °C (CMCC, SSP 7.0) e massimo che si attesta attorno ai 2°C, 2.23 °C (CESM, SSP 8.5). A fine secolo invece gli aumenti sono molto più evidenti e significativi, partendo da una variazione minima di 1.87 °C nella casistica migliore (CMCC ed EC\_Earth, SSP 2.6) ad una massima di 6.38 °C (CESM, SSP 8.5). Nel complesso, il modello che mostra una maggior risposta all'aumento di temperatura in ogni scenario è il modello CESM, mentre il CMCC riporta variazioni minori rispetto agli altri.

Per maggiore chiarezza vengono riportati i grafici a barre 6.1 e 6.2, nella quale sono nuovamente mostrate le variazioni delle medie annuali di temperatura a metà (2041-2050) e fine secolo (2091-2100), confermando una coerenza con quanto affermato precedentemente.



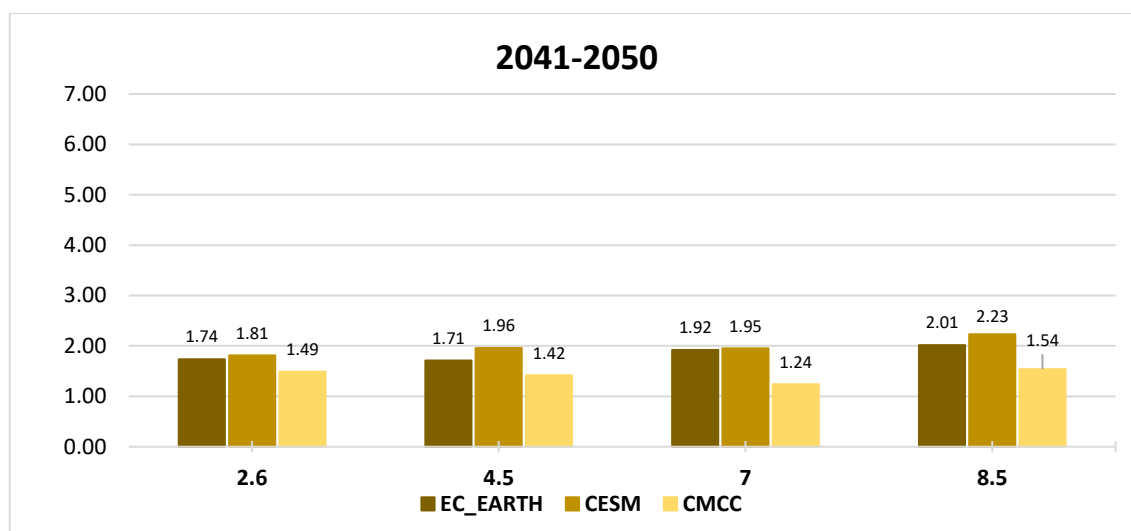


Grafico 6.1 Variazione percentuale di temperatura alla sezione di chiusura di El Ekhsase di ogni modello e scenario analizzato nel decennio 2041-2050 rispetto al periodo di riferimento 1973-1984

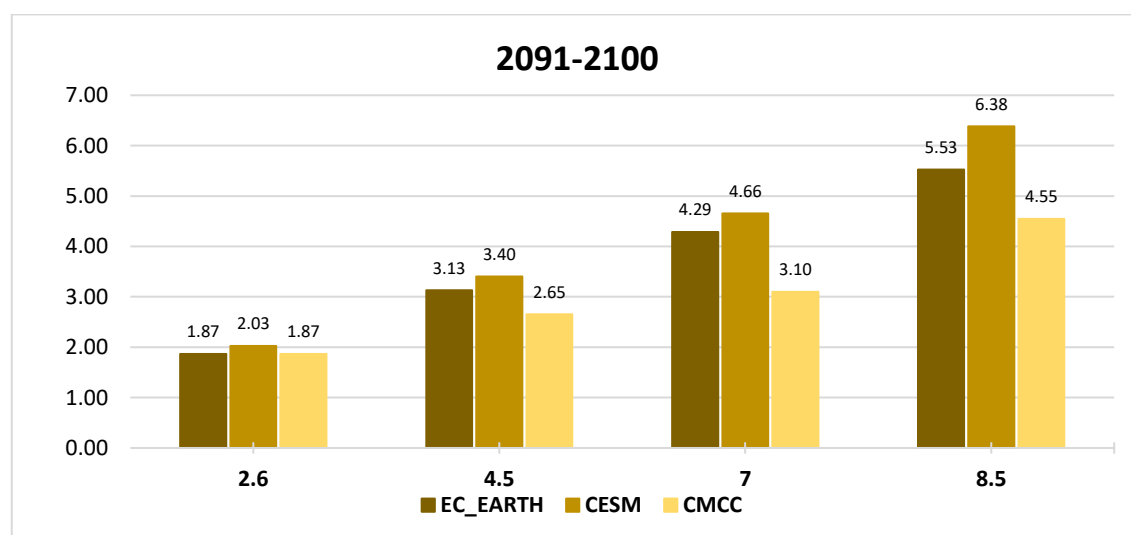


Grafico 6.2 Variazione percentuale di temperatura alla sezione di chiusura di El Ekhsase di ogni modello e scenario analizzato nel decennio 2091-2100 rispetto al periodo di riferimento 1973-1984

Nei Grafici 6.3, 6.4 e 6.5 di seguito è riportato l'andamento della temperatura media annuale sul bacino Nilo durante l'intervallo temporale proiettato (2021-2100), secondo ogni scenario climatico ed ogni modello, relazionata al valore presente durante il periodo di controllo (1973-1984). Gli andamenti sono simili per ogni SSP, ovvero mostrano tutti un aumento nel tempo dei valori di temperatura, indipendentemente dal modello considerato.

## | SCENARI CLIMATICI

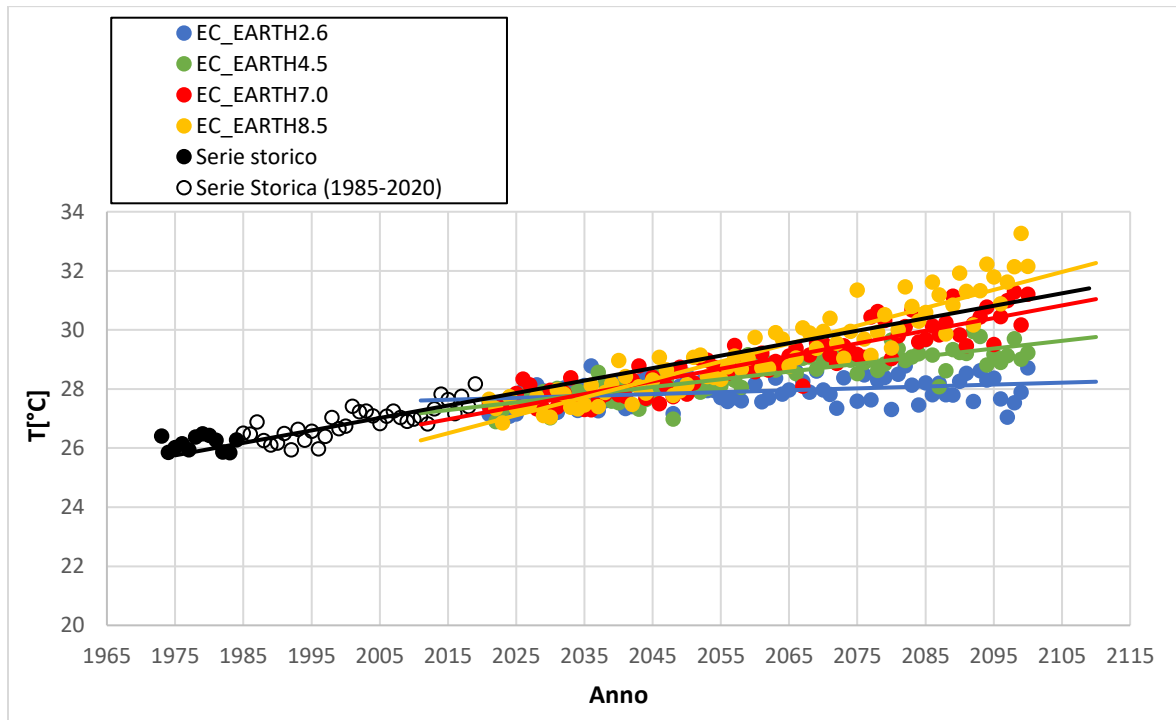


Grafico 6.3 Andamento della temperatura media annuale sul bacino del Nilo dal 1973 al 2100, modello EC-Earth.

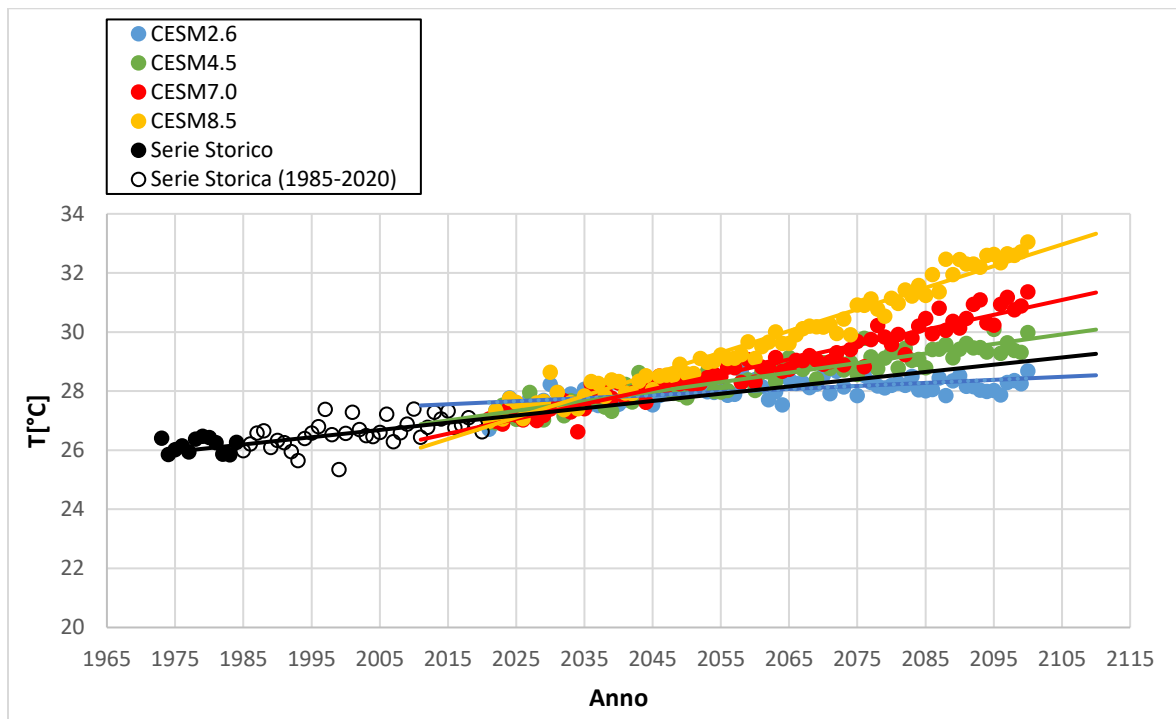


Grafico 6.4 Andamento della temperatura media annuale sul bacino del Nilo dal 1973 al 2100, modello CESM

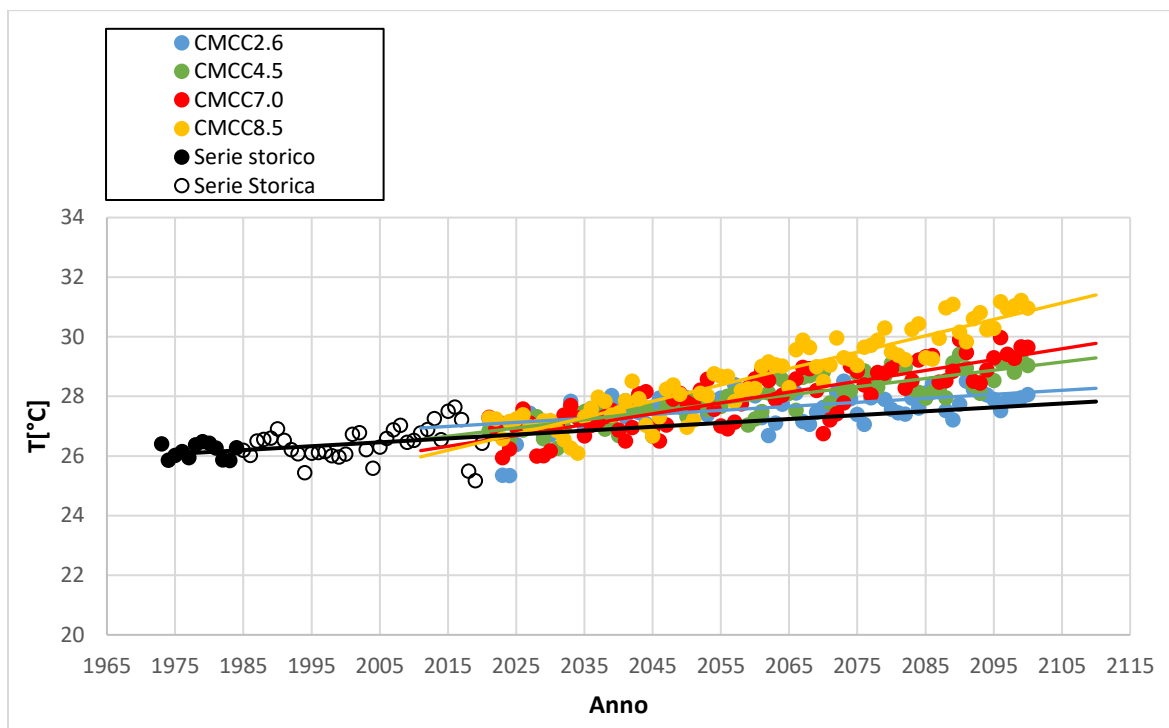


Grafico 6.5 Andamento della temperatura media annuale sul bacino del Nilo dal 1973 al 2100, modello CMCC

### 6.7.2 Precipitazioni

Come per la temperatura anche per le precipitazioni sono state calcolate le variazioni delle precipitazioni cumulate medie, rispetto al periodo di controllo, a scala mensile ed annuale sull'intero bacino del Nilo. I risultati delle precipitazioni cumulate medie nei vari decenni in esame sono mostrati nella seguente Tabella 6.2. Catalogate per i vari modelli ed i vari scenari, per un totale di 12 casistiche.

Tabella 6.2 Variazione percentuale della precipitazione cumulata annua media sul bacino del Nilo, per diversi scenari climatici e diversi modelli, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984

Decenni	ec-earth2.6	ec-earth4.5	ec-earth7	ec-earth8.5	cesm2.6	cesm4.5	cesm7	cesm8.5	cmcc2.6	cmcc4.5	cmcc7	cmcc8.5
2021-2030	21.36%	11.12%	12.61%	12.89%	5.50%	5.17%	5.75%	5.48%	7.68%	3.16%	5.37%	0.98%
2031-2040	14.79%	8.78%	17.87%	16.12%	11.00%	5.86%	6.62%	22.17%	4.56%	2.16%	0.81%	10.02%
2041-2050	17.42%	23.98%	23.89%	34.16%	6.52%	4.69%	7.50%	17.98%	7.01%	8.60%	8.45%	18.29%
2051-2060	15.37%	26.32%	23.02%	37.72%	-0.22%	11.05%	12.88%	21.05%	6.53%	12.69%	10.08%	13.52%
2061-2070	13.69%	18.38%	36.81%	39.79%	5.05%	3.21%	12.76%	9.28%	16.73%	8.62%	14.29%	12.79%
2071-2080	20.84%	19.38%	40.10%	43.96%	3.55%	5.83%	11.51%	17.12%	14.22%	14.73%	14.30%	15.03%
2081-2090	22.87%	28.04%	48.30%	42.39%	5.35%	9.12%	17.50%	12.54%	13.23%	18.13%	15.23%	20.64%
2091-2100	28.39%	32.87%	49.17%	60.76%	16.89%	10.80%	10.54%	25.30%	13.57%	20.01%	22.34%	23.86%

Le percentuali mostrate in tabella presentano una scala di colorazione che riflette l'andamento delle variazioni, da arancione, variazione minore al blu, variazione

## | SCENARI CLIMATICI

percentuale maggiore, rispetto alla media del periodo di controllo. Come è facile notare non vi è alcuna presenza di valori negativi rispetto alla scala di riferimento decennale. Ciò pare mostrare, a primo impatto, un continuo aumento sostanziale delle precipitazioni cumulate nel periodo proiettato. Cosa che ben si mostra nei grafici barre 6.6 e 6.7, che rappresentano i decenni di metà e fine secolo.

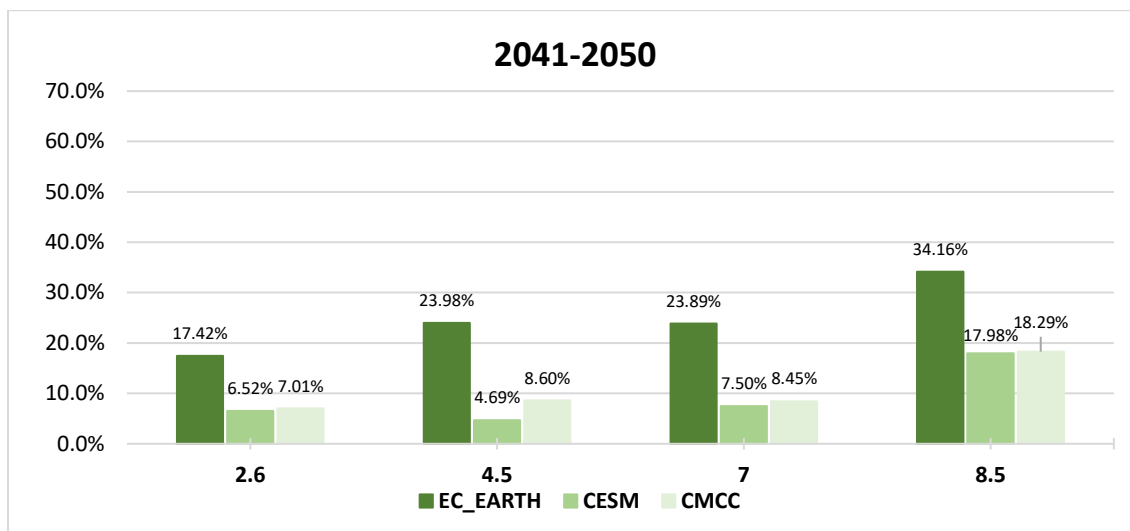


Grafico 6.6 Variazione della precipitazione cumulata annuale media a metà secolo rispetto al periodo 1973-1984 per il sottobacino di El Ekhsase.

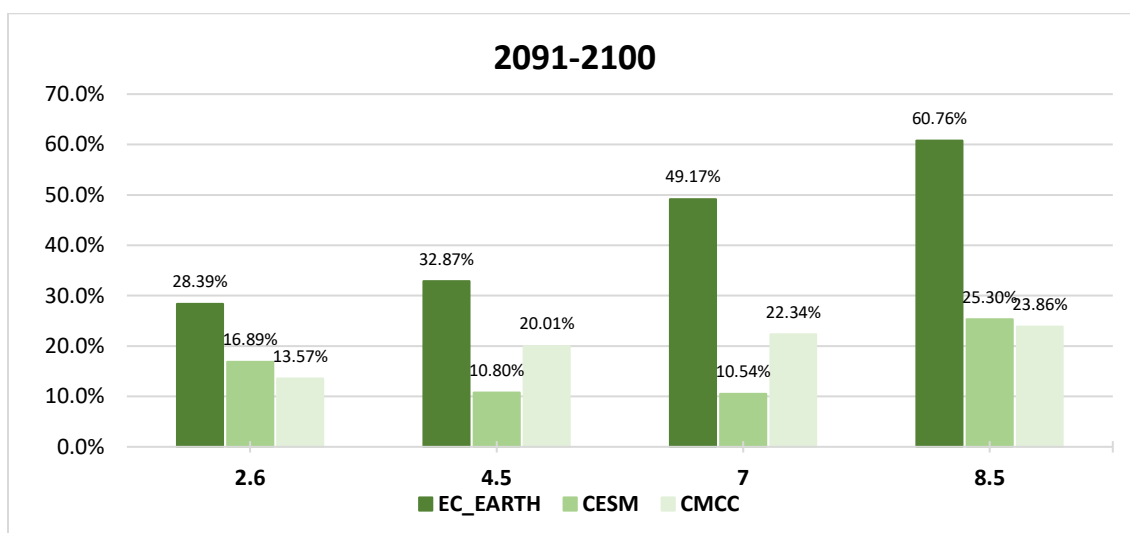


Grafico 6.7 Variazione della precipitazione cumulata annuale media a fine secolo rispetto al periodo 1973-1984 per il sottobacino di El Ekhsase.

Per condurre un'indagine più approfondita è stato quindi deciso di valutare la variazione media mensile fra gli stessi scenari per decennio, che vengono riportate nelle Tabelle 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6.:

## | SCENARI CLIMATICI

Tabella 6.3 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 2.6 dei modelli CESM, CMCC ed EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984

SSP 2.6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2021-2030	6.32%	-1.22%	6.58%	17.66%	10.77%	7.37%	6.59%	14.86%	18.33%	14.49%	-0.38%	18.57%
2031-2040	12.72%	0.50%	10.69%	16.91%	6.06%	7.38%	4.75%	2.17%	28.33%	7.43%	17.32%	30.32%
2041-2050	28.97%	17.43%	13.62%	9.59%	4.06%	11.00%	5.78%	1.95%	18.61%	15.69%	23.12%	34.73%
2051-2060	5.65%	9.58%	-0.99%	28.16%	1.78%	-5.87%	-3.11%	6.10%	18.02%	12.47%	17.98%	37.78%
2061-2070	13.06%	-0.81%	2.31%	9.04%	2.33%	8.15%	7.28%	12.96%	24.51%	17.22%	18.87%	28.05%
2071-2080	-2.38%	-3.99%	-8.71%	28.25%	3.12%	10.70%	6.62%	12.78%	28.46%	15.68%	11.02%	34.10%
2081-2090	15.69%	25.03%	19.72%	26.96%	12.83%	5.98%	3.05%	13.72%	24.69%	14.06%	6.61%	30.45%
2091-2100	27.17%	36.55%	9.24%	30.16%	6.98%	12.85%	13.78%	14.81%	37.44%	29.50%	18.57%	25.00%

Tabella 6.4 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 4.5 dei modelli CESM, CMCC ed EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984

SSP 4.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2021-2030	-7.96%	8.01%	1.72%	15.23%	4.52%	8.15%	-3.70%	3.88%	12.55%	12.43%	18.00%	24.17%
2031-2040	-14.59%	7.37%	0.82%	19.96%	-4.53%	3.17%	0.15%	4.09%	20.05%	3.59%	3.15%	21.81%
2041-2050	18.07%	4.68%	1.57%	34.59%	-0.06%	10.79%	7.75%	8.91%	22.86%	15.99%	10.84%	26.91%
2051-2060	25.13%	-3.76%	6.89%	13.50%	12.42%	3.42%	12.79%	15.58%	36.28%	29.42%	14.76%	22.19%
2061-2070	19.01%	5.61%	-4.90%	28.54%	-0.16%	3.01%	2.08%	7.40%	23.86%	13.76%	15.00%	44.11%
2071-2080	30.66%	-1.87%	4.62%	17.59%	3.49%	10.84%	5.19%	10.13%	28.70%	24.65%	13.25%	35.65%
2081-2090	29.80%	26.65%	-4.50%	24.34%	6.65%	11.34%	15.14%	13.35%	34.87%	31.66%	28.50%	21.77%
2091-2100	19.81%	26.73%	14.46%	27.28%	8.40%	20.42%	19.10%	16.11%	38.30%	24.02%	21.08%	22.81%

Tabella 6.5 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 7.0 dei modelli CESM, CMCC ed EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984

SSP 7.0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2021-2030	-2.08%	0.21%	6.41%	12.72%	6.14%	0.94%	7.42%	8.51%	9.43%	12.01%	11.03%	20.58%
2031-2040	-13.79%	-8.37%	3.55%	10.47%	4.57%	-2.75%	9.89%	5.96%	22.28%	17.20%	6.04%	10.83%
2041-2050	18.41%	13.83%	23.20%	18.57%	0.00%	10.08%	4.24%	10.46%	36.25%	16.33%	2.65%	19.88%
2051-2060	3.81%	9.10%	12.61%	17.25%	1.31%	4.77%	7.02%	19.39%	37.61%	18.62%	14.19%	30.89%
2061-2070	27.81%	29.66%	19.66%	11.27%	13.82%	18.77%	10.92%	16.84%	38.27%	40.71%	27.19%	30.59%
2071-2080	34.48%	19.13%	7.79%	18.89%	8.79%	13.22%	14.78%	22.59%	43.18%	39.60%	10.93%	34.83%
2081-2090	45.70%	35.32%	14.76%	36.03%	11.59%	24.13%	16.62%	24.01%	43.71%	39.43%	29.08%	48.10%
2091-2100	41.44%	24.18%	28.66%	37.17%	6.75%	11.40%	8.83%	29.15%	48.58%	54.70%	35.02%	54.38%

Tabella 6.6 Variazione percentuale della precipitazione cumulata media mensile sul bacino del Nilo, mediata per lo scenario 8.5 dei modelli CESM, CMCC ed EC-Earth, per i decenni indicati rispetto alla media del periodo 1973-1984

SSP 8.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2021-2030	-3.77%	-7.40%	-9.31%	7.47%	6.20%	-1.08%	1.12%	7.92%	19.18%	9.00%	7.54%	32.25%
2031-2040	-9.73%	11.27%	19.72%	16.82%	5.99%	10.31%	16.09%	12.64%	30.42%	24.06%	15.77%	18.42%
2041-2050	2.85%	-2.59%	13.73%	21.24%	8.35%	12.94%	21.42%	21.93%	45.01%	44.88%	19.50%	33.04%
2051-2060	30.80%	34.16%	17.33%	23.17%	-1.82%	17.20%	20.85%	22.94%	45.10%	35.39%	23.31%	49.17%
2061-2070	23.12%	25.43%	7.08%	32.34%	12.73%	21.93%	3.67%	16.29%	37.48%	34.15%	25.08%	50.34%
2071-2080	49.05%	39.82%	16.41%	28.92%	11.92%	15.36%	9.39%	19.59%	50.82%	44.82%	36.83%	51.59%
2081-2090	44.65%	14.35%	15.89%	40.08%	21.60%	15.55%	4.95%	16.40%	44.89%	44.16%	49.45%	70.90%
2091-2100	99.60%	45.93%	36.98%	28.83%	12.90%	23.23%	18.14%	29.66%	66.07%	67.42%	46.27%	95.77%

Da tali tabelle si può osservare come la variazione delle precipitazioni cumulate non sia effettivamente sempre positiva, sebbene la percentuale di valori in diminuzione sia minima rispetto alle altre. È interessante notare come il maggior aumento di precipitazione venga a prospettarsi nei mesi invernali, come dicembre o gennaio, piuttosto che in quelli tipici della stagione piovosa a clima equatoriale, ovvero nei periodi tra marzo-maggio e luglio-settembre.

Valutata però la copertura territoriale dal bacino in esame, non risulta poi così strano riscontrare un aumento nella cumulata complessiva annuale delle precipitazioni. L'area comprendente l'Alto Nilo, infatti, racchiude tutto il territorio a clima equatoriale, a partire dalla verdeggiante regione del lago Vittoria sino alla parte più meridionale del Sudan. Fatta questa premessa, è stato deciso quindi di indagare più approfonditamente, elaborando in primo luogo un esame delle precipitazioni intense, considerate come precipitazioni giornaliere con altezza di pioggia maggiore di 10 mm al giorno. Le precipitazioni intense sono state valutate sia negli anni di simulazione, 2021-2100 che nel periodo di controllo, 1973-2020. I risultati, che mostrano un chiaro aumento dei giorni con intensità elevata, vengono mostrati nei grafici 6.8, 6.9 e 6.10 riportati per ogni modello e per ogni scenario in esame.

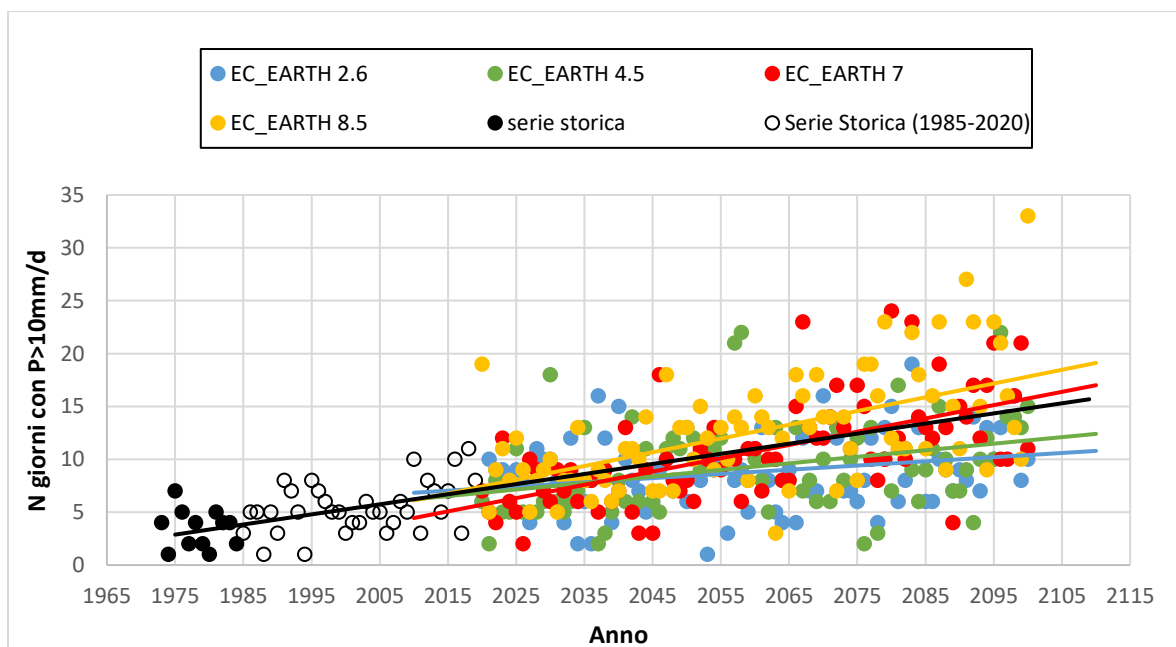


Grafico 6.8 Andamento del numero di giorni con  $P > 10$  nel periodo tra il 1973-2100, modello EC-Earth

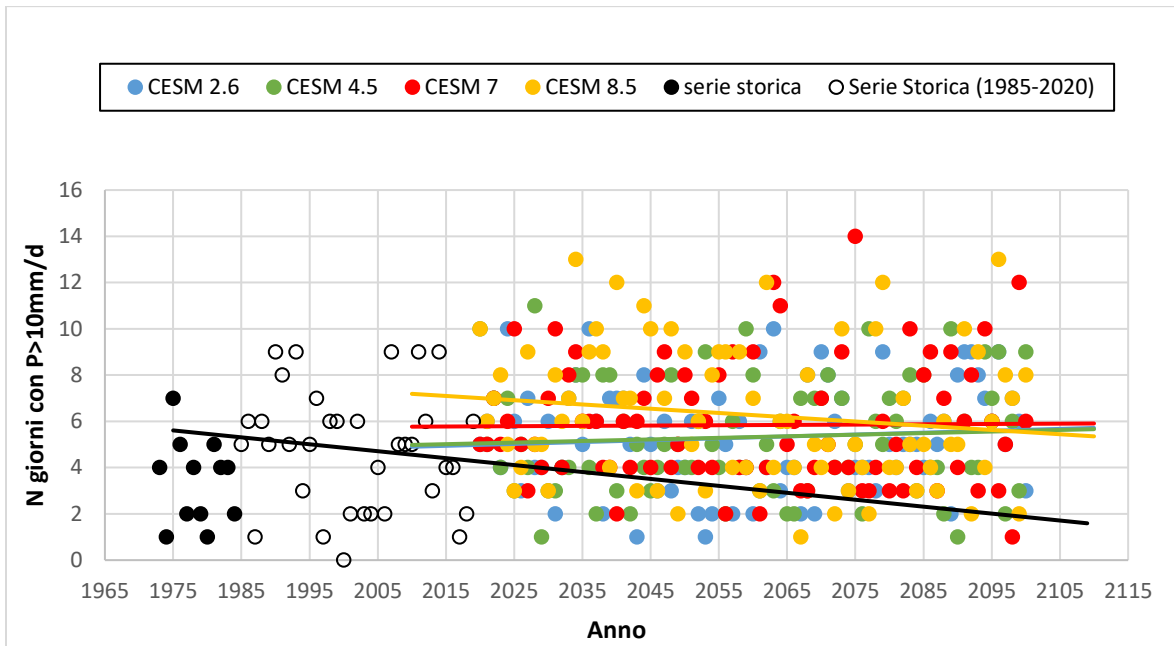


Grafico 6.9 Andamento del numero di giorni con  $P>10$  nel periodo tra il 1973-2100, modello CESM

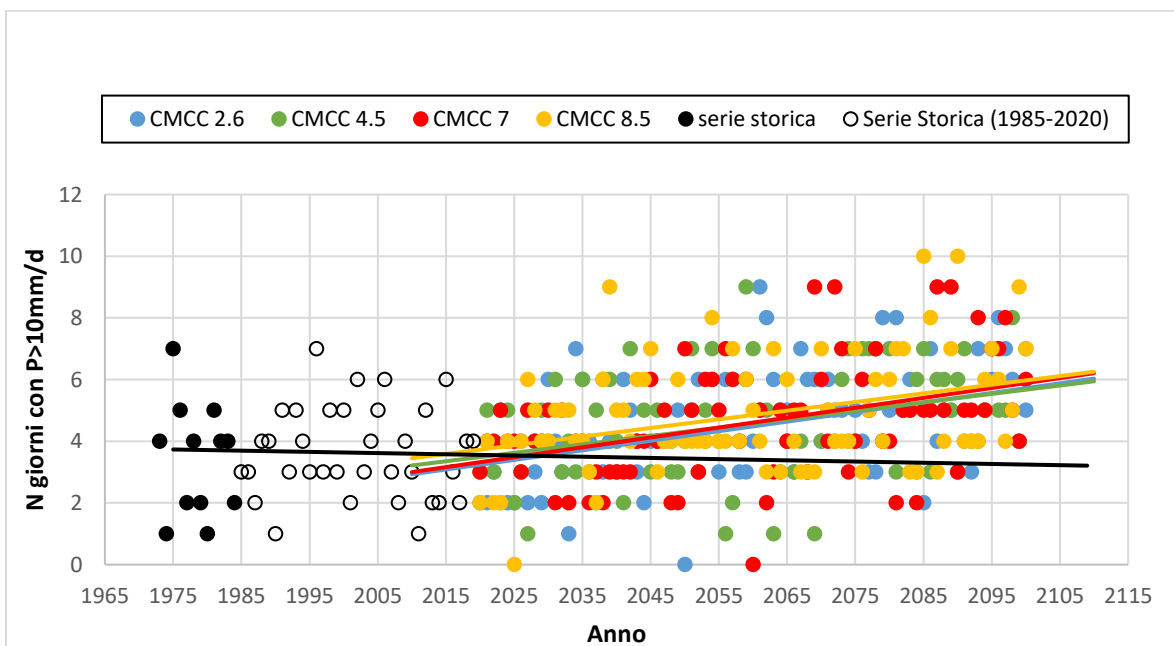


Grafico 6.10 Andamento del numero di giorni con  $P>10$  nel periodo tra il 1973-2100, modello CMCC

Una volta appurato che, i giorni di piogge intense, di fatto, presentino un trend in aumento rispetto allo storico è stato deciso di valutare dove questa tendenza crescente venga effettivamente a presentarsi. Per fare ciò, è stato estrapolato dai vari GCM il valore di precipitazione cumulata media giornaliera relativa a tre aree di riferimento, corrispondenti a tre diverse zone climatiche. Nello specifico, considerata l'elevata estensione, in termini di latitudine, che abbraccia l'intero corso del fiume Nilo, sono state individuate tre aree principali (fascia equatoriale, fascia

## | SCENARI CLIMATICI

del Sudan e fascia dell'Egitto), rappresentative di intervalli latitudinali caratterizzati da diversi comportamenti climatici. I valori del periodo temporale proiettato (2015-2100) sono stati poi rapportati ai valori relativi al periodo di controllo che varia per ogni modello considerato, nello specifico per il modello CESM consideriamo come periodo di controllo gli anni che vanno dal 1970-2014, per il CMCC dal 1975 al 2014 e per l'EC-Earth dal 1970 al 2014 e vengono di seguito riportati nelle Tabelle 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12.

Tabella 6.7 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 2.6 e 4.5, modello CESM, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014

Decenni	cesm 2.6						cesm 4.5					
	Pr			T			Pr			T		
	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto
2015-2024	11%	8%	-17%	0.50	0.99	1.10	6%	8%	5%	0.56	0.73	0.77
2025-2034	11%	4%	-7%	1.05	1.46	1.46	8%	1%	-13%	0.94	1.15	1.12
2035-2044	14%	9%	-24%	1.23	1.59	1.59	3%	-5%	-10%	1.34	1.58	1.56
2045-2054	17%	7%	-8%	1.45	1.81	1.88	14%	15%	-16%	1.62	1.90	1.93
2055-2064	9%	1%	-8%	1.55	1.75	1.63	8%	-1%	-20%	1.88	2.18	2.07
2065-2074	5%	5%	-12%	1.86	1.95	1.77	12%	-8%	-33%	2.39	2.56	2.43
2075-2084	13%	4%	-7%	1.70	1.81	1.76	9%	1%	0%	2.70	2.74	2.53
2085-2094	8%	-7%	-22%	1.77	1.69	1.54	19%	5%	1%	2.89	3.13	2.94
2095-2100	27%	18%	-32%	1.68	2.03	2.17	17%	24%	-2%	3.17	3.29	3.02

Tabella 6.8 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 7.0 e 8.5, modello CESM, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014

Decenni	cesm 7.0						cesm 8.5					
	Pr			T			Pr			T		
	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto
2015-2024	9%	7%	-5%	0.59	0.92	0.80	9%	8%	-6%	0.65	0.92	0.91
2025-2034	7%	7%	2%	0.74	0.99	1.08	12%	20%	9%	1.18	1.43	1.63
2035-2044	7%	7%	5%	1.36	1.70	1.61	7%	18%	-4%	1.60	2.05	2.17
2045-2054	7%	4%	-1%	1.79	2.09	1.95	18%	7%	9%	2.21	2.61	2.53
2055-2064	17%	16%	-13%	2.20	2.59	2.35	15%	13%	-18%	2.91	3.37	3.38
2065-2074	13%	7%	-20%	2.63	2.82	2.70	22%	14%	-27%	3.50	4.02	3.94
2075-2084	16%	13%	-3%	3.19	3.59	3.53	22%	7%	-37%	4.39	5.06	4.87
2085-2094	23%	20%	-12%	3.93	4.47	4.27	27%	23%	-3%	5.37	6.15	5.91
2095-2100	20%	7%	-17%	4.34	4.80	4.42	40%	23%	-12%	5.89	6.91	6.75



## | SCENARI CLIMATICI

Tabella 6.9 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 2.6 e 4.5, modello CMCC, rispetto al periodo di controllo dal 1975 al 2014

Decenni	cmcc 2.6						cmcc 4.5					
	Pr			T			Pr			T		
	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto
2015-2024	8%	34%	60%	0.41	0.58	1.03	6%	29%	75%	0.20	0.38	0.85
2025-2034	7%	9%	-4%	0.70	1.04	1.16	5%	6%	-5%	0.55	0.99	1.27
2035-2044	7%	7%	-8%	0.94	1.41	1.59	9%	-34%	16%	0.95	1.33	1.75
2045-2054	10%	16%	-5%	1.22	1.74	2.02	10%	29%	29%	1.09	1.57	2.25
2055-2064	12%	31%	12%	1.18	1.78	2.41	12%	40%	53%	1.35	1.92	2.74
2065-2074	15%	35%	36%	1.21	1.82	2.58	15%	41%	26%	1.64	2.27	3.07
2075-2084	15%	36%	30%	1.10	1.72	2.45	18%	38%	19%	1.97	2.80	3.63
2085-2094	16%	28%	20%	1.28	2.10	2.84	17%	57%	67%	1.92	2.54	3.73
2095-2100	15%	41%	34%	1.23	1.74	2.68	19%	46%	33%	2.22	2.86	4.09

Tabella 6.10 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 7.0 e 8.5, modello CMCC, rispetto al periodo di controllo dal 1975 al 2014

Decenni	cmcc 7.0						cmcc 8.5					
	Pr			T			Pr			T		
	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto
2015-2024	5%	6%	-6%	0.36	0.69	0.87	1%	-3%	-21%	0.56	0.86	0.88
2025-2034	8%	14%	25%	0.47	0.95	0.87	6%	21%	16%	0.61	0.70	1.04
2035-2044	10%	29%	32%	0.78	1.32	1.90	12%	30%	28%	1.23	1.67	2.22
2045-2054	8%	39%	40%	1.17	1.65	2.47	14%	44%	62%	1.28	1.78	2.75
2055-2064	12%	47%	56%	1.40	1.95	2.96	15%	39%	6%	2.04	2.80	3.67
2065-2074	18%	64%	114%	1.59	2.25	3.42	18%	39%	38%	2.46	3.64	4.60
2075-2084	18%	52%	101%	2.18	2.91	3.91	17%	50%	70%	3.01	4.07	5.25
2085-2094	23%	77%	180%	2.42	3.21	4.41	23%	73%	141%	3.49	4.73	6.21
2095-2100	25%	57%	52%	2.82	4.06	5.20	27%	67%	68%	4.14	5.60	6.88

Tabella 6.11 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 2.6 e 4.5, modello EC-Earth, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014

Decenni	ec-earth 2.6						ec-earth 4.5					
	Pr			T			Pr			T		
	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto
2015-2024	8%	34%	9%	0.44	0.97	1.25	4%	32%	21%	0.67	1.25	1.54
2025-2034	7%	39%	-9%	0.70	1.46	1.85	7%	45%	22%	0.82	1.54	1.93
2035-2044	6%	49%	8%	1.09	1.61	2.02	8%	35%	-5%	0.91	1.56	1.88
2045-2054	10%	25%	15%	1.12	1.80	2.11	10%	49%	22%	1.17	1.88	2.24
2055-2064	8%	28%	7%	1.08	1.64	1.84	11%	38%	-11%	1.65	2.57	2.73
2065-2074	5%	36%	6%	1.30	1.85	2.07	8%	33%	-8%	1.98	2.90	3.01
2075-2084	11%	39%	-3%	1.08	1.86	2.19	5%	24%	-42%	2.08	2.89	2.97
2085-2094	6%	19%	-11%	1.25	1.78	1.91	10%	49%	17%	2.31	3.13	3.40
2095-2100	14%	50%	54%	1.07	1.83	2.08	17%	74%	22%	2.09	3.33	3.74

Tabella 6.12 Variazioni percentuale di precipitazione cumulata media giornaliera e variazione di temperatura media giornaliera relativa alle 3 aree climatiche (equatoriale, Sudan ed Egitto) per gli scenari SSP 7.0 e 8.5, modello EC-Earth, rispetto al periodo di controllo dal 1970 al 2014

Decenni	ec_earth 7.0						ec_earth 8.5					
	Pr			T			Pr			T		
	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto	Equatoriale	Sudan	Egitto
2015-2024	7%	19%	-9%	0.48	1.00	1.30	7%	38%	-7%	0.43	0.99	1.35
2025-2034	4%	25%	-19%	0.89	1.57	1.88	8%	36%	4%	0.57	1.35	1.72
2035-2044	11%	40%	-19%	0.91	1.69	2.06	10%	64%	5%	1.00	1.90	2.47
2045-2054	12%	57%	-11%	1.40	2.37	2.75	13%	63%	-18%	1.48	2.71	3.13
2055-2064	11%	72%	3%	1.81	2.87	3.39	15%	71%	12%	1.94	3.36	3.69
2065-2074	18%	71%	-12%	2.19	3.43	3.81	17%	85%	-6%	2.45	4.04	4.57
2075-2084	19%	84%	18%	2.66	4.28	4.72	22%	101%	3%	2.92	4.70	5.43
2085-2094	22%	103%	26%	3.03	4.60	5.32	24%	135%	10%	3.65	5.71	6.53
2095-2100	22%	108%	-8%	3.30	5.11	5.83	32%	156%	20%	4.38	6.68	7.50

Le tabelle mostrano chiaramente come in ogni scenario simulato per ogni modello considerato il principale aumento di precipitazione venga a riscontrarsi nell'area a fascia equatoriale, dove, anche una variazione relativamente piccola ha in realtà un grande peso se guardata a scala dell'intero bacino. Nella fascia del Sudan ed in quella dell'Egitto le variazioni sono pressoché negative in tutti gli scenari dei modelli, ad eccezione del modello CMCC dove si riscontra in realtà un andamento inverso. Bisogna però considerare che, in termini di valori assoluti, anche una percentuale indicativa di un grande aumento di precipitazione nelle aree corrispondenti alla fascia a clima sahariano (che ha una media di precipitazione pari a circa 60 mm all'anno), corrisponde in realtà ad un minimo contributo rispetto al totale.

### 6.7.3 Portata

Il downscaling effettuato sulle serie di temperatura e precipitazione permette poi di ricostruire, mediante l'utilizzo del modello idrologico Poli-Hydro, l'andamento delle portate future. Fornendo in input i dati giornalieri ottenuti per le due variabili, il modello, attraverso il bilancio idrologico ed il flow routing, simula gli output di portata per il periodo di proiezione scelto (2021-2100), sotto l'ipotesi che i parametri calibrati sul periodo passato rimangano tali per il futuro. Gli output di portata verranno calcolati per tutti i sottobacini considerati per la calibrazione del modello, ovvero quelli con sezione di chiusura corrispondente alla posizione degli idrometri, riportata nel Capitolo 3. Nel seguente paragrafo verrà riportato solamente l'analisi corrispondente all'intero bacino del Nilo, ovvero quello con stazione di chiusura in prossimità dell'idrometro El Ekhsase.

In Tabella 6.13, vengono riportate le variazioni di portata in ingresso per tutti i dodici scenari; le variazioni sono state stimate per ogni decennio del periodo di interesse e calcolate come media delle portate annuali di quel decennio rispetto alla media delle portate annuali sul periodo di controllo, 1973-1984.

Tabella 6.13 Variazioni della portata media annuale in ingresso rispetto alla stazione di El Eksase per ogni scenario climatico per ogni modello per ogni decennio del XXI secolo rispetto al periodo 1973-1984.

Decenni	ec-earth2.6	ec-earth4.5	ec-earth7	ec-earth8.5	cesm2.6	cesm4.5	cesm7	cesm8.5	cmcc2.6	cmcc4.5	cmcc7	cmcc8.5
2021-2030	31.17%	14.85%	24.90%	32.86%	4.41%	7.97%	4.63%	8.93%	2.66%	-7.95%	-4.75%	-11.80%
2031-2040	43.09%	26.12%	49.55%	39.08%	15.28%	3.96%	4.49%	29.29%	-1.21%	-8.50%	-8.20%	3.05%
2041-2050	43.46%	73.85%	45.37%	109.04%	5.14%	3.16%	10.79%	24.01%	-0.97%	0.04%	1.48%	20.82%
2051-2060	58.93%	72.73%	64.93%	128.22%	2.90%	11.96%	16.01%	38.85%	-4.49%	5.82%	1.82%	8.59%
2061-2070	52.26%	40.81%	106.90%	139.44%	7.36%	6.04%	13.21%	14.05%	19.07%	3.06%	6.23%	4.35%
2071-2080	71.89%	68.21%	162.37%	175.01%	4.77%	6.62%	10.39%	28.37%	9.11%	6.94%	11.97%	6.30%
2081-2090	91.34%	112.12%	173.76%	169.25%	8.79%	8.14%	14.94%	18.45%	7.92%	16.32%	12.26%	19.04%
2091-2100	121.20%	131.79%	211.12%	246.22%	22.61%	12.41%	12.05%	37.30%	8.21%	19.10%	20.13%	19.45%

Nel complesso, si osserva una previsione di aumento di portata negli ultimi decenni in tutti gli scenari osservati. Il modello EC\_Earth non prevede neanche un decennio di diminuzione di flusso e presenta addirittura un aumento massimo del 246% (EC\_Earth, SSP 8.5); mentre, il modello CMCC presume un'iniziale variazione decennale in negativo per tutti gli scenari, con un minimo di -11.8% (CMCC, SSP 8.5). In generale, invece, il modello CESM non presenta particolari elementi significativi. Di seguito vengono riportati i grafici a barre 6.11 e 6.12, indicanti le variazioni di portata per metà e fine secolo per tutti i dodici scenari valutati, i grafici mostrano in modo abbastanza la netta differenza evidenziata dal modello EC\_Earth rispetto agli altri.

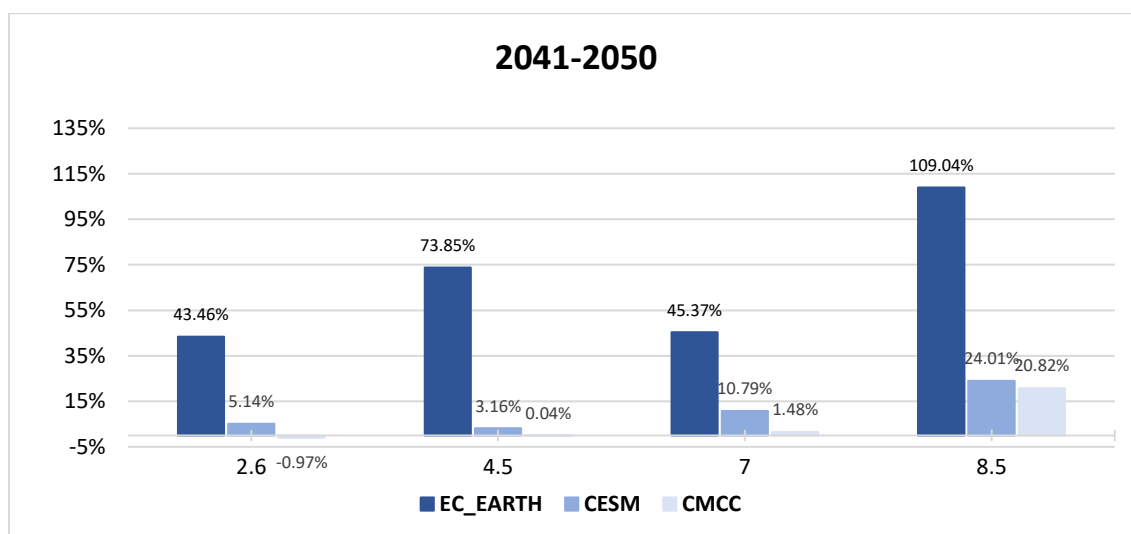


Grafico 6.11 Variazioni percentuali della portata media annuale a metà (2041-2050) secolo per ogni modello per ogni scenario presso l'idrometro di El Ekhsase

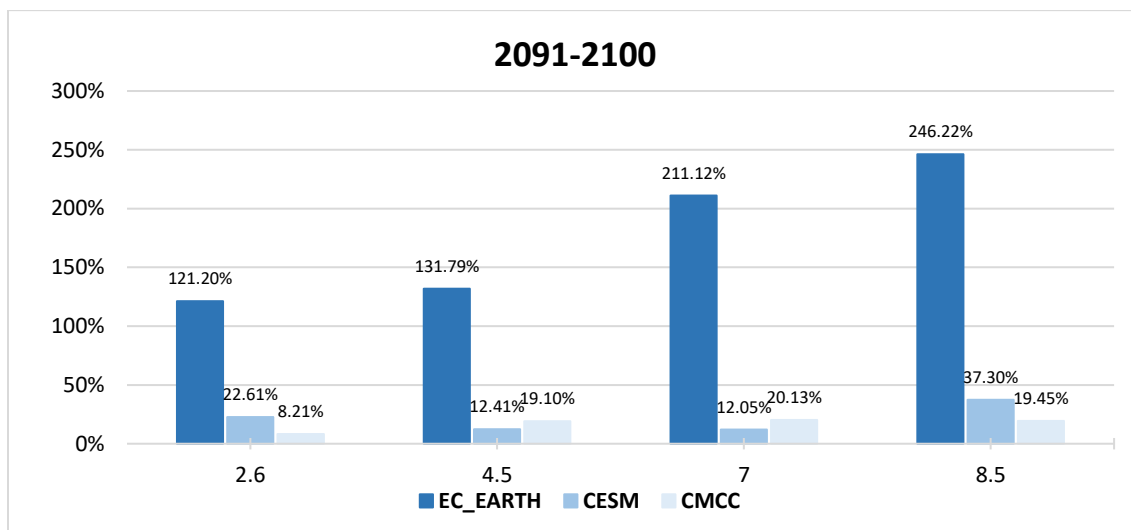


Grafico 6.12 Variazioni percentuali della portata media annuale a fine (2091-2100) secolo per ogni modello per ogni scenario presso l'idrometro di El Ekhsase

Nei Grafici 6.13, 6.14 e 6.15 sono invece riportati gli andamenti ed il rispettivo trend delle portate medie annuali per ogni scenario, confrontate con le medie annuali del periodo storico.

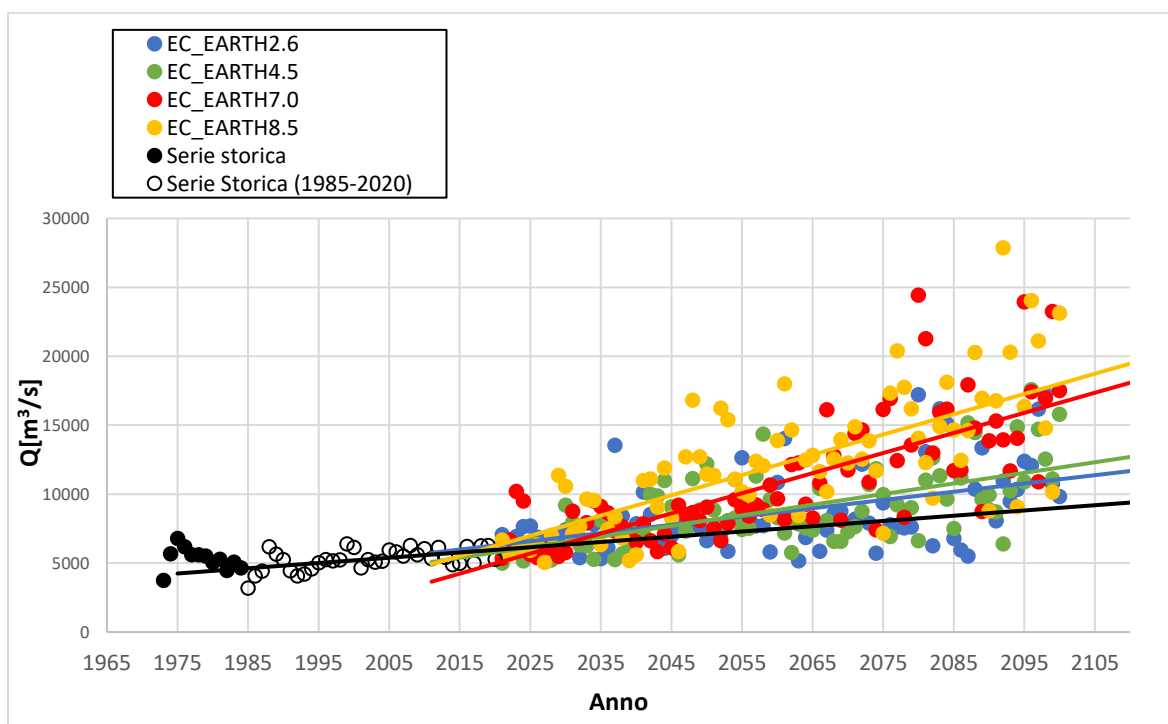


Grafico 6.13 Andamento del valore medio annuo di portata, rispetto alla stazione di El Ekhsase dal 1973 al 2100, storico (1973-2020) e modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

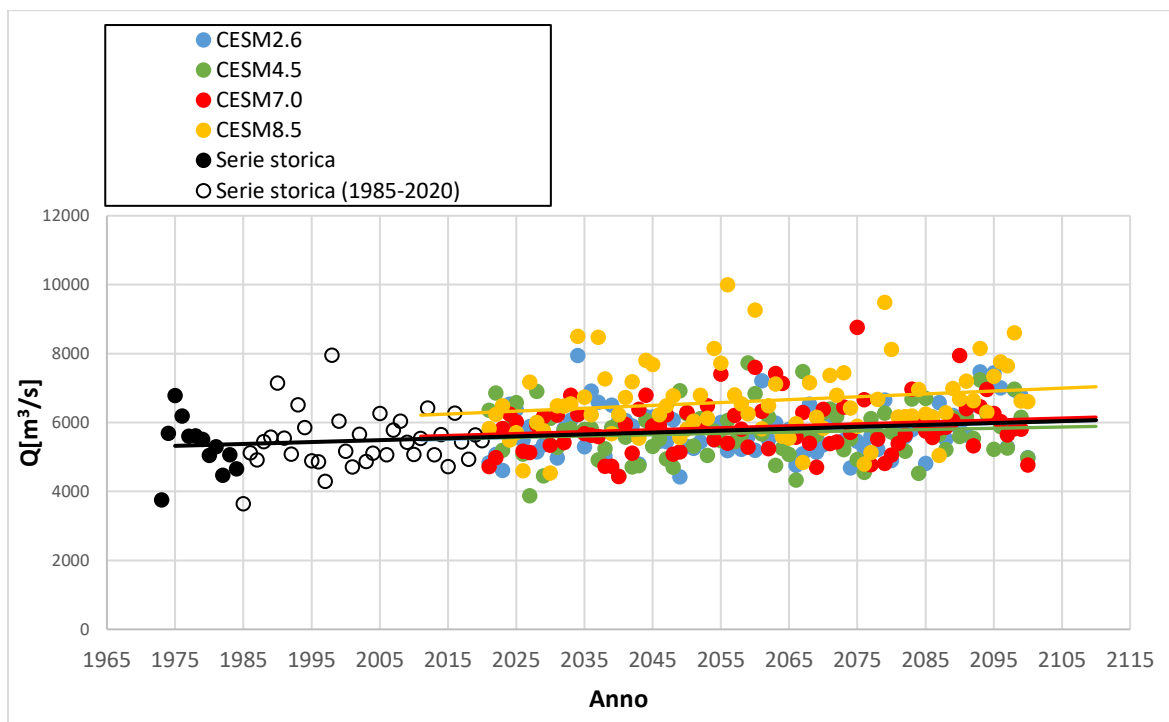


Grafico 6.14 Andamento del valore medio annuo di portata, rispetto alla stazione di El Ekhsase dal 1973 al 2100, storico (1973-2020) e modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

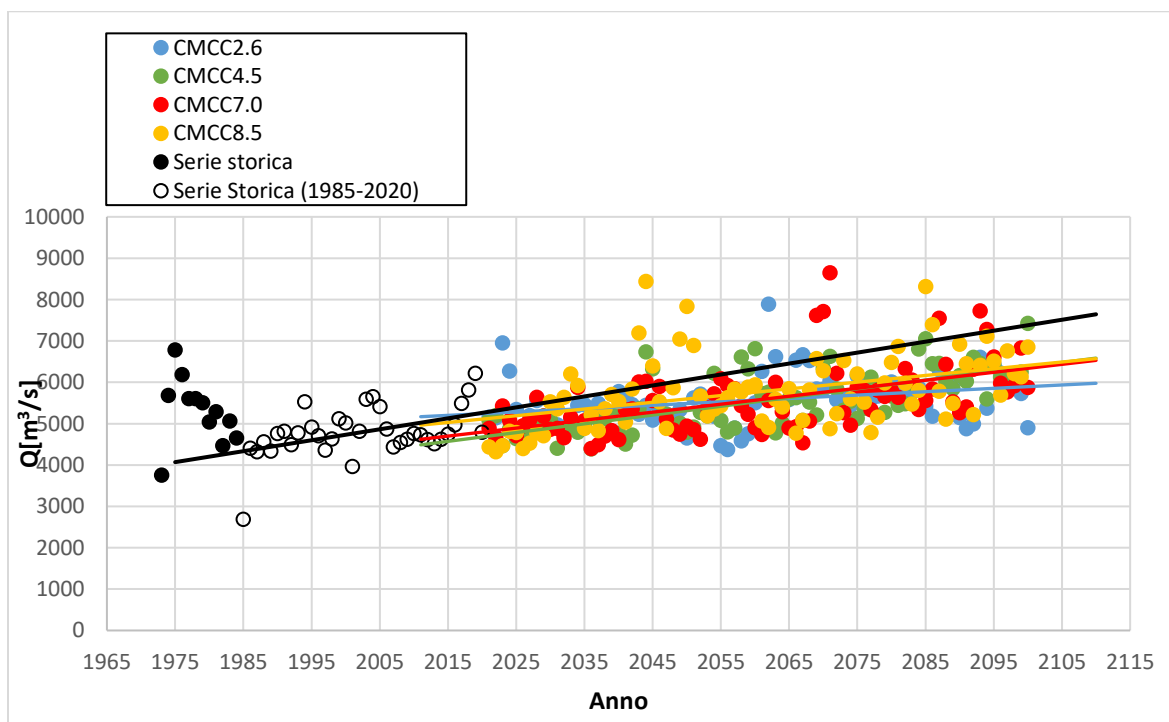


Grafico 6.15 Andamento del valore medio annuo di portata, rispetto alla stazione di El Ekhsase dal 1973 al 2100, storico (1973-2020) e modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

L'andamento delle portate individuato per ogni scenario mostra una tendenza di crescita, cosa che risulta coerente anche con il sensibile aumento delle precipitazioni rilevato e studiato nel paragrafo precedente.

### 6.7.4 Livello idrometrico

Per poter rapportare i vari cambiamenti nel flusso del Nilo sia a livello passato che a livello futuro è stato necessario stimare, a partire dai valori di portata la variazione dei livelli dell'acqua lungo il fiume. Per definizione, la portata di un fiume non è altro che il volume di un fluido che attraversa una data area, o sezione nell'unità di tempo; quindi, conoscendo le caratteristiche della sezione del fiume in cui la stazione di misurazione è ubicata è possibile risalire all'altezza del livello idrometrico presente. In mancanza di informazioni più precise è stato utilizzato il lavoro di Sherine S. Ismail e Magdy G. Samuel, [76], per ricostruire le variazioni di livello d'acqua nella sezione corrispondente all'idrometro di Assiut, il quale suggerisce come scala delle portate una scala lineare con equazione:

$$y = 0.0232x + 43.391$$

[6.4]

Dove:

- y: livello idrico alla sezione [m]
- x: portata affluente alla sezione [milioni di m<sup>3</sup> al giorno]

I livelli ricavati con tale operazione sono ovviamente da ritenersi fittizi, in quanto, non c'è la possibilità di rapportarli con l'altezza massima di livello che può essere raggiunta nella sezione di Assiut. Nello specifico sono stati attribuiti i valori di massima e minima portata a livello annuale il massimo e minimo livello raggiunto dal Nilo in tale sezione, questa operazione è stata svolta sia per l'intervallo temporale futuro (2021-2100), che per quello storico di controllo (1973-1984). I valori ottenuti sono riportati di seguito nelle tabelle 6.14, 6.15, 6.16 e 6.17, a scala annuale per l'intervallo storico ed a scala decennale per l'intervallo di valori simulato.

*Tabella 6.14 Altezza massima e minima raggiunta dal Nilo, per quell'anno nella sezione di Assiut*

Anno	Hmin [m]	Hmax [m]
1973	43.41	64.67
1974	45.61	75.16
1975	45.38	79.82
1976	45.60	69.76
1977	45.52	70.08
1978	45.81	66.63
1979	45.82	66.66
1980	45.44	65.41
1981	45.69	65.83
1982	45.37	61.74
1983	45.37	85.62
1984	45.40	62.36

Tabella 6.15 Altezza massima e minima [m] raggiunta dalle acque del Nilo, nella sezione di Assiut per i decenni del XXI secolo, modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

Decenni	EC_EARTH							
	2.6		4.5		7		8.5	
	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>
2021-2030	45.21	90.95	44.93	100.93	45.08	100.69	45.10	102.06
2031-2040	45.31	70.76	45.23	68.53	45.35	78.54	45.37	67.71
2041-2050	45.53	97.85	45.63	107.29	45.39	101.90	45.70	165.66
2051-2060	45.21	111.88	45.43	137.62	45.51	109.20	45.50	153.78
2061-2070	45.18	130.69	45.27	98.64	45.84	135.33	45.94	152.67
2071-2080	45.51	155.58	45.30	115.52	45.57	191.97	46.34	160.61
2081-2090	45.26	133.39	45.65	135.91	46.50	152.33	45.86	174.96
2091-2100	45.68	136.38	45.31	162.33	46.18	186.68	45.94	211.74

Tabella 6.16 Altezza massima e minima [m] raggiunta dalle acque del Nilo, nella sezione di Assiut per i decenni del XXI secolo, modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

Decenni	CESM							
	2.6		4.5		7		8.5	
	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>
2021-2030	45.17	76.58	45.05	83.21	45.18	75.00	45.43	87.98
2031-2040	45.28	64.81	45.16	62.88	45.35	64.15	45.34	67.82
2041-2050	45.12	76.07	45.32	79.97	45.15	77.30	45.51	82.25
2051-2060	45.40	79.05	45.33	81.40	45.40	83.23	45.52	93.01
2061-2070	45.28	81.83	45.22	79.69	45.19	85.25	45.40	85.47
2071-2080	45.16	81.08	45.15	83.59	45.16	94.41	45.18	89.69
2081-2090	45.45	75.35	45.23	81.15	45.40	91.69	45.39	81.03
2091-2100	45.29	96.27	45.36	77.12	45.49	77.49	45.82	88.27

Tabella 6.17 Altezza massima e minima [m] raggiunta dalle acque del Nilo, nella sezione di Assiut per i decenni del XXI secolo, modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

Decenni	CMCC							
	2.6		4.5		7		8.5	
	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>	H <sub>Min</sub>	H <sub>Max</sub>
2021-2030	45.31	80.05	45.04	70.27	45.19	75.72	45.04	71.47
2031-2040	45.23	64.50	45.23	62.72	45.11	63.21	45.30	66.39
2041-2050	45.16	80.14	45.20	81.17	45.17	83.59	45.14	98.37
2051-2060	44.97	77.77	45.30	81.33	45.25	75.78	45.43	80.97
2061-2070	45.30	88.71	45.31	73.61	45.28	84.75	45.40	83.33
2071-2080	45.45	77.49	45.23	76.71	45.44	98.08	45.28	79.22
2081-2090	45.29	82.33	45.35	82.39	45.50	92.65	45.44	84.51
2091-2100	45.19	91.65	45.42	89.59	45.74	87.79	45.50	90.88

Coerentemente con quanto riportato per l'analisi delle portate, si osserva un aumento del livello dell'acqua nel corso dei decenni futuri per ognuno dei dodici scenari studiati, in particolare per il modello EC\_Earth SSP 8.5 il cui massimo, di 211.74 metri è atteso nel decennio 2091-2100. Di particolare interesse è il fatto che la media dell'altezza minima dell'acqua degli scenari futuri non si discosti di molto da quella presente nel periodo di controllo, infatti, in quasi tutti gli scenari si attesta attorno ai 45 metri, come per lo storico. L'altezza massima media nei modelli CESM e CMCC passa da valori di circa 78-80 metri negli scenari SSP 2.6, 4.5 a valori di 80-85 metri negli scenari SSP 7.0 e 8.5. Per il modello EC\_Earth invece l'altezza media si attestano attorno ai 115 metri per SSP 2.6 e 4.5, 132 metri per SSP 7.0 e 148 metri per lo scenario SSP 8.5 Tabella 6.18.

Tabella 6.18 Confronto dell'altezza media minima e massima dei livelli di piena del Nilo per la sezione di Assiut, relativa al periodo di controllo 1973-1984, al periodo di validazione 1985-2020 (EC-Earth, CESM, CMCC) e al periodo di proiezione 2021-2100 (per tutti gli scenari e tutti i modelli)

			Hmin [m]	Hmax [m]
<b>Storico</b>		<b>1973-1984</b>	45.55	69.91
<b>Storico</b>	ec_earth	<b>1985-2020</b>	43.39	85.46
	cesm		43.39	85.40
	cmcc		43.39	77.05
<b>SSP 2.6</b>	ec_earth	<b>2021-2100</b>	45.36	115.93
	cesm		45.27	78.88
	cmcc		45.24	80.33
<b>SSP 4.5</b>	ec_earth		45.34	115.85
	cesm		45.23	78.63
	cmcc		45.26	77.22
<b>SSP 7.0</b>	ec_earth		45.68	132.08
	cesm		45.29	81.07
	cmcc		45.33	82.70
<b>SSP 8.5</b>	ec_earth	45.72	148.65	
	cesm	45.45	84.44	
	cmcc	45.32	81.89	

### 6.7.5 Elaborazione dati storici Toussoun

In seguito alla costruzione del Nilometro sull'isola di Roda al Cairo nel 715 d.C., è possibile avere a disposizione le letture ufficiali del livello del Nilo fino agli inizi del XX secolo. Tali letture vengono riportate e catalogate in formato cartaceo da Omar Toussoun nel libro *Mémoire sur l'Histoire du Nil* [43] e forniscono informazioni in merito al massimo e minimo livello di piena del Nilo su scala annuale. Per effettuare una prima analisi sono stati inizialmente individuati anni o periodi decennali



storicamente significativi, (930-940, 941-951, 1180-1209, 1250-1283, 1330-1350, 1405-1415, 1600-1610, 1870-1880) in cui analizzare l'andamento del livello di piena. I dati a disposizione però, sono carenti di informazioni dettagliate circa la dimensione della sezione di misura del Cairo; in mancanza di ciò non è stato possibile rapportare i livelli presentati ad un valore di portata transitante nell'alveo. Da un primo riscontro non è emerso un particolare andamento dei valori di piena del Nilo nei periodi storicamente individuati come periodi di particolare siccità o di particolari intensità fluviale. Come ben mostrato nei grafici 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22 i quali figurano l'andamento del livello di piena massimo e minimo del fiume negli intervalli prima citati, si osserva una tendenza piuttosto lineare del livello, senza particolari oscillazioni. Interessante è il fatto che, sebbene i minimi livelli di piena rimangano pressappoco costanti attorno ad un valore medio di 11 metri nel corso dei secoli, i valori dei massimi tendono ad aumentare, passando da una prima media di 17 metri ad inizio millennio, ad una di circa 20 metri a fine del 1800.

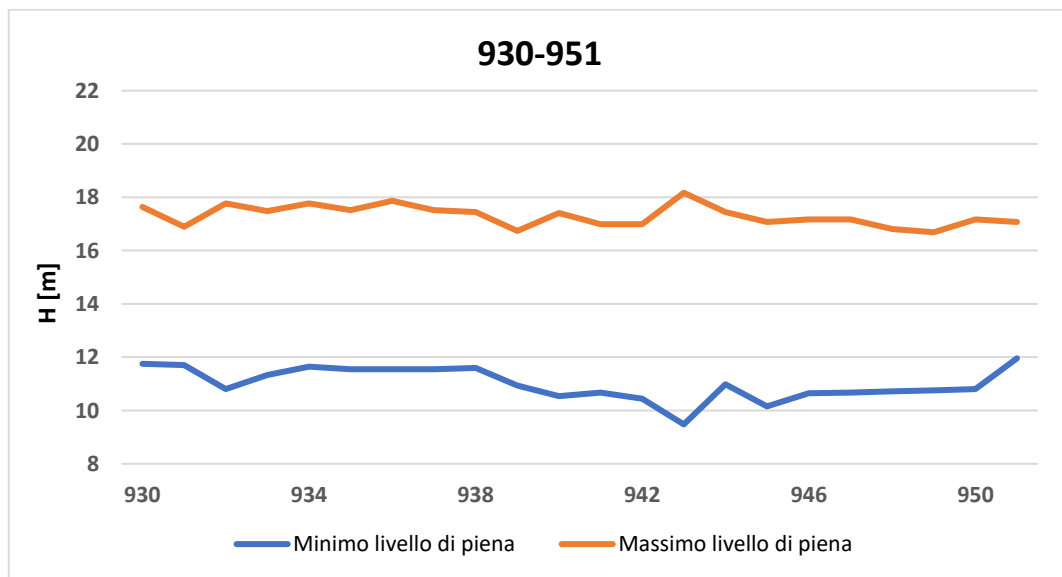


Grafico 6.16 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 930-951.

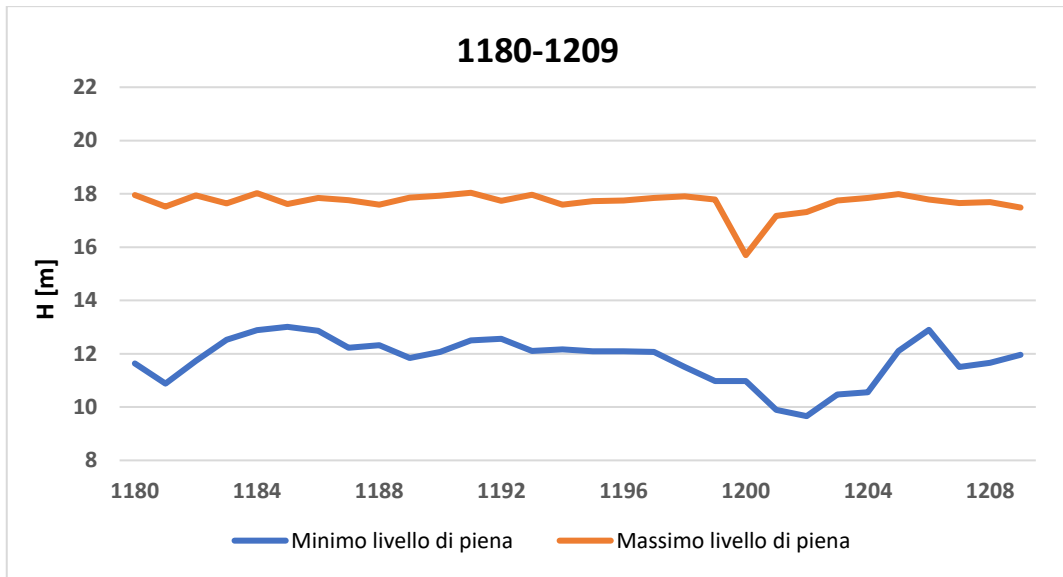


Grafico 6.17 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1180-1209.

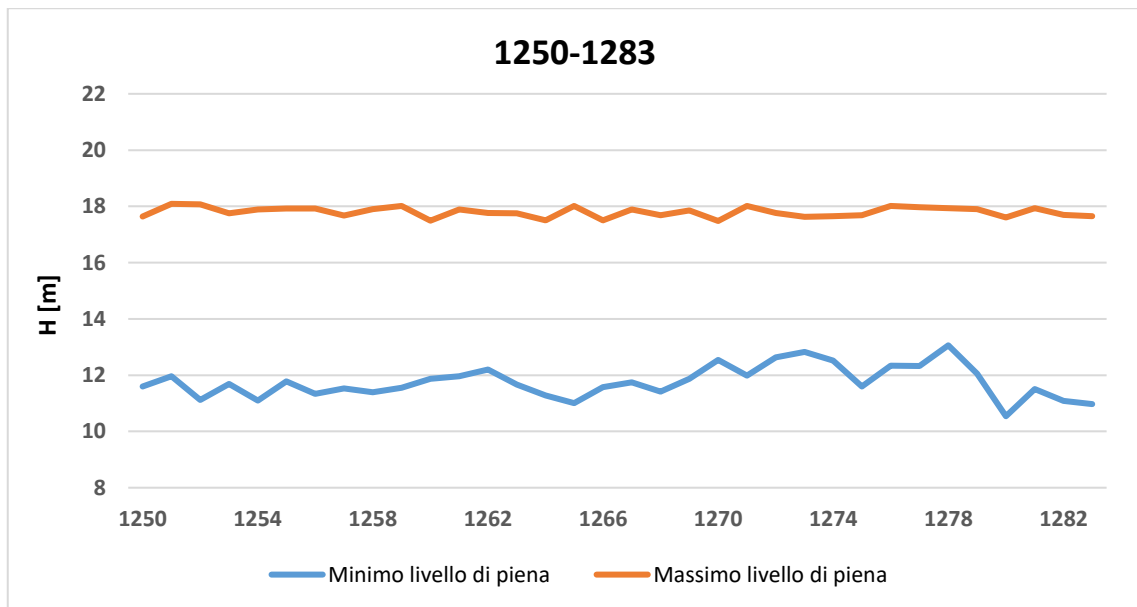


Grafico 6.18 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1250-1283

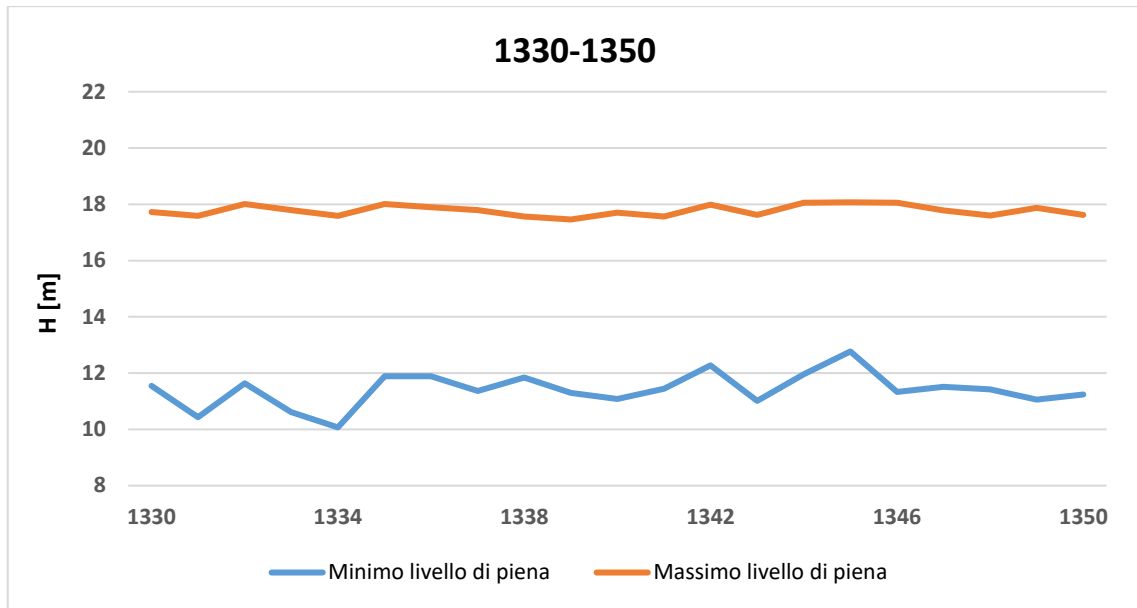


Grafico 6.19 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1330-1350

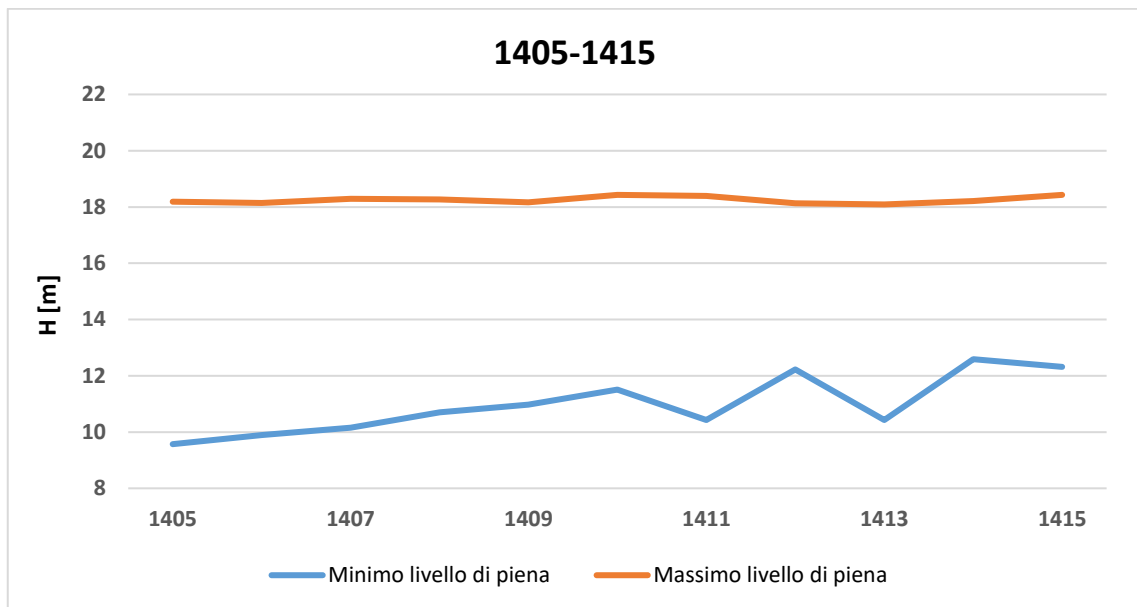


Grafico 6.20 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1405-1415

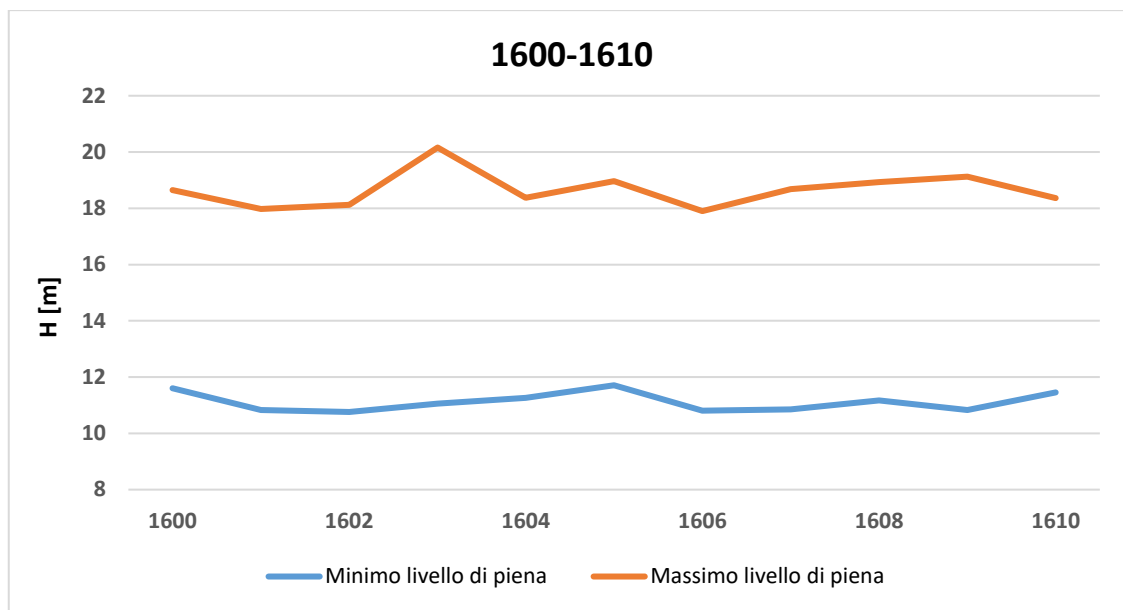


Grafico 6.21 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1600-1610

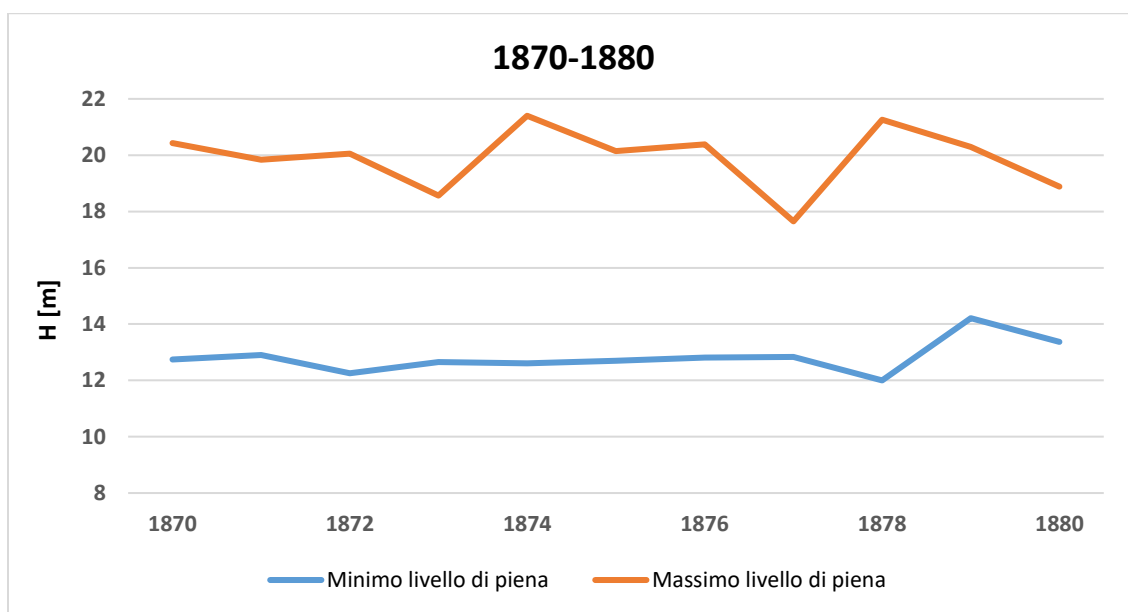


Grafico 6.22 Andamento del livello di piena massimo e minimo del Nilo, nel Nilometro di Roda per l'intervallo 1870-1880

Sebbene il valore dell'altezza massima di pieni aumenti di solo 3 metri nella scala del Nilometro, per poter avere un quadro più chiaro di quanto questa variazione abbia in realtà influito sull'idrologia complessiva del Nilo, è necessario tentare di risalire ad una prima valutazione sulla geometria della sezione considerata. Questo perché la variazione di flusso, in termini volumetrici, è fortemente dipendente da quest'ultima. Infatti, piccole oscillazioni di livello, su una sezione tipica delle piane alluvionali del Nilo comporta in realtà un grande aumento del valore di portata idrica,

provocando in passato le famose inondazioni che irrigavano i terreni ai lati del fiume e che hanno permesso la nascita dell'imponente civiltà faraonica.

A conferma di questo, lo studio di Fathalla M. El-Nahas [77] dimostra infatti che, al Cairo, la stratigrafia dei depositi sotto il letto del fiume è costituita da diverse centinaia di metri di strati alluvionali e diluviali recenti, ricoperti da argilla plastica pliocenica molto rigida che poggia sul calcare marino dell'Eocene superiore. Si delinea quindi una geometria delle sezioni tipica di quelle delle piane alluvionali, con argini molto estesi, riportata in figura 6.2.

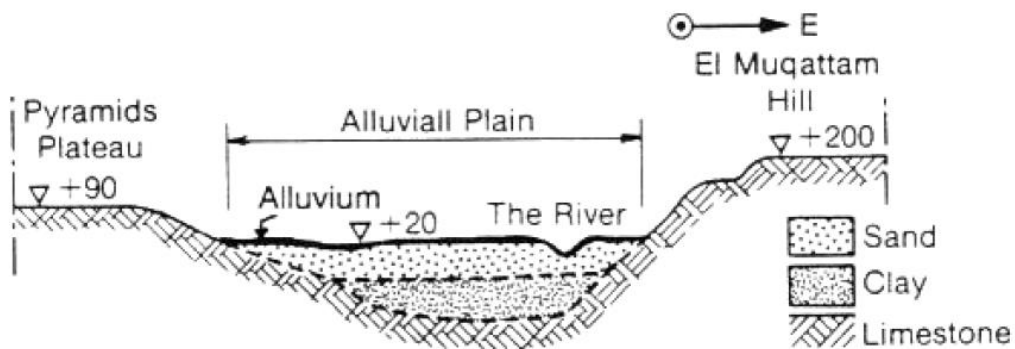


Figura 6.2 Sezione trasversale della Valle del Nilo nella regione del Grande Cairo (El-Sohby e Mazen, 1985)

## 7 Discussione

### 7.1 Confronto qualitativo tra proiezioni e passato

Il presente lavoro di analisi premette di fornire le prime basi per un'indagine ulteriore del passato regime idrologico del Nilo.

Una volta esaminati i dati storici forniti da Toussoun, nel capitolo 6, è stato eseguito un preliminare confronto qualitativo tra quest'ultimi e i valori ricavati dalle proiezioni climatiche future. Non avendo purtroppo a disposizione valori mensili o giornalieri delle variazioni del corso fluviale nel passato è stato limitato il confronto ai soli valori di massimo e minimo livello di piena del Nilo su scala annuale. Le registrazioni sulle fluttuazioni della portata delle inondazioni del Nilo durante il periodo storico selezionato, infatti, venivano prese due volte l'anno, una quando il Nilo era al suo punto più basso e l'altra quando il fiume raggiungeva il suo apice. Per poter eseguire un confronto il più corretto possibile sarebbero necessari ulteriori informazioni riguardanti la variazione del fondo del canale del Nilo lungo il corso dei secoli, causato dal continuo accumulo di sabbia e limo, la corretta dimensione geometrica della sezione di misura e una stima delle periodicità alluvionali del Nilo durante il corso dell'anno. Le fluttuazioni misurate sul Nilometro di Roda, infatti, hanno una stretta dipendenza dalla durata, magnitudo ma soprattutto dalla frequenza di accadimento degli eventi alluvionali. Una prima stima fornita da [61] afferma che la percentuale di inondazioni estremamente alte e basse è diminuita progressivamente dal 20% al 14% dal 930 d.C. al 1350 d.C. La durata delle inondazioni in passato era di vitale importanza; infatti, episodi di piene eccessivamente basse o alte o di inondazioni ritardate influenzavano il benessere della vita ed il fiorire della civiltà.

Se per la stima delle frequenze di alluvioni passate è necessaria un'ulteriore indagine, anche mediante l'utilizzo di modelli paleoclimatici, non si può dire lo stesso per la valutazione delle piene individuate nell'arco temporale simulato 2021-2100. I dati esaminati, infatti, riportano una tendenza in aumento della portata fluviale in termini di valori assoluti; per valutare se questa tendenza di crescita venga a manifestarsi non solo in giorni sporadici, ma comporti anche un aumento nella

## | DISCUSSIONE

frequenza di inondazione, è stata valutata la curva di durata delle portate per tutti i dodici scenari simulati.

I valori della curva di durata sono stati mediati per gli otto decenni compresi dal 2021 al 2100, per tutti i dodici scenari e successivamente, ciascuno degli scenari è stato confrontato con l'andamento ricavato dalla curva di durata media eseguita per il periodo di controllo 1973-1984. I grafici 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 e 7.6 riportati di seguito, che portano a titolo d'esempio i decenni di metà e fine secolo mostrano un aumento non solo nel valore massimo di portata, in particolare nel modello EC-Earth, ma anche un aumento nel numero di giorni che si presentano con portate più elevate. Questo fenomeno si evidenzia particolarmente per il modello EC-Earth SSP 8.5, sia nell'intervallo di metà che di fine secolo. Negli scenari CESM e CMCC SSP 2.6, SSP 4.5 e SSP 7.0, per l'intervallo temporale di metà secolo si ha invece una sovrapposizione con l'andamento della curva del periodo storico e quindi non si evidenziano particolari variazioni significative.

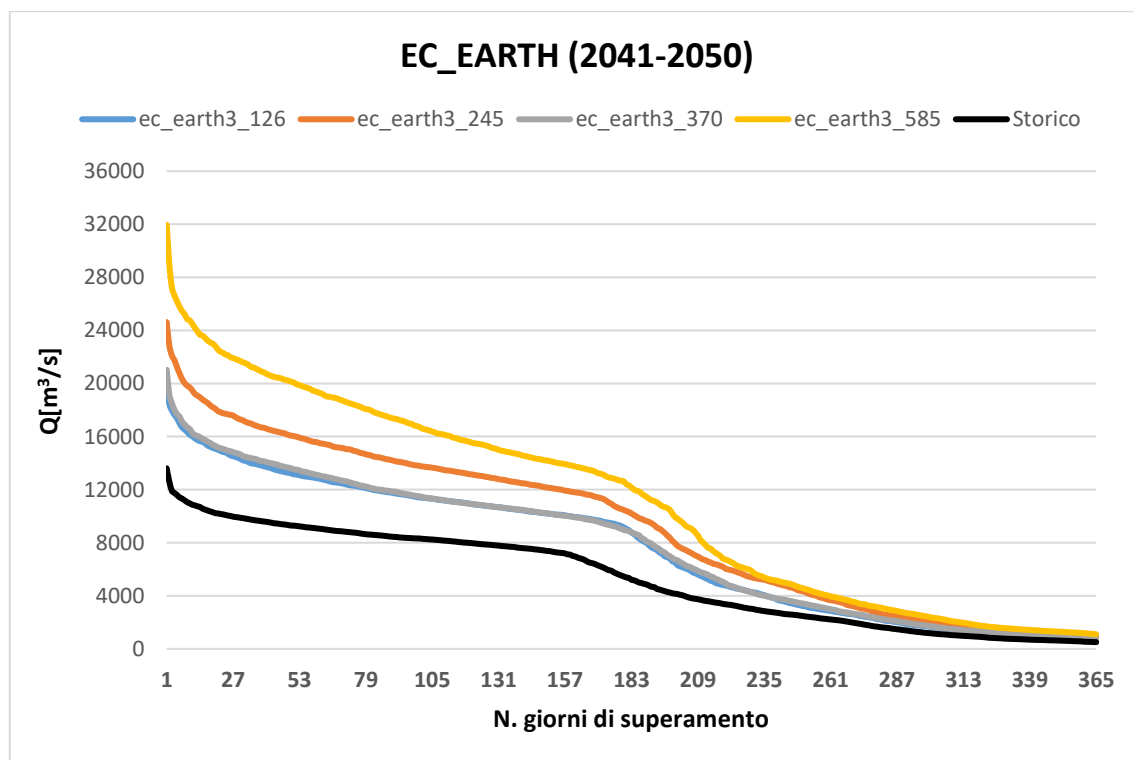


Grafico 7.1 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di metà secolo 2041-2050, modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

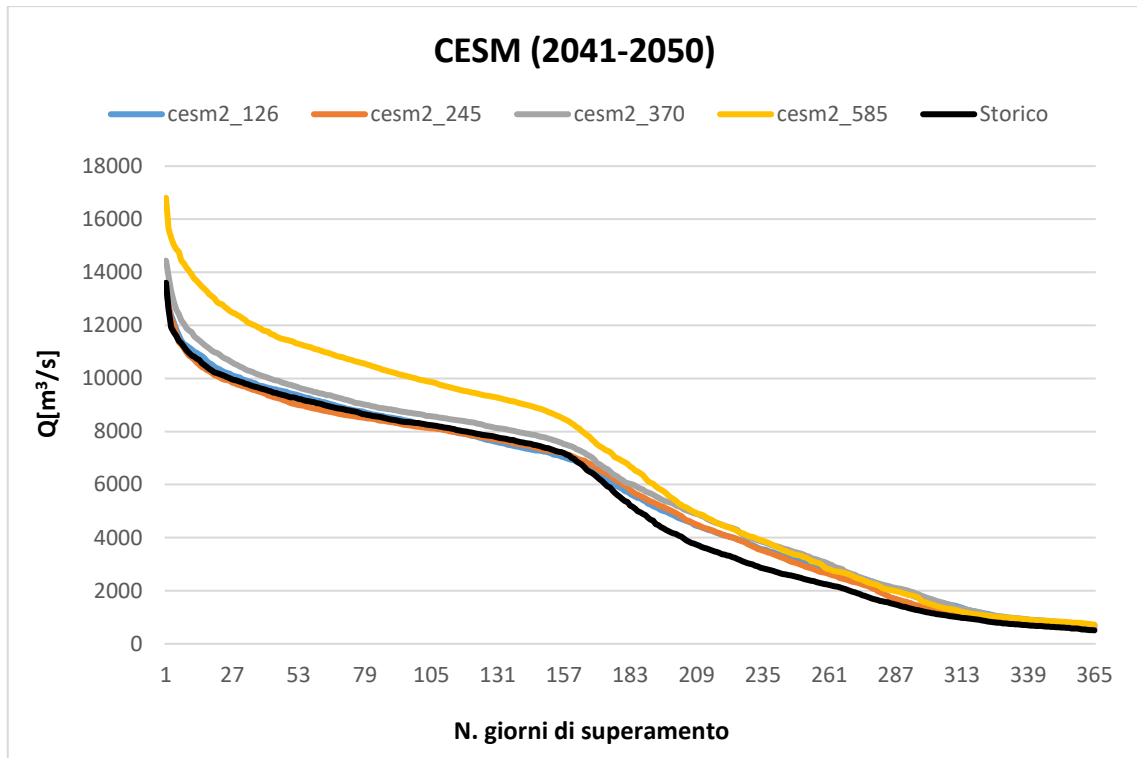


Grafico 7.2 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di metà secolo 2041-2050, modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

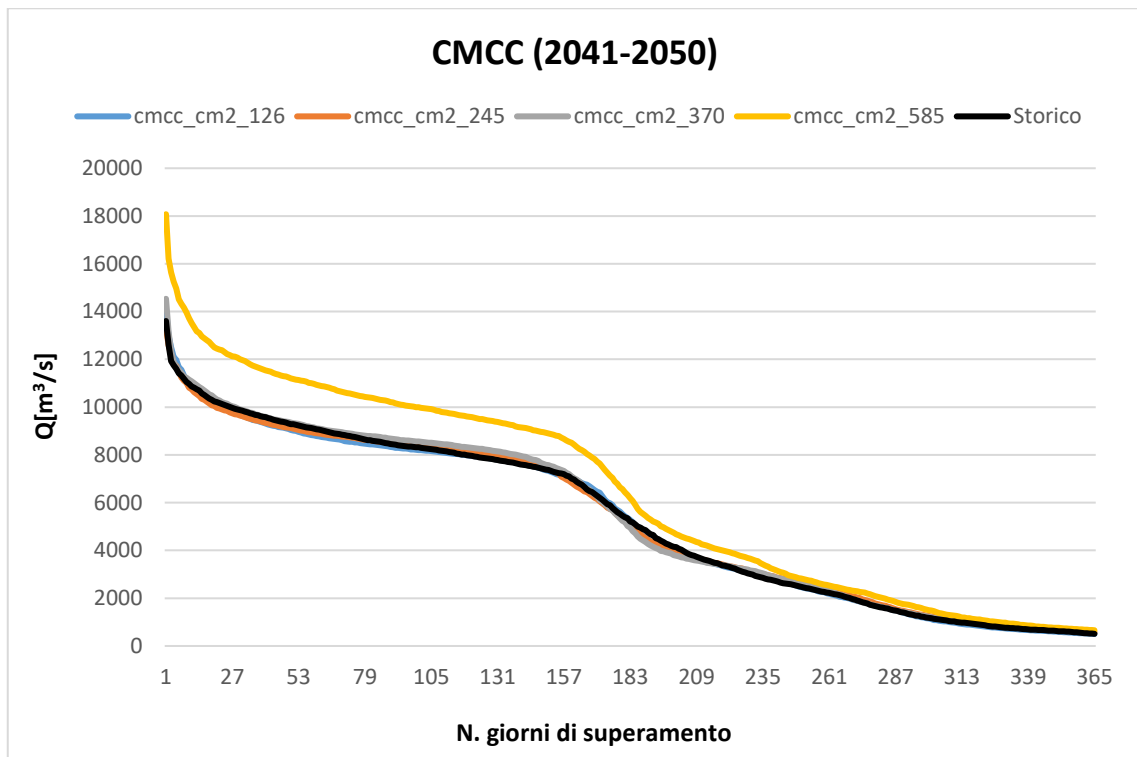


Grafico 7.3 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di metà secolo 2041-2050, modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5



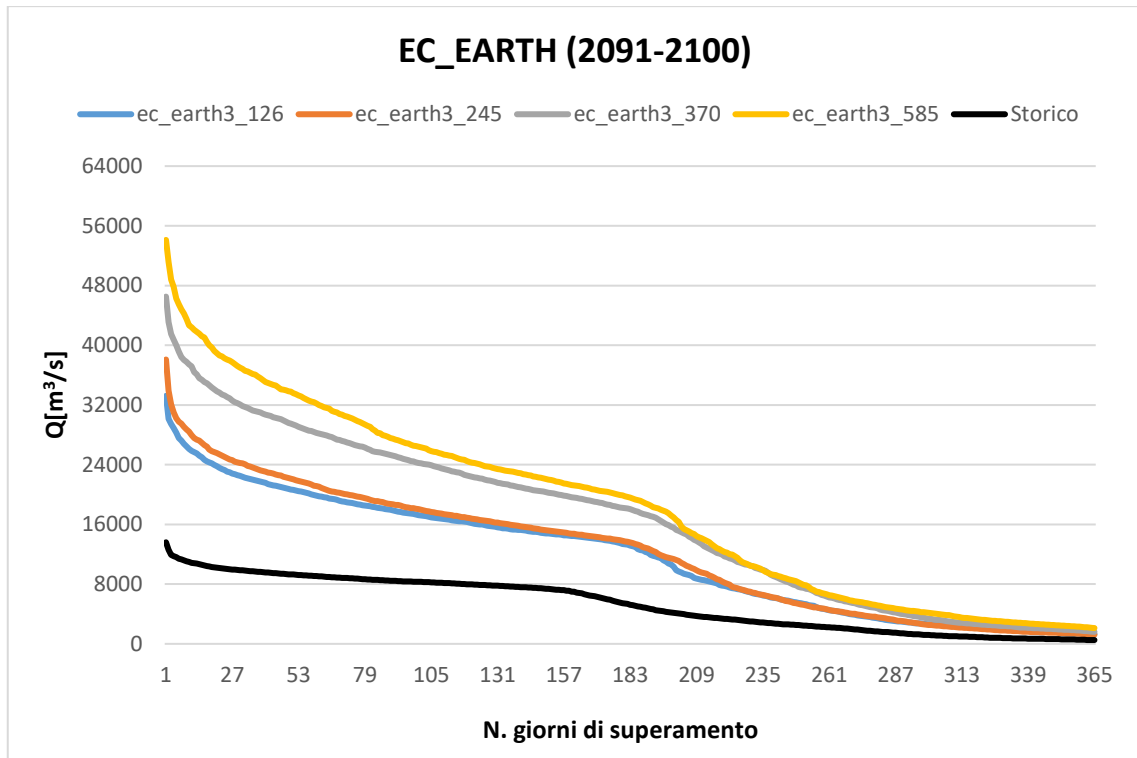


Grafico 7.4 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di FINE secolo 2091-2100, modello EC-Earth SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.5

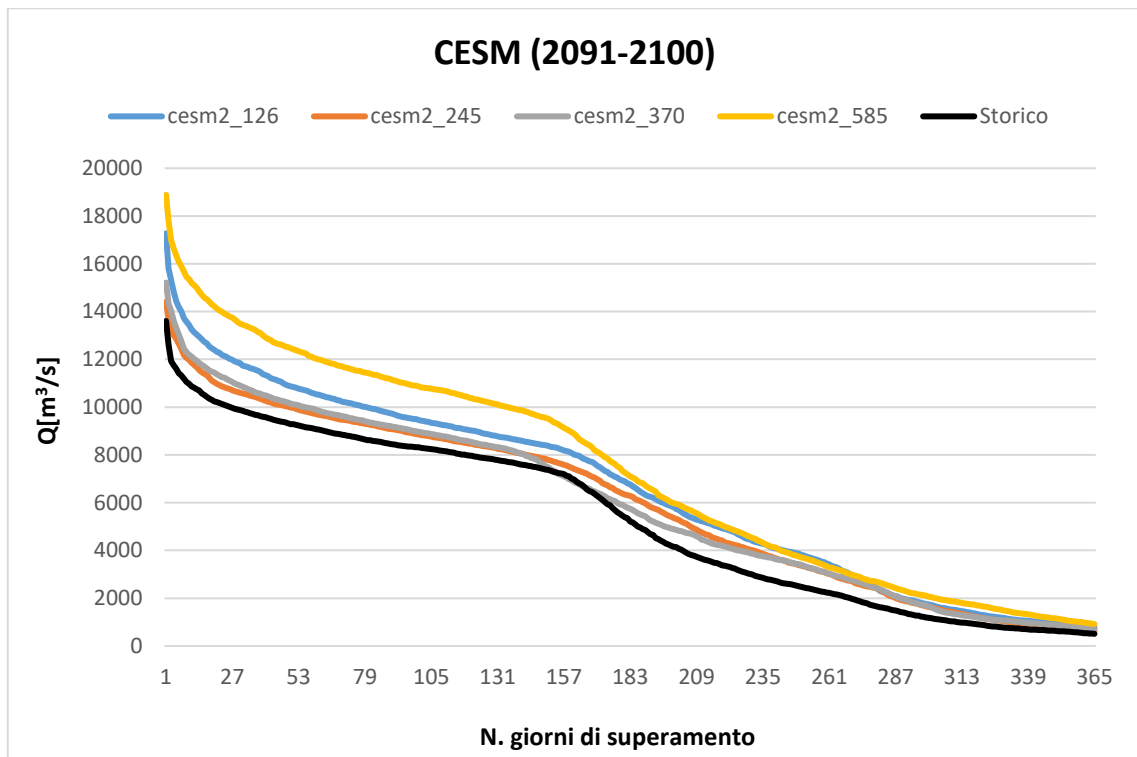


Grafico 7.5 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di FINE secolo 2091-2100, modello CESM SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.

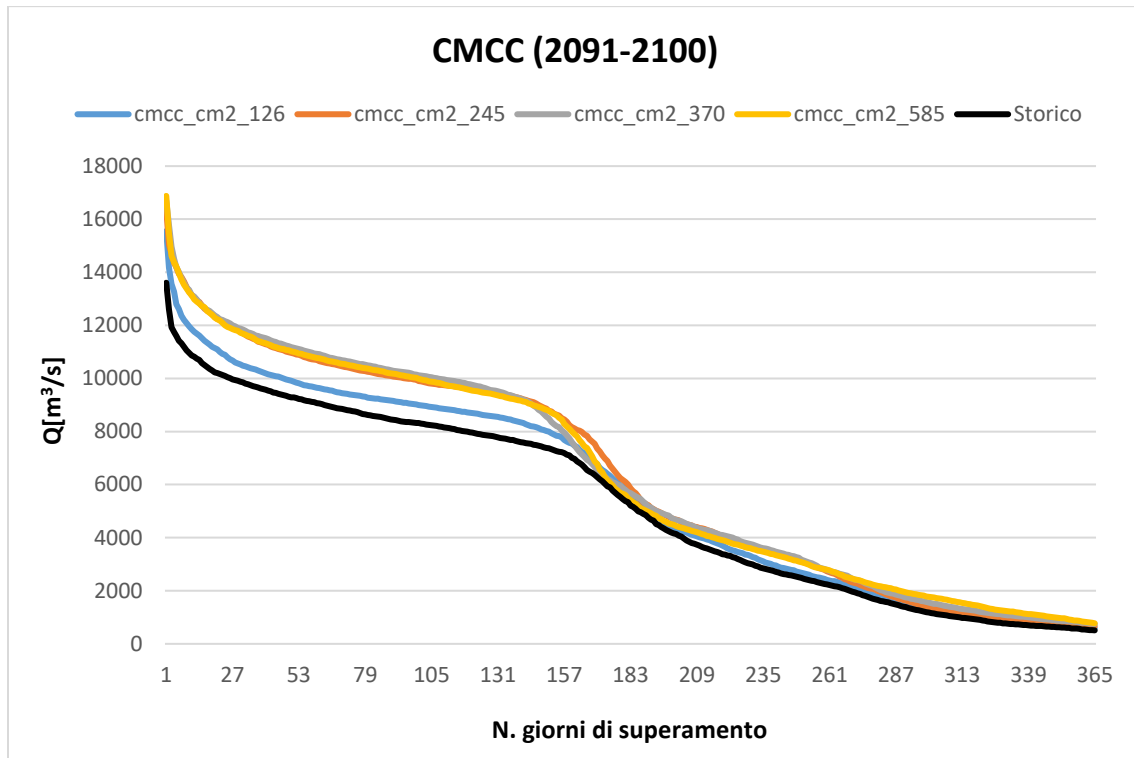


Grafico 7.6 Curva media di durata delle portate, per la sezione di El Ekhsase, relativa al periodo storico 1973-1984 e per il decennio di FINE secolo 2091-2100, modello CMCC SSP 2.6, 4.5, 7.0 e 8.

## 7.2 Limitazioni e possibili sviluppi futuri

Il lavoro di confronto può avere una valenza puramente qualitativa in quanto, per ottenere un esame più approfondito è necessario risolvere alcune criticità che si sono presentate. In primo luogo, la mancanza di informazioni circa il quantitativo di volume idrico prelevato in passato ad uso civile-agricolo. Infatti, per effettuare una stima più accurata dell'effettiva entità delle misurazioni di piena riportate da Toussoun sarebbe doveroso avere indicazioni sull'evoluzione del sistema di approvvigionamento idrico e di irrigazione nella regione di indagine. Questo non solo permetterebbe di valutare l'effettiva magnitudo dell'inondazione, in modo da poter calcolare il reale quantitativo di volume idrico in carenza o in eccedenza, ma fornirebbe anche un'indicazione circa le eventuali modificazioni artificiali dell'alveo in risposta o in adattamento ad una particolare situazione.

Un'ulteriore criticità riscontrata è data dalla mancanza di un preciso calendario irriguo. Per poter correttamente valutare il volume prelevato di acqua ad uso agricolo mensile, infatti, è necessaria la conoscenza della distribuzione irrigua adottata lungo il corso dell'intero bacino. Considerato che il quantitativo di portata del fiume segue il ritmo della stagione equatoriale delle piogge, con il periodo di piena nella piovosa stagione estiva e di magra nella secca stagione invernale,

anche le necessità delle colture presenti dipendono da questo ritmo idrologico. Una delle principali caratteristiche della civiltà passata è stata proprio la capacità di adattamento in risposta a specifici e mutevoli fattori di cambiamento del regime fluviale. A livello presente, in risposta ai periodi di forte stress climatico, soprattutto forti siccità, i paesi del bacino si sono adattati tramite l'uso di infrastrutture idrauliche, come le dighe, in grado sia di regolare sia il flusso del fiume, che di fornire un'importante risorsa energetica.

L'ultima criticità presentata è data proprio dalla presenza delle dighe. Il modello idrologico utilizzato, Poli-Hydro, è in grado di simulare la gestione di un invaso, sia nella fase di calibrazione, sia nell'ipotesi di scenari futuri. Nel presente studio è stata considerata una modellizzazione con regime fluviale naturale non regolato. Si potrebbe considerare la presenza di infrastrutture di regolazione lungo il corso del fiume, ottenendo un'analisi più dettagliata. Nello specifico, l'analisi con conseguente modellizzazione, sia presente che futura, degli sbarramenti lungo il Nilo, costituisce un interessante strumento di indagine sia a livello idrologico che a livello politico-sociale. Una proiezione con diversi scenari di controllo e gestione idrica sia a monte, come nel dibattuto caso attuale della grande diga del rinascimento dell'Etiopia, che a valle, potrebbe fornire un aiuto utile ai futuri interventi di pianificazione e gestione delle risorse idriche.

Le strategie di resilienza e adattamento ai cambiamenti sia climatici che politici potrebbero essere testate anche mediante l'utilizzo di un modello paleoclimatico. Sarebbe così possibile valutare una sequenza temporale di periodi di alta e bassa portata in modo da ricavarne una descrizione statistica che, associata agli studi effettuati di risposta e adattamento passato, possa permettere di stabilire una relazione con il contesto presente. Il tutto permetterebbe di ricavare una risposta alle sfide climatiche odierne, basta sull'adattamento ed il rinnovo delle strategie passate.

## 8 Conclusioni

Nel lavoro di tesi presentato sono stati valutati gli effetti dei cambiamenti climatici sull'idrologia del fiume Nilo, tenendo ben in considerazione due fattori: il diverso comportamento delle fasce climatiche che sono presenti nell'area del bacino ed il confronto con le registrazioni di piena storicamente datate. Il periodo di studio considerato è stato quello compreso tra il 1973 ed il 2100. Nello specifico, l'intervallo compreso tra il 1973-1984 è stato impiegato per la calibrazione del modello idrologico, mentre per le proiezioni degli scenari futuri è stato considerato l'intervallo compreso tra il 2021-2100. Partendo da valori di portata osservata a scala media mensile forniti dagli idrometri, il modello idrologico ha ricreato in output l'andamento della portata media giornaliera, relativa allo stesso periodo dei dati osservati 1973-1984. L'andamento così ottenuto è stato poi utilizzato per il confronto con i dati proiettati tramite i modelli climatici. Utilizzando poi 12 serie giornaliere di precipitazione e temperatura fino al 2100, con opportune procedure di downscaling, si sono ottenute attraverso il modello idrologico, le portate simulate fino a fine secolo. Mediante l'analisi di queste portate è stato possibile effettuare un primo confronto con i dati di flusso storicamente catalogati, contenenti informazioni sul massimo e minimo valore di livello del Nilo su scala annuale, nella sezione di misura del Nilometro di Roda al Cairo per un arco temporale che va dal 622 d.C. al 1921 d.C. Valutando poi le curve di durate per i 12 scenari, è stato possibile verificare una tendenza di aumento di volume idrico sia in termini di valore assoluto che in termini di giorni con presenza di grandi flussi idrici. Un'indagine più approfondita del GCM ha poi permesso di constatare che questo aumento di portata idrica è prevalentemente causato da un aumento dell'intensità delle piogge che vengono a manifestarsi nella regione equatoriale, mentre, a livello settentrionale nella zona sahariana, si presentano condizioni più estreme di situazioni meteorologiche aride e di siccità. Questo risultato è coerente con una tendenza di previsione climatica che stima un aumento di temperature dell'aria, tempeste ed eventi di inondazione derivanti da forti precipitazioni.

Nel complesso, è possibile affermare che il modello idrologico calibrato ha garantito una buona stima delle portate, considerando sia l'intero bacino che i relativi sottobacini. Nonostante la grande estensione del bacino e la sua variabilità

## | CONCLUSIONI

morfologica e climatica, la modellazione ha presentato errori accettabili rispetto all'osservato, sia nelle sezioni di chiusura in corrispondenza degli idrometri, sia in termini di precipitazione e temperatura valutata a scala dell'intero bacino e confrontata con i report FAO. La calibrazione del modello effettuata non prevede la regolazione del flusso da invaso regolato, tale scelta è stata adottata in modo tale da consentire una miglior valutazione del regime idrico del fiume in risposta a cambiamenti delle condizioni al contorno nel corso dell'anno, considerata poi la stretta dipendenza della portata del Nilo dal ciclo delle piovose stagioni monsoniche. La risoluzione di alcune limitazioni che si sono presentate avrebbe permesso una maggior accuratezza di modellazione e previsione. Tali accorgimenti si possono tenere in considerazione per sviluppi futuro, ottenendo così una miglior valutazione idrologica-sociale del fiume e consentendo la creazione di un modello statisticamente basato in grado di relazionare la risposta del Nilo e del suo bacino semiarido ad eventi di stress climatico. Questa relazione, affiancata dall'indagine storico-sociale-climatica presentata nel seguente lavoro di tesi e mediante un ulteriore impiego di modelli paleoclimatici, potrebbe garantire risultati affidabili e riproducibili in merito al legame socio-climatico tra le popolazioni del Nilo ed i cambiamenti del fiume stesso. La stessa disputa nella gestione delle acque che accalora i paesi coinvolti, potrebbe beneficiare di questa analisi, sviluppando future strategie di pianificazione e adattamento avvalorate dalla saggezza dell'antico Egitto (Figura 8.1).

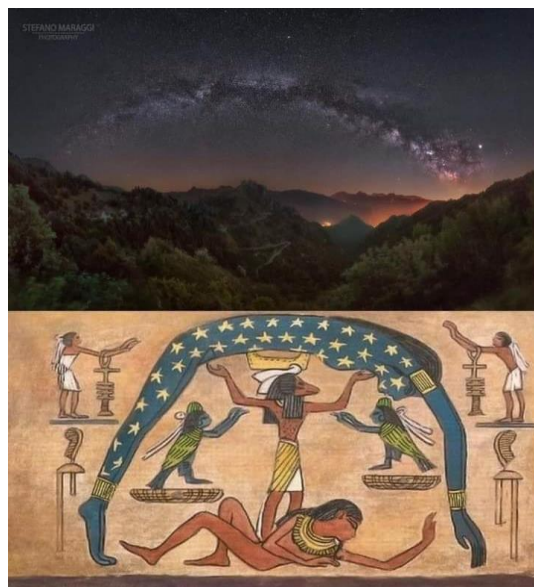


Figura 8.1 Via Lattea, dea Nut ed il cerchio della Luna



# Bibliografia

- [1] F. M. L. Welc, «Cambiamento climatico alla fine dell'Antico Regno in Egitto intorno al 4200 aC,» *nuove prove geoarcheologiche*, vol. Quat. Stagista , n. 324, pp. 124-133, (2014).
- [2] J. L. F. S. A. B. W. S. , M. M. J. Manning, «La soppressione vulcanica delle inondazioni estive del Nilo innesca una rivolta e limita il conflitto interstatale nell'antico Egitto.,» *Comunicazioni sulla natura*, (2017).
- [3] J. P. M. R. L. D. N. K. P. G. J. P. G. T. Yeakela, «Crollo di una rete ecologica nell'antico Egitto,» 2014.
- [4] G. F. , B. S. B. Wong- Parodi, Resilienza vs adattamento: inquadramento e azione. Gestione del rischio climatico, volume 10, 2015.
- [5] F. Hassan, «Inondazioni estreme del Nilo e carestie nell'Egitto medievale (930-1500 d.C.) e loro implicazioni climatiche.,» in *Quaternario Internazionale 173-174:101-112.*, (2007).
- [6] J. Yletyinen, « Variabilità climatica dell'Olocene e cambiamenti culturali nel fiume Nilo e nei suoi dintorni sahariani.,» in *Examensarbete grundnivå Geografi , 15 cv. G1*, 2009.
- [7] K. Butzer, « Crollo, ambiente e società.,» 10: 3632-3639, (2012).
- [8] A. L. C. A. R. Touzeau, in *Evoluzione del clima e della dieta durante l'antico Egitto. , Quaternario ,* (2017), pp. 28(2):285-293..
- [9] P. T. P. Jones, « I potenziali impatti dei cambiamenti climatici sulla produzione di mais in Africa e America Latina nel 2055.,» in *Global Environ Change, 13:51-59.*, (2003). .
- [10] S. B. , L. S. E. Barrios, «Cambiamento climatico e migrazione rurale-urbana: il caso dell'Africa subsahariana.,» *J. Econo Urbano.*, vol. 6, pp. 357-371, (2006) .

- [11] S. F. , G. G. M. L. K. S. K. W. A. Yoffe, « Geografia del conflitto idrico internazionale e della cooperazione: set di dati e applicazioni.,» *Ricerca sulle risorse idriche*, , vol. 40:W 05S04., (2004)..
- [12] E. W. , H. (. Ansink, «Diritti d'acqua contestati,» *Giornale europeo di economia politica*, pp. 25:247-260., (2009). .
- [13] K. R. , D. E. , L. C.-B. C. (. A. G. T. A. t. U. t. N. R. B. C. p. 9.-1. i. ". W. R. F. i. o. d. p. L. B. a. c. d. P. K. D. Madani, A Game Theory Approach to Understanding the Nile River Basin Conflict, pp. 97-114, "A Water Resource" Festschrift in onore del professor Lars Bengtsson, Lund University; Lund, Svezia: a cura di: Person KM, Division, (2011).
- [14] A. R. B. Monem, Produzione agricola in Egitto: valutazione della vulnerabilità e miglioramento della capacità di adattamento e della resilienza ai cambiamenti climatici, (2020). .
- [15] J. D. H. A. D. A. C. A. H. (. Brown, «Descrittore di dati: PaleoClim , superfici paleoclimatiche ad alta risoluzione spaziale per aree terrestri globali.,» (2018).
- [16] M. P. J. V. T. A. , N. B. A. B. A. M. D. A. S. v. d. H. , D. J. H. . S. S. R. J. B. L. O. B. , U. S. E. S. , J. V. Haywood, « Cosa può fare per te la Modellazione Paleoclimatica ?,» *Sistemi terrestri e ambiente*, vol. 3, pp. 1-18, (2019).
- [17] B. B. D. R. R. Groppelli, «Ridimensionamento spaziale delle precipitazioni dai GCM per proiezioni sui cambiamenti climatici utilizzando cascate casuali: un caso di studio in Italia, Water Resour .,» (2011a)..
- [18] B. D. C. G. B. A. R. R. M. C. L. , A. , P. E. S. C. D. G. Soncini A., «Regimi idrologici futuri nel bacino dell'Indo superiore: un caso di studio da un bacino glaciale d'alta quota, Jo,» *Journal of Hydrometeorology*, vol. 1(1), pp. 306-326, (2015)..
- [19] B. D. C. G. M. U. V. E. S. F. V. G. S. , D. S. A. S. C. D. , G. Soncini A., « Regimi idrologici futuri e copertura glaciale nella regione dell'Everest: il caso di studio del Dudh Bacino di Koshi,» *Scienza dell'ambiente totale STOTEN*, vol. 565, pp. 1084-1101, (2016)..



- [20] H. S. A. D. ,. Y. F. -F. A. B. D. Akbari, «Operazione di due grandi bacini idrici dell'Iran in scenari IPCC durante il XXI secolo, Hydrol,» (2018).
- [21] W. G. I. c. w. r. o. 9. A. 2. T. W. G. I. a. I. c. w. r. o. 2. F. a. 4. A. 2022, «ipcc,» [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>.
- [22] R. Said, *The River Nile: Geology, Hydrology and Utilization*, 1993.
- [23] D. A. Morini, «IL TERRITORIO DEL FAYYUM NELL'ANTICHITÀ:IL SISTEMA IDROGRAFICO TRA CONTINUITÀ E INNOVAZIONE,» 2006-2007.
- [24] E. D. C. S. C. C. ,. L. B. ,. D. B. e. M. ,. J. M. Marie Revel, «20,000 years of Nile River dynamics and environmental changes in the Nile catchment area as inferred from Nile upper continental slope sediments,» *Quaternary Science Reviews*, 2015.
- [25] «A new model of river dynamics, hydroclimatic change and humansettlement in the Nile Valley derived from meta-analysis of the Holocene fluvial archive,» *Quaternary Science Reviews*, 2015.
- [26] \*. Y. L. A. S. L. M. F. W. F. M. W. Z. C. J. J. Z. C. Qianli Suna, «Climate-induced discharge variations of the Nile during the Holocene:Evidence from the sediment provenance of Faiyum Basin, north Egypt,» *Global and Planetary Change*, 2019.
- [27] J. G. ,. C. B. B. R. a. F. R. MARKUS KOTTEK, «World Map of the Köppen-Geiger climate classification,» *Meteorologische Zeitschrift*, pp. Vol. 15, No. 3, 259-263 , (June 2006).
- [28] K. G. Adar, «The Interface between National Interest and Regional Stability: The Nile River and the Riparian States,» *African Sociological Review / Revue*, vol. 11, 2007.
- [29] F. a. A. O. o. t. U. Nations, «Water Accounting in the Nile River Basin.,» FAO and IHE Delft,, 2020.
- [30] N. B. W. R. Atlas, «Water Demand,Use and Hydraulic Infrastructure,» *Atlas*, vol. Capitolo 7.
- [31] A. H. E.-S. M. & M. H. M. A. Khaled Abubakr Ali Abutaleb, «Climate Change Impacts, Vulnerabilities and Adaption Measures for Egypt's Nile Delta,» *Earth Systems and Environment volume*, 2018.

- [32] FAO, «The Water Resources of the Nile Basin,» Atlas.
- [33] B. Hilhorst, «Water Management in the Nile Basin:A Fragmented but Effective Cooperative Regime,» 2016.
- [34] F.-N. B. Project, «Synthesis Report,» FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2011.
- [35] FAO, «WATER AND AGRICULTURE IN THE NILE RIVER BASIN,» 2000.
- [36] M. Kovacevic, «Review of HDI Critiques and Potential Improvements,» United Nations Development Programme Human Development Reports Research Paper, 2010.
- [37] G. Manna, «aspeniaonline- il Nilo della discordia,» May 2021. [Online]. Available: <https://aspeniaonline.it/il-nilo-della-discordia/>.
- [38] FAO, «AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture,» 2005. [Online]. Available: <https://www.fao.org/aquastat/en/>.
- [39] N. B. W. R. Atlas, «Irrigation in the Nile Basin,» [Online]. Available: <https://atlas.nilebasin.org/treatise/irrigation-in-the-nile-basin/>.
- [40] V. Giustolisi, «La "Pietra di Palermo" e la cronologia dell'Antico Regno».
- [41] B. Bell, «The Oldest Records of the Nile Floods,» *The Geographical Journal*, Vol. 1 di 2136,, n. 4, pp. 569-573, 1970.
- [42] V. PACHA, « Crues modernes et Crues anciennes du Nil,» *ZÁS* 34 , pp. 95-107, 1896.
- [43] O. Toussoun, *Mémoire sur l'Histoire du Nil*, 1925.
- [44] G. W. Murray, «The Egyptian Climate: An Historical Outline,» *The Geographical Journal*, vol. 117, n. 4, pp. 422-434, 1951.
- [45] C. F. D. K. C. M. G. L. V. M. b. Z. C. F. G. J.-Y. E. J.-D. S. Nick Marriner, «ITCZ and ENSO-like pacing of Nile delta hydro-geomorphology during the Holocene,» *Quaternary Science Reviews*, 2012.
- [46] P. O. J. G. T. S. M. deMenocal, «Coherent high- and low latitude climate variability during the Holocene warm period.,» *Science*, pp. 2198-2202., 2000.

- [47] F. Gasse, «Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum,» *Quaternary Science Reviews*, vol. 19, pp. 189-211., 2000.
- [48] R. M. P. Elfatih A. B. Eltahir, «El Nifio and the natural variability in the flow of the Nile River,» *WATER RESOURCES RESEARCH*, vol. 32, n. 1, pp. 131-137, 1996.
- [49] F. M. C. B. P. M. O. M.-B. E. L. L. Bassinot, «Holocene evolution of summer winds and marine productivity in the tropical Indian Ocean in response to insolation forcing:,» *Climate of the Past*, vol. 7, pp. 815-829, 2011.
- [50] S. V. D. L. A.-M. E. H. C. C. F. P. J.-P. F. M. R. B. R. J. D. F. C. D. S. M. S. H. E. D. Kröpelin, «Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: the past 6000 years.,» *Science*, n. 320, pp. 765-768..
- [51] R. K. S. Kuper, «Climate-controlled Holocene occupation of the Sahara: motor of Africa's evolution.,» *Science*, n. 313, pp. 803-807, 2006.
- [52] F. Hassan, «The dynamics of a riverine civilization: a geoarchaeological perspective on the Nile Valley, Egypt,» *World Archaeology*, 1997.
- [53] V. Dobrev, *Structure and Significance: Thoughts on Ancient Egyptian Architecture*, 2006.
- [54] S. P. BLOXAM E, «Old Kingdom Basalt Quarrying Activities at Widan el-Faras, Northern Faiyum Desert,» 2002.
- [55] B. K.W., «Birket Qarun,» *Lexicon der Ägyptologie*, 1975b.
- [56] M. Williams, «Late pleistocene and Holocene environments in the Nile Basin,» *Global Planet. Change*, n. 69, pp. 1-15, 2009.
- [57] B. Barbara, «Climate and History of Egypt: the Middle Kingdom,» *AJA* , n. 79, pp. 223-269, 1975.
- [58] B. K.W., «Bahr Yussuf,» *Lexicon de Ägyptologie*, 1975a.
- [59] F. L. A. R. S. W. R. B. M. S. & J. R. M. Joseph G. Manning, «Volcanic suppression of Nile summer flooding triggers revolt and constrains interstate conflict in ancient Egypt,» *NATURE COMMUNICATIONS* |, 2017.

- [60] U. B. M. A. C. E. R. C. K. H. P. H. T. L. W. M. P. A. M. A. F. M. M. K. N. W. T. Michael McCormick, «Climate Change during and after the Roman Empire: Reconstructing the Past from Scientific and Historical Evidence,» *Journal of Interdisciplinary History*, vol. XLIII, n. 2, p. 169–220, 2012.
- [61] F. A. Hassan, «Extreme Nile floods and famines in Medieval Egypt (AD 930–1500) and their climatic implications,» *Science Direct*, 2007.
- [62] A. K. H. Z. a. V. J. A. V. I. E. T. Al-Baghdadi, «Kitab Al-Ifada wa'l Itibar.,» 1964.
- [63] G. Trewartha, «The Earth's Problem Climates,» 1971.
- [64] C. Buckle, «Weather and Climate in Africa.,» 1996.
- [65] D. F. Y. G. M. Kondrashov, «Oscillatory modes of extended Nile River records (A.D. 622–1922).,» *Geophysical Research Letters*, 2005.
- [66] J. F. S. U. N. H. J. Z. D. S. M. T. ,. G. C. H. A. S. M. W. A. M. J. F. a. C. C. R. Stefan Brönnimann, «Last phase of the Little Ice Age forced by volcanic eruptions,» *Nature Geoscience*, vol. 12, pp. 650-666, 2019.
- [67] S. E. N. a. X. YIN, «RAINFALL CONDITIONS IN EQUATORIAL EAST AFRICA DURING THE NINETEENTH CENTURY AS INFERRED FROM THE RECORD OF LAKE VICTORIA,» *Climatic Change*, n. 48, pp. 387-398, 2001.
- [68] A. K. D. a. D. K. Sharon E. Nicholson, «A TWO-CENTURY PRECIPITATION DATASET FOR THE CONTINENT OF AFRICA,» *American Meteorological Society*, 2012.
- [69] J. Anthony Allan, «THE NILE BASIN: EVOLVING APPROACHES TO NILE WATERS MANAGEMENT,» 1999.
- [70] F. C. PROGRAMME, *Project of the Governments of Burundi, Democratic Republic of Congo, Egypt, Eritrea, Ethiopia, Kenya, Rwanda, Sudan, Tanzania and Uganda*, 2004.
- [71] info@cairotoptours.com, «Progetto Toshka | Laghi Toshka,» 2014. [Online]. Available: <https://www.cairotoptours.com/it/Guida-turistica-Egitto/Attrazioni-di-Assuan/Progetto-Toshka>.

- [72] B. S. A. B. D. R. R. Groppelli, « Valutazione del futuro ciclo idrologico in scenari di cambiamento climatico in uno spartiacque alpino su mesoscala dell'Italia.,» 2011b.
- [73] The Intergovernmental Panel on Climate Change, «The Intergovernmental Panel on Climate Change,» [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/>.
- [74] C. T. D. P. v. V. V. E. P. F. G. H. K. E. K. J.-F. L. J. L. G. A. M. R. M. e. R. a. B. M. S. Brian C. O'Neill, «The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6,» *Geoscientific Model Development*, 2016.
- [75] C. 2022, «Analisi di scenari climatici,» 2022. [Online]. Available: <https://carbonsink.it/servizi/analisi-di-scenari-climatici/#:~:text=Uno%20scenario%20climatico%20rappresenta%20una,percorso%20di%20sviluppo%20dell'azienda..>
- [76] M. G. S. Ismail Sherine S., «RESPONSE OF RIVER NILE DREDGING ON WATER LEVELS,» in *Fifteenth International Water Technology Conference, IWTC-15 2011*, Alexandria, Egypt, 2011.
- [77] F. M. El-Nahas, «Tunnelling and Supported Deep Excavations in the Greater Cairo,» Sharm El-Sheikh,, 2006.