

Analisi spaziale delle tendenze storiche di precipitazione e temperatura a livello locale nel nord del Kenya

Spatial analysis of precipitation and temperature historical trends at local level in northern Kenya

INGRID VIGNA

Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio, Politecnico di Torino; ingrid.vigna@polito.it

Riassunto

Gli impatti del cambiamento climatico sono particolarmente evidenti nelle zone aride del pianeta, raggruppate sotto il titolo di Arid and Semiarid Land (ASALs). I cambiamenti in atto nella distribuzione delle precipitazioni durante l'anno minacciano il sostentamento delle popolazioni locali dedite all'allevamento, che fanno affidamento su scarse risorse idriche. Per poter rafforzare la capacità di adattamento delle comunità, oltre che a livello globale, nazionale e regionale, è necessario approfondire gli effetti del cambiamento climatico anche a livello locale. Questo studio ha l'obiettivo di valutare l'andamento delle precipitazioni e della temperatura nella Contea di Marsabit, nel nord del Kenya, tra il 1983 e il 2014, per mezzo di dati meteorologici in forma di griglia. L'analisi ha richiesto il supporto di strumenti GIS e l'utilizzo della cartografia tematica, sia per l'analisi dei dati che per la rappresentazione dei risultati. Questi evidenziano una distribuzione disomogenea dei trend delle variabili climatiche nell'area, a causa delle caratteristiche orografiche e della vicinanza delle masse d'acqua oceaniche. È stata inoltre analizzata la correlazione tra variazioni climatiche e altitudine, dimostrando l'influenza della topografia sull'evoluzione del clima locale.

Parole chiave

Cambiamento climatico, analisi spaziale, GIS, ASALs

Abstract

The effects of climate change are particularly severe in global Arid and Semiarid Lands (ASALs), with impacts on many environmental risks. Undergoing changes in the distribution of precipitation throughout the year especially undermine the livelihood of people relying on livestock production and scarce water resources. In addition to more developed analysis at global, national and regional levels, climate change needs to be investigated at local levels, for strengthening communities' adaptation capacity. This study aims to assess precipitation and temperature trends in Marsabit County in northern Kenya for 1983-2014 using grid meteorological datasets. The research is conducted with extensive support of GIS tools and thematic cartography, both for data analysis and data representation. The results show an inhomogeneous distribution of climatic trends through space. The correlation between climatic trends and altitude is also analysed, showing the influence of local topography on climate evolution.

Keywords

Climate change, spatial analysis, GIS, ASALs

1. Introduzione

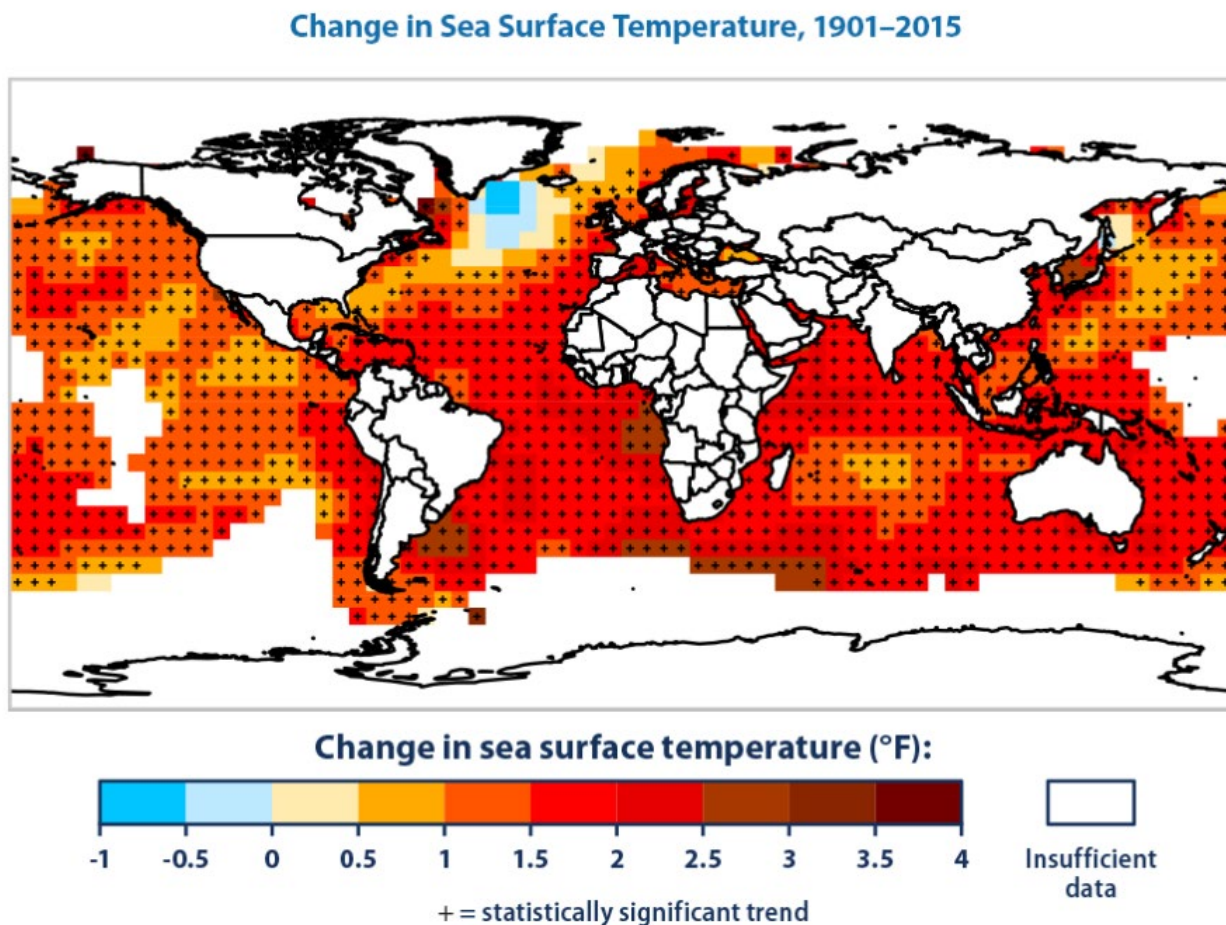
Negli ultimi anni, molti ricercatori si sono dedicati all'approfondimento delle evidenze del cambiamento climatico in atto e dei suoi effetti sugli ecosistemi e sulle attività umane (Aleixandre-Benavent *et al.*, 2017; Santos e Bakhshoodeh, 2021). Affinché i dati scientifici possano essere di supporto per l'elaborazione di politiche di mitigazione e adattamento efficaci, in particolare, è necessario un punto di vista a scala locale. Questo è evidente specialmente per le regioni in cui gli eventi climatici estremi mettono a repentaglio la salute degli esseri umani, nonché per i Paesi in cui il sostentamento della popolazione dipende strettamente e in modo diretto dalle risorse ambientali. La Contea di Marsabit, nel nord del Kenya, rientra in entrambe queste categorie. Questo studio, quindi, si propone di approfondire gli effetti del cambiamento climatico sull'andamento annuale delle temperature e delle precipitazioni nell'area. Esso si inserisce nella cornice del progetto di cooperazione internazionale "One Health", che ha l'obiettivo di migliorare la salute e le condizioni di vita degli abitanti della Contea di Marsabit attraverso un approccio integrato, basato sulla stretta connessione tra persone, ambiente e animali.

La Contea di Marsabit fa parte delle cosiddette *Arid and Semiarid Lands* (ASALs), zone caratterizzate da condizioni climatiche estreme, scarse infrastrutture, alta incidenza di povertà e diffusa insicurezza alimentare (State Department for Development of the Arid and Semiarid Lands, 2018). La popolazione è per lo più costituita da pastori nomadi, che si spostano durante l'anno secondo la disponibilità di acqua e pascoli (MoALF, 2018). Il clima locale è influenzato da tre fenomeni di portata globale, ovvero la *Zona di Convergenza Intertropicale* (ZCIT), la teleconnessione atmosferica di *El Niño-Oscillazione Meridionale* (ENSO) e il *Dipolo dell'Oceano Indiano* (IOD). In particolare, ENSO e IOD, che coinvolgono rispettivamente l'Oceano Pacifico e l'Oceano Indiano, attestano il ruolo delle acque oceaniche nell'influenzare il clima dell'area (Uhe *et al.*, 2018). La loro interazione genera l'alternarsi durante l'anno di due stagioni umide e due stagioni secche, nonché il verificarsi di eventi estremi a cadenza irregolare, quali

siccità, piogge eccezionali e alluvioni (Karanja e Mutua, 2000; Ogalo *et al.*, 2008; Uhe *et al.*, 2018). Questi eventi hanno spesso effetti devastanti per le comunità di pastori locali, tra cui l'aumento dei casi di malnutrizione, la carenza di acqua e la perdita di vite umane e animali (Dutra *et al.*, 2013; Herrero *et al.*, 2016; MoALF, 2018; Thiongo e Ngaira, 2019). A causa del cambiamento climatico e del conseguente innalzamento della temperatura delle acque oceaniche, questi eventi stanno diventando sempre più frequenti, con gravi impatti sulla salute della popolazione (McCarthy *et al.*, 2001; Orindi e Ochieng, 2005). Secondo l'International Panel on Climate Change (IPCC), infatti, la temperatura della superficie oceanica è aumentata tra il 1901 e il 2015 su tutto il globo (Rintoul *et al.*, 2013). Alcune zone presentano tendenze più accentuate, come l'area a largo di Kenya e Somalia, come illustrato in figura 1.

Precedenti studi hanno cercato di valutare l'influenza del cambiamento climatico sulle variabili climatiche in Africa orientale (Shongwe *et al.*, 2011; Williams *et al.*, 2012; Ngaina e Mutai, 2013; Omondi *et al.*, 2014; Ongoma *et al.*, 2016), in Kenya (Schmocker *et al.*, 2016) e, più nello specifico, nel nord del Paese. In particolare, il recente studio di Ouma *et al.* (2018) ha evidenziato un generale incremento delle temperature massima e minima nelle contee settentrionali del Kenya, accompagnato dalla diminuzione delle piogge stagionali tra marzo e maggio. Questi risultati sono in linea con quelli dello studio condotto da Dabasso e Okomoli (2015) sulla serie storica della stazione meteorologica di Marsabit, in cui gli autori mettono in luce una tendenza decrescente delle precipitazioni totali e del numero di giorni piovosi annuali tra il 1961 e il 2010. Tuttavia, secondo l'analisi condotta da Muhati *et al.* (2018) sui dati simulati da cinque modelli climatici per il periodo 2006-2100, gli scenari futuri prevedono un aumento significativo delle precipitazioni a Marsabit. Questa discrepanza tra le serie storiche e le previsioni caratterizza tutta l'Africa orientale, in cui le devastanti siccità verificatesi negli ultimi anni sembrano essere in netto contrasto con l'aumento delle precipitazioni preannunciato per i prossimi decenni dai modelli climatici. Rowell e altri (2015) si sono riferiti a tale questione con l'espressione *East African climate paradox* e hanno sviluppato diverse ipotesi, prendendo in considerazione l'accuratezza delle osser-

FIGURA 1 - Variazione della temperatura della superficie oceanica in °F tra il 1901 e il 2015



FONTE: United States Environmental Protection Agency (EPA)¹

vazioni, l'affidabilità dei modelli, la variabilità naturale e l'interazione tra le diverse forme di pressione antropica sul clima. Lo studio di Los *et al.* (2019) poi ha posto l'accento sull'impatto delle variazioni climatiche, che causano la variazione dell'altezza media delle nuvole, sulle precipitazioni occulte, ovvero quella quantità di acqua che la vegetazione riesce ad assorbire da nebbia e nuvole basse. Questo fenomeno è particolarmente importante per le foreste nebulose montane, come quella che ricopre il Mt. Marsabit, analizzata dagli autori dello studio con l'ausilio di immagini satellitari. Un aumento

della temperatura globale e il conseguente innalzamento dell'altezza media delle nuvole, infatti, possono avere effetti devastanti sulla disponibilità idrica di questo tipo di ecosistemi.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di investigare le variazioni di precipitazione annuale e temperatura media tra il 1983 e il 2014 nella contea di Marsabit utilizzando un approccio spaziale. Nell'area è presente una sola stazione meteorologica a terra, ovvero quella di Marsabit, situata a 1345 m di altitudine. Per poter analizzare le differenze locali all'interno della contea, quindi, si è scelto di utilizzare i dati meteorologici in forma di griglia forniti dal Kenyan Meteorological Department (KMD). In particolare, questo studio vuole valutare l'evidenza del

¹ Website, <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-surface-temperature>, ultimo accesso: 11/01/2022

riscaldamento globale a scala locale e comprenderne l'impatto sull'andamento delle precipitazioni nell'area, nonché testare l'ipotesi che le variazioni di temperature e precipitazioni siano spazialmente disomogenee poiché dipendenti dall'orografia della regione e dalla vicinanza delle masse d'acqua oceaniche. L'analisi delle differenze nei trend tra le diverse località, infatti, permette la formulazione di ipotesi circa l'impatto a livello locale di fenomeni aventi portata mondiale, nonché l'elaborazione di ipotetici scenari futuri. I risultati di questo lavoro costituiscono una solida base per lo sviluppo di politiche di adattamento al cambiamento climatico che siano diversificate per il territorio della contea, ovvero adeguate alle caratteristiche climatiche locali. L'utilizzo di dati e software open source, inoltre, rende l'approccio seguito replicabile in altri contesti caratterizzati da scarsità di risorse.

Nella seconda parte di questo lavoro vengono descritte l'area di studio, i dati meteorologici utilizzati per l'analisi e la metodologia seguita. Nella terza parte sono invece illustrati e discussi i risultati delle elaborazioni statistiche e cartografiche. Nella quarta parte, infine, sono presentate le principali conclusioni dell'analisi e gli spunti per lavori futuri.

2. Materiali e metodi

2.1 Area di studio

La contea di Marsabit si trova nel nord del Kenya, al confine con l'Etiopia. L'area è caratterizzata da un clima arido e sono assenti corsi d'acqua permanenti, per cui la scarsità di acqua è un problema ricorrente per la maggior parte della popolazione. In particolare, la depressione del Chalbi Desert, tra i 435 m e i 500 m di altitudine, è la zona più secca. Al contrario, le alture del Mt. Marsabit (1865 m s.l.m.), Mt. Kulal (2235 m s.l.m.), Hurry Hills (1685 m s.l.m.) e Moyale-Sololo Escarpment (1400 m s.l.m.) beneficiano dell'effetto dell'altitudine sulle precipitazioni orografiche, risultando più umide (County Government of Marsabit, 2018). Per questo motivo, il Mt. Marsabit, il Mt. Kulal e le Hurry Hills sono classificate dal governo kenyo-

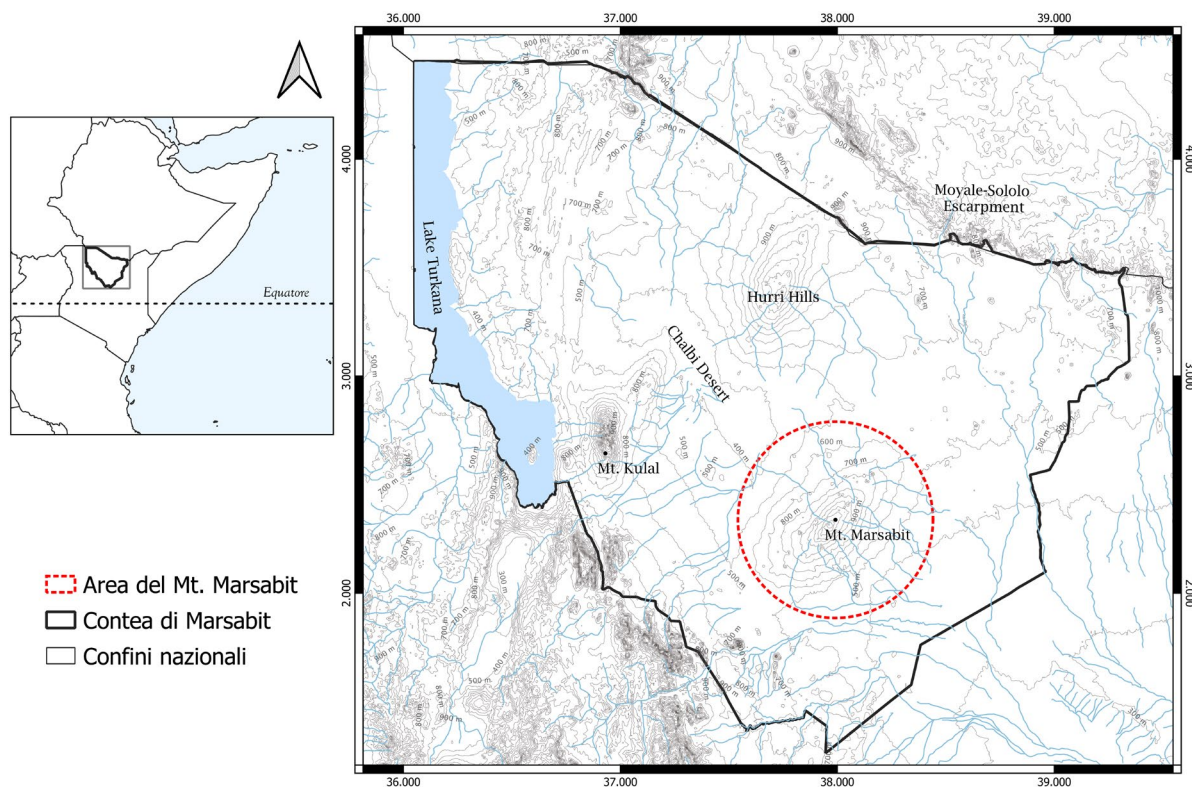
ta come Water Towers, ovvero riserve idriche per il Paese¹. Anche il lago Turkana al confine ovest della contea costituisce una fonte idrica, seppur localizzata. In generale, le precipitazioni seguono un andamento bimodale, costituito da una stagione piovosa tra marzo e maggio e una tra ottobre e dicembre, intervallate da due stagioni secche (Omeny *et al.*, 2008; Ngaina e Mutai, 2013). Secondo lo studio condotto da (Vigna *et al.*, 2020) sui principali centri abitati della Sub-contea di North Horr, nel nord della Contea, esistono anche significative differenze a livello strettamente locale nella cumulata annuale delle precipitazioni, ovvero nella quantità di pioggia che cade mediamente al suolo in un anno². I risultati dello studio, infatti, indicano una cumulata media che varia tra i circa 430 mm per El-Hadi, posto a circa 25 km dal confine con l'Etiopia, e di 183 mm per Gus, posto una settantina di chilometri più a sud. Per quanto riguarda le temperature, esse variano tra circa 10°C e circa 30°C, con una media annuale di 20.1°C (MoALF, 2018). Esse seguono per lo più l'andamento stagionale, con un abbassamento in corrispondenza dei periodi piovosi, e con ovvie differenze locali legate all'altitudine.

Nella figura 2 sono mostrati i confini dell'area di studio, che corrispondono ai confini amministrativi della contea di Marsabit. È stata poi individuata un'ulteriore area di studio circolare con un raggio di 50 km intorno alla vetta del Mt. Marsabit. Essa rappresenta la porzione di territorio su cui è stata eseguita l'analisi di correlazione tra la variazione della cumulata di precipitazioni annuale nel tempo e l'altitudine. Per maggiori dettagli, si veda il sotto-capitolo dedicato "Analisi di correlazione tra precipitazione e altitudine".

1 Website, <https://watertowers.go.ke/water-towers/>, ultimo accesso: 11/01/2022

2 Website, https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/121, ultimo accesso: 05/01/2022.

FIGURA 2 - Carta dell'area di studio della contea di Marsabit. In rosso è evidenziata l'area circolare intorno al Mt. Marsabit. Si noti che l'idrografia fa riferimento a corsi d'acqua stagionali



FONTE: Elaborazione dell'autrice

2.2 Dati

I dati di precipitazione cumulata, temperatura massima e temperatura minima su cui si basa questo studio sono parte del dataset ufficialmente fornito da KMD, frutto del progetto Enhancing National Climate Services (ENACTS). Questo ha l'obiettivo di migliorare la disponibilità e l'accessibilità di dati climatici per i Paesi africani attraverso l'elaborazione di un dataset storico in forma di griglia ad alta risoluzione temporale e spaziale, in collaborazione con i servizi meteorologici e idrologici nazionali. Il dataset è ottenuto dalla combinazione di dati satellitari e di dati misurati al suolo dalle stazioni meteorologiche nazionali. Il processo di elaborazione si avvale del software Climate Data Tool (CDT) sviluppato dall'International Research Institute for Climate and Society (IRI) (Dinku *et al.*, 2018). Il dataset che ne risulta

ha risoluzione temporale decennale e risoluzione spaziale di 0.0375° , per un totale di 4400 punti, di cui 456 nell'area del Mt. Marsabit. Esso si riferisce al periodo 1983-2014 ed è stato direttamente fornito dal KMD.

Per quanto riguarda l'altitudine, è stato utilizzato il modello digitale del terreno (DEM) della Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) prodotti da United States Geological Survey (USGS) e National Aeronautics and Space Administration (NASA), elaborato nella versione 4.1 dal Consultative Group for International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) per colmare i vuoti in corrispondenza delle regioni non coperte dalla missione (Reuter *et al.*, 2007; Jarvis *et al.*, 2008). La risoluzione spaziale del DEM è di $3''$, ovvero circa 90 m all'equatore³.

³ Il dato è disponibile in mosaici di $5^\circ \times 5^\circ$ all'indirizzo <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata>.

2.3 Metodologia

2.3.1 Preparazione del dataset e calcolo degli indici di variazione

I dati a griglia di temperatura e precipitazione sono stati forniti dal KMD per il periodo 1983-2014 con una risoluzione temporale di 10 giorni. Essi sono quindi stati aggregati per ottenere un'informazione annuale per ciascun punto della griglia, corrispondente alla cumulata annuale per la precipitazione e alla media annuale per temperatura massima e temperatura minima. Nonostante l'andamento bimodale delle precipitazioni, è stato scelto di condurre l'analisi a livello di cumulata annuale per focalizzare lo studio sulla quantità totale di acqua disponibile nel corso dell'anno grazie all'accumulo nel sottosuolo, all'esistenza di pozzi e di sistemi di raccolta artificiali. Per ogni punto griglia, poi, sono state calcolate la media e la retta di regressione per l'intero periodo di studio per ognuna delle tre variabili. Come già sperimentato in letteratura (per esempio, Haag *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2021; Qing *et al.*, 2011), il coefficiente angolare della retta di regressione è stato assunto come indice di variazione del dato nel tempo per il punto.

2.3.2 Rappresentazione e analisi visuale

I dati di media e di variazione per il periodo di studio, risultati dalla fase precedente per ogni punto della griglia del dataset del KMD, sono stati trasferiti in forma cartografica tramite l'utilizzo del software GIS open source QGIS. Nello specifico, è stata utilizzata la funzione di interpolazione spaziale Inverse Distance Weighted (IDW) per passare da una rappresentazione puntuale discreta ad una rappresentazione continua nello spazio, ovvero una superficie omogenea in forma raster adatta ad un'analisi visiva. Questa funzione, grazie alla sua semplicità di applicazione, è largamente utilizzata in ambito meteorologico per la costruzione di dataset ad alta risoluzione a partire da dati puntuali misurati a terra (Garcia *et al.*, 2008; Segond *et al.*, 2007). Come dimostrato da (Yang *et al.*, 2015), essa è adatta anche ad

essere applicata a dati in forma di griglia a loro volta frutto di una stima e non misurati. La funzione è così composta:

$$\hat{R}_0 = \frac{\sum_i^n \frac{R_i}{D_{0i}^p}}{\sum_i^n \frac{1}{D_{0i}^p}}$$

Dove \hat{R}_0 è il dato stimato per il pixel del raster creato, R_i è il dato in entrata per il punto i , D_{0i} è la distanza tra il pixel 0 e il punto i , n è il numero di punti usati per stimare la precipitazione al pixel 0 e p è l'esponente che indica i pesi associati ai diversi punti in relazione alla loro distanza da pixel 0: più alto è l'esponente, più alto è il peso associato ai punti più vicini (Kurtzman *et al.*, 2009). Per l'esecuzione dell'algoritmo IDW con Qgis è stato scelto un esponente $p=0$, ovvero piuttosto alto, di modo che nel risultato, un raster di 300 righe e 311 colonne, venissero conservati i picchi locali.

La rappresentazione cartografica e il confronto tra i diversi risultati hanno permesso l'analisi visuale delle medie e delle variazioni della precipitazione cumulata annuale, della media annuale della temperatura minima e della media annuale della temperatura massima, consentendo l'individuazione di pattern e differenze a livello locale.

2.3.3 Test della robustezza dei risultati

La robustezza dei risultati dell'interpolazione è stata testata tramite la reiterazione della procedura con diversi valori del coefficiente per i dati di variazione della precipitazione annuale, della temperatura massima e della temperatura minima. L'obiettivo di questa operazione era verificare che le tendenze e i *pattern* analizzati fossero sempre riconoscibili, seppur presumibilmente smussati nel caso di valori più bassi del coefficiente. Sono stati scelti quindi un valore basso, uno medio e uno estremamente alto, ovvero $p=2$, $p=5$, $p=15$.

2.3.4 Analisi di correlazione tra precipitazione e altitudine

In una seconda fase, l'ipotesi dell'esistenza di una correlazione in particolare tra variazione altitudinale e variazione nella cumulata annuale delle precipitazioni è stata testata con l'ausilio dell'Indice di Correlazione di Pearson (ICP) (Ramsey e Wilks, 1996). Per questa fase è stato scelto di limitare l'analisi all'area circostante il Mt. Marsabit, che costituisce un'altura isolata, perché i fenomeni atmosferici legati ad una topografia complessa non ne influenzassero il risultato. È stata quindi delineata un'area circolare di 50 km di raggio intorno alla vetta, di modo da comprendere un numero statisticamente sufficiente di punti del dataset meteorologico del KMD, ovvero 456, e da comprendere l'altura nella sua interezza escludendo il deserto del Chalbi. Successivamente sono stati estratti dal DEM i valori di altitudine in corrispondenza dei punti ed è stato calcolato l'ICP tra il dato di variazione di precipitazione per il periodo 1983-2014 e l'altitudine.

3. Risultati e discussione

L'aggregazione dei dati su base annuale e il calcolo degli indici di media e variazione hanno permesso la rappresentazione in carta delle differenze locali. I risultati vengono presentati e discussi in sezioni separate per temperatura e precipitazioni, seguiti dalla descrizione degli esiti del test di robustezza eseguito sui risultati dell'interpolazione.

3.1 Temperatura

Le carte di temperatura massima e minima media (Fig. 3a e Fig. 4a) per il periodo 1983-2014 mostrano la suddivisione della contea in una zona più calda a ovest, in corrispondenza del Chalbi Desert, e una più fresca a est, dove l'altitudine è più elevata e l'influenza dell'Oceano Indiano è probabilmente più evidente. In particolare, è visibile un netto abbassamento in corrispondenza delle Hurry Hills e del Mt. Marsabit.

FIGURA 3 – Carta delle temperature massime medie annuali (a) e carta delle variazioni delle temperature massime medie annuali (b), 1983-2014

FONTE: Elaborazione dell'autrice

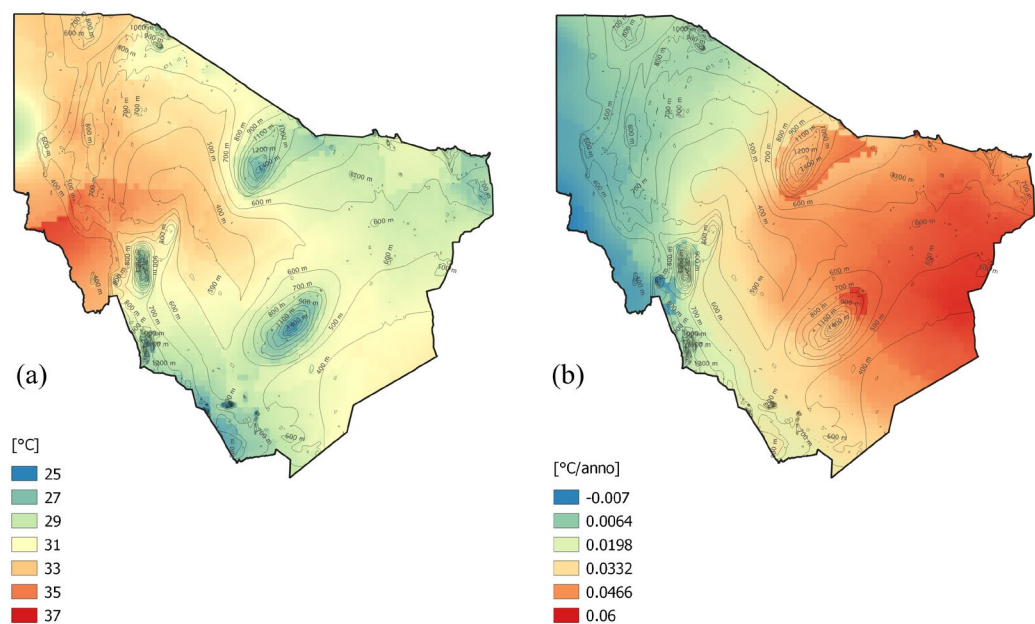
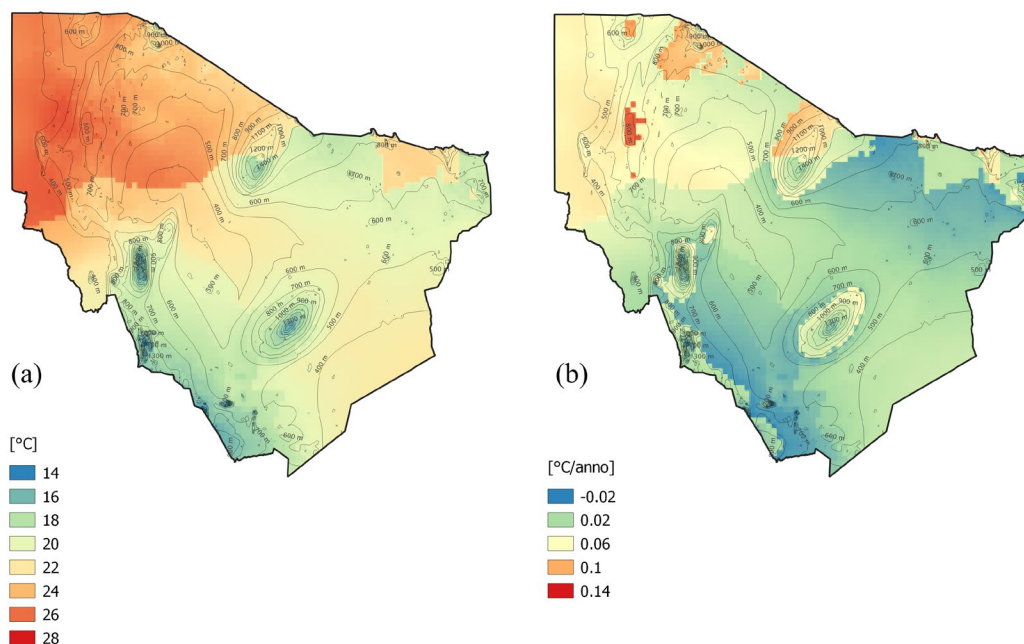


FIGURA 4 - Carta delle temperature minime medie annuali (a) e carta delle variazioni delle temperature massime medie annuali (b), 1983-2014

FONTE: Elaborazione dell'autrice



La carta relativa alla variazione della temperatura media minima (Fig. 4b) suggerisce un'accentuazione nel tempo di questa distribuzione, con temperature addirittura in leggera diminuzione nell'area est e in leggero aumento nell'area desertica. Al contrario, la carta relativa alla variazione della temperatura media massima (Fig. 3b), invece, mostra una tendenza opposta: la temperatura massima annuale è aumentata significativamente durante i 30 anni in analisi nella zona orientale, con tassi che raggiungono circa 0.5°C ogni 10 anni, e diminuita in quella occidentale, seppure con tassi decisamente meno accentuati.

Questo dato sembra essere legato, da un lato, alla conformazione altimetrica dell'area e, dall'altro, alla presenza dell'Oceano Indiano a poche centinaia di chilometri dal confine est della Contea, oltre la Somalia. Se la temperatura massima è aumentata in particolare nelle zone più elevate, infatti, il gradiente di variazione est-ovest rispecchia anche inversamente la distanza, via via maggiore, dalle masse d'acqua oceaniche. Parallelamente al ruolo mitigatore nei confronti delle temperature medie annuali, l'oceano potrebbe avere anche un ruolo nell'innalzamento delle temperature medie massime, grazie al ruolo giocato dalle masse d'acqua oceaniche, la cui temperatura è in aumento, nella formazione

e nello sviluppo di ENSO e IOD.

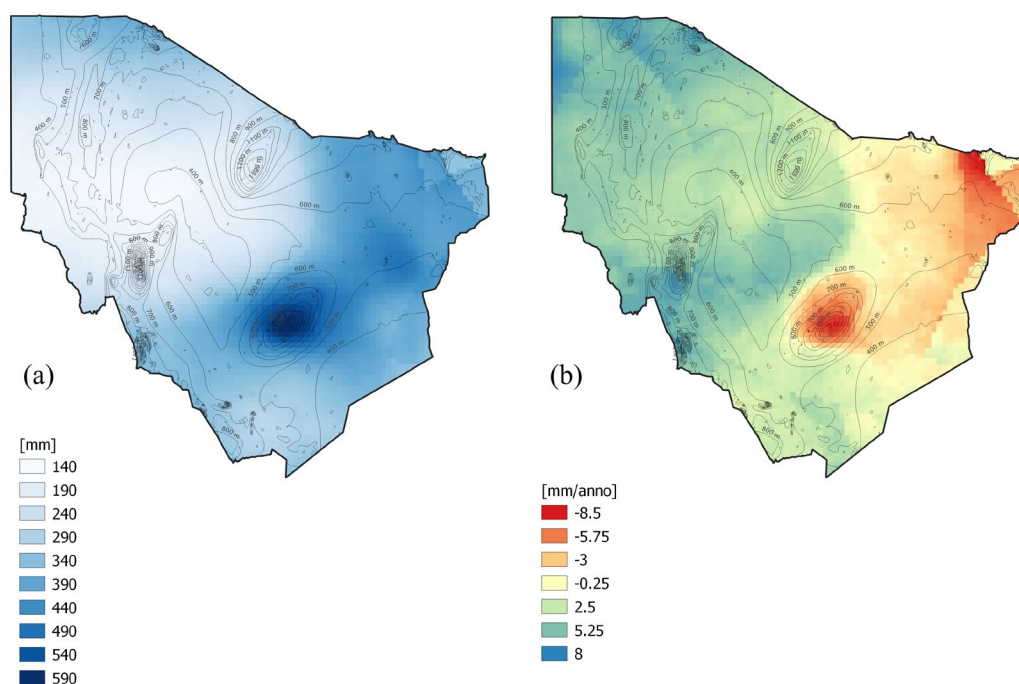
La divergenza tra la distribuzione spaziale della variazione delle temperature minime e quella delle temperature massime, inoltre, suggerisce una diminuzione dell'escursione termica annuale nella parte occidentale della Contea e un suo aumento nella parte orientale. L'escursione termica è un parametro piuttosto influente sulle condizioni di vita della popolazione locale. Può avere un effetto negativo, in particolare, sulla salute degli animali di allevamento, principale fonte di sostentamento per la popolazione locale. Questi, infatti, sono spesso deboli a causa della scarsità di risorse, per cui una brusca variazione delle temperature, per esempio con picchi di calore elevati, può contribuire alla debilitazione del loro organismo, rendendolo più suscettibile ad eventuali agenti patogeni (Grace *et al.*, 2015; Abdela e Jilo, 2016).

3.2 Precipitazione

La distribuzione delle cumulate medie annuali nell'area (Figura 5a) conferma l'esistenza di un'area più secca in corrispondenza del Chalbi Desert e di una più umida in corrispondenza delle alture. Il picco di precipitazioni sul Mt. Marsabit è particolarmente evidente.

FIGURA 5 - Carta delle cumulate annuali medie (a) e carta delle variazioni delle cumulate annuali medie delle precipitazioni (b), 1983-2014.

FONTE: Elaborazione dell'autrice



La distribuzione spaziale della variazione nella cumulata tra il 1983 e il 2014 (Fig. 5b) evidenzia un leggero aumento delle precipitazioni sull'area desertica e una loro netta diminuzione su alcune aree elevate, in particolare sul Mt. Marsabit. Questo fenomeno suggerisce l'esistenza di una correlazione tra variazione delle precipitazioni e altitudine, che è stato approfondito tramite l'analisi incentrata su un'area circolare di 50 km di raggio circostante la vetta. È stato calcolato il CCP tra i valori di variazione di precipitazione e di altitudine e tra i valori di variazione di precipitazione e di cumulata media annuale. I risultati, riportati in tabella 1, confermano l'esistenza

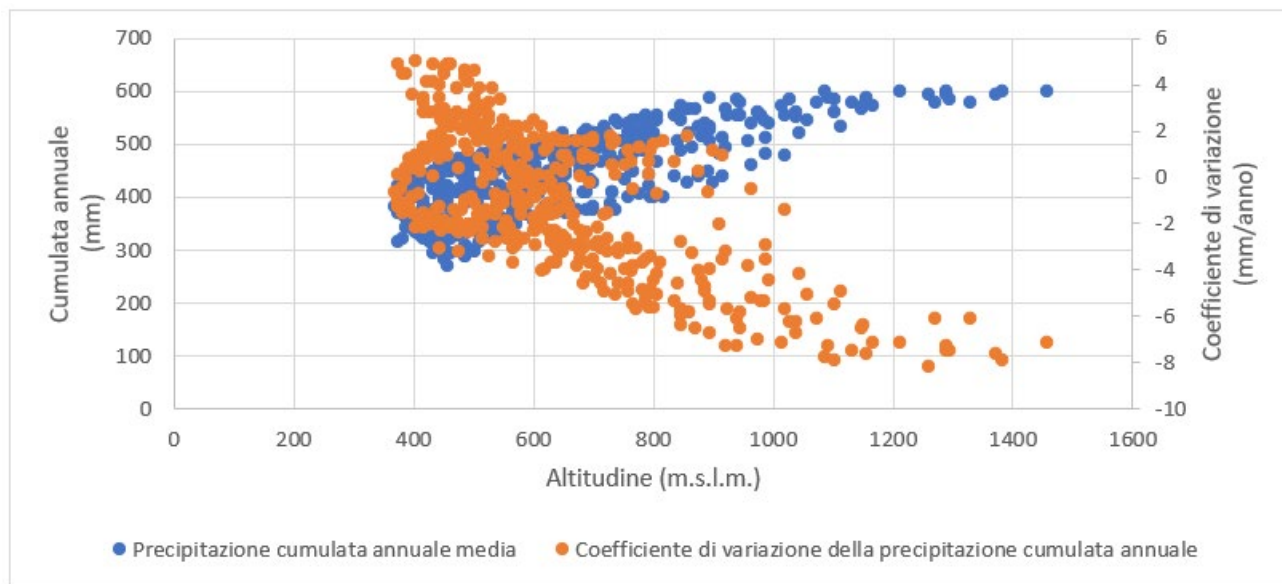
di una correlazione negativa statisticamente significativa per entrambe le coppie di variabili, evidente anche nella sua rappresentazione in forma grafica di figura 6.

In particolare, una correlazione negativa estremamente forte esiste tra la precipitazione cumulata annuale e la sua variazione. Questo dato indica una forte diminuzione delle piogge nelle aree storicamente più umide, che ricoprono un ruolo di bacino idrico fondamentale per la Contea, e suggerisce una riduzione delle piogge orografiche. Il fenomeno potrebbe essere legato direttamente all'aumento delle temperature, che causa l'aumento dell'altitudine necessaria

TABELLA 1 - Valori del Coefficiente di Correlazione di Pearson (CCP) e di P-value associato alla correlazione, calcolati per altitudine e variazione di precipitazione cumulata annuale e per variazione di precipitazione cumulata e precipitazione cumulata media annuale (1983-2014)

Variabili	CCP	P-Value
Variazione di precipitazione e altitudine	-0.704	1.35e-69
Variazione di precipitazione e cumulata media annuale	-0.929	2.87e-198

FIGURA 6 – Rappresentazione grafica della correlazione tra altitudine e variazione di precipitazione cumulata annuale e tra variazione di precipitazione cumulata e precipitazione cumulata media annuale (1983-2014)



perché il vapore acqueo contenuto nelle masse d'aria condensi e precipiti, ed è da considerarsi in parallelo con i risultati di Los *et al.* (2019) sulla diminuzione delle precipitazioni occulte nell'area a causa della variazione dell'altezza media delle nuvole.

3.3 Robustezza dei risultati di interpolazione

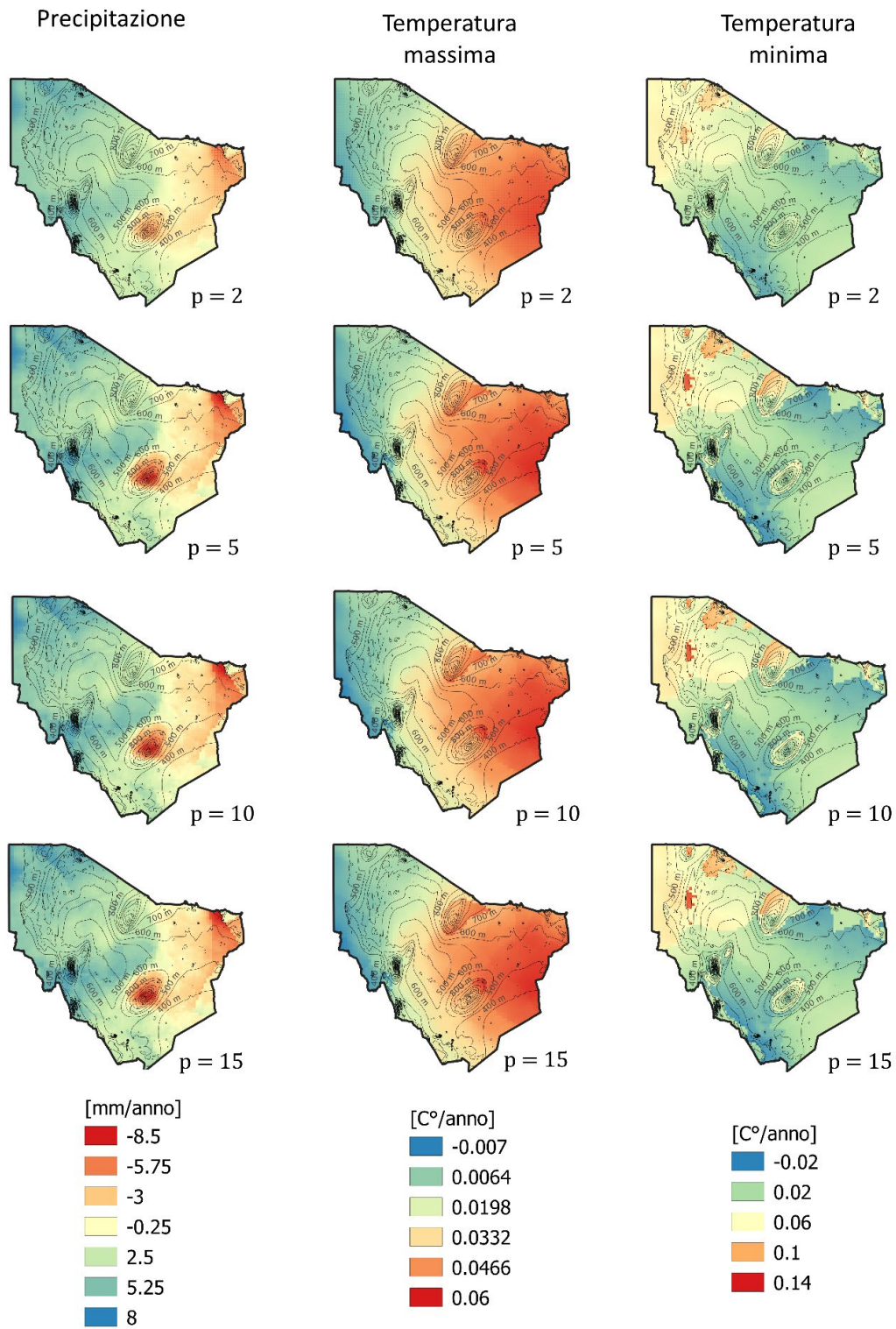
Per testare la robustezza dell'analisi, l'IDW è stata replicata per i dati di variazione di precipitazione e temperatura variando il coefficiente. I risultati sono mostrati in figura 7. Come previsto, i *pattern* di variazione analizzati e discussi nei paragrafi precedenti risultano piuttosto smussati per , mentre le carte per , e per presentano differenze trascurabili ai fini di un'analisi visuale. In generale, i *pattern* non differiscono nelle diverse carte per tutte e tre le variabili e sono perfettamente riconoscibili in tutti i casi, dimostrando la robustezza dei risultati.

4. Conclusioni

La Contea di Marsabit presenta un clima arido, caratterizzato da eventi estremi con cadenza irregolare, come siccità, piogge eccezionali e alluvioni. La popolazione, la cui fonte primaria di sostentamento è l'allevamento in forma pressoché nomade, fa affidamento su risorse scarse ulteriormente minacciate da questi eventi, esacerbati dall'impatto del cambiamento climatico. Per questo motivo, un'analisi a livello locale degli effetti del cambiamento climatico sull'area è necessaria al fine di poter sviluppare strategie di adattamento efficaci.

In questo studio sono state prese in considerazione le distribuzioni spaziali della temperatura massima media, della temperatura minima media e della precipitazione cumulata annuale, nonché delle loro variazioni tra il 1983 e il 2014. I risultati indicano un netto innalzamento delle temperature massime in corrispondenza della zona orientale, più elevata e più prossima all'Oceano Indiano, la cui temperatura media superficiale è chiaramente aumentata negli ultimi decenni. I picchi di calore possono avere effetti negativi per la salute della popolazione e, in particolare, per la salute degli animali

FIGURA 7 – Test di robustezza dei risultati di interpolazione, eseguito sul dato di coefficiente angolare della variazione delle precipitazioni e delle temperature



FONTE: Elaborazione dell'autrice

di allevamento su cui essa basa il suo sostentamento, già debilitati da risorse idriche e alimentari scarse.

L'area orientale della Contea è anche interessata dalla diminuzione delle precipitazioni, soprattutto per quanto riguarda quelle orografiche che coinvolgono le alture. Il ruolo di bacino idrico per la Contea del Mt. Marsabit è perciò minacciato. Questo risultato è in linea con quelli degli studi precedenti che hanno analizzato le serie storiche per l'area e, come essi, in netto contrasto con le previsioni dei principali modelli climatici, inserendosi perciò a sua volta nella cornice dell'*East African climate paradox*. La scala locale di questo studio, tuttavia potrebbe in parte spiegare le differenze con le proiezioni dei modelli climatici. Visto l'andamento annuale bimodale delle precipitazioni nella regione, inoltre, sono necessari maggiori approfondimenti sulla distribuzione stagio-

nale della variazione. Per poter evidenziare eventuali cambiamenti nella ricorrenza di eventi estremi, infine, è essenziale esaminare serie temporali di dati meteorologici più lunghe. Questa ulteriore analisi permetterebbe di far luce sulla relazione tra mutazioni a livello locale e cambiamenti nei fenomeni di portata globale, come ENSO, IOD e ZCIT.

5. Ringraziamenti

A chiusura del presente lavoro, è necessario ringraziare i partner del progetto "One Health": Comitato di Collaborazione Medica (capofila di progetto), Translate into Meaning, Vétérinaires sans Frontiers-Germany e Politecnico di Torino.

Bibliografia

- Abdela N. e Jilo K. (2016), "Impact of Climate Change on Livestock Health: A Review", *Global Veterinaria*, 16(5), pp. 419–424. doi:10.5829/idosi.gv.2016.16.05.10370.
- Aleixandre-Benavent R., Aleixandre-Tud J.L., Castell O-Cogollos L. e Aleixandre J.L. (2017), "Trends in scientific research on climate change in agriculture and forestry subject areas (2005–2014)", *Journal of Cleaner Production*, (147), pp. 406–418. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.112.
- County Government of Marsabit (2018), "Climate Change mainstreaming guidelines. Agriculture, Livestock and Fisheries sector", Marsabit County Government, Marsabit, Kenya.
- Dabasso B.H. e Okomoli M.O. (2015), "Changing pattern of local rainfall: Analysis of a 50-year record in central Marsabit, northern Kenya", *Weather*, pp. 285–289. doi:10.1002/wea.2539.
- Dinku T., Thomson M.C., Cousin R., del Corral J., Ceccato P., Hansen J. e Connor S.J. (2018), "Enhancing National Climate Services (ENACTS) for development in Africa", *Climate and Development*, 10(7), pp. 664–672. doi:10.1080/17565529.2017.1405784.
- Dutra E., Di Giuseppe F., Wetterhall F. e Pappenberger F. (2013), "Seasonal forecasts of droughts in African basins using the Standardized Precipitation Index", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, pp. 2359–2373. doi:10.5194/hess-17-2359-2013.
- Garcia M., Peters-Lidard C.D. e Goodrich D.C. (2008), "Spatial interpolation of precipitation in a dense gauge network for monsoon storm events in the southwestern United States", *Water Resources Research*, 44(5). doi:10.1029/2006WR005788.
- Grace D., Bett B., Lindhal J. e Robinson T. (2015), *Climate and Livestock Disease: assessing the vulnerability of agricultural systems to livestock pests under climate change scenarios*, in CCAFS Working Paper No. 116, Copenhagen, Denmark.
- Haag I., Jones P.D. e Samimi C. (2019), "Central Asia's changing climate: How temperature and precipitation have changed across time, space, and altitude", *Climate*, 7(10). doi:10.3390/cli7100123.
- Herrero M., Addison J., Bedelian C., Carabine E., Havlik P., Henderson B., Van De Steeg J. e Thornton P.K. (2016), "Climate change and pastoralism: impacts, consequences and adaptation", *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.*, 35(2), pp. 417–433. doi:10.20506/rst/35.2.2533.
- Hu W., Yao J., He Q. e Chen J. (2021), "Elevation-dependent trends in precipitation observed over and around the tibetan plateau from 1971 to 2017", *Water (Switzerland)*, 13(20), pp. 1–17. doi:10.3390/w13202848.
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A. e Guevara E. (2008), "Hole-field seamless SRTM data V4", International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).
- Karanja F. e Mutua F. (2000), "Reducing the impact of environmental emergencies through Early Warning and preparedness-the case of el Niño-Southern Oscillation (ENSO)", *UNFIP/UNEP/NCAR/WMO/DNDR/UNU*.
- Kurtzman D., Navon S. e Morin E. (2009), "Improving interpolation of daily precipitation for hydrologic modelling: spatial patterns of preferred interpolators", *Hydrological Processes*, 23(23), pp. 3281–3291. doi:10.1002/hyp.7442.
- Los S.O., Street-Perrott F.A., Loader N.J., Froyd C.A., Cuni-Sanchez A. e Marchant R.A. (2019), "Sensitivity of a tropical montane cloud forest to climate change, present, past and future: Mt. Marsabit, N. Kenya", *Quaternary Science Reviews*, 218, pp. 34–48. doi:10.1016/j.quascirev.2019.06.016.
- McCarthy J. J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. e White K.S. (2001), *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

- MoALF (2018), "Climate Risk Profile for Marsabit County. Kenya County Climate Risk Profile Series". The Kenya Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries (MoALF), Nairobi, Kenya.
- Muhati G.L., Olago D. e Olaka L. (2018), "Past and projected rainfall and temperature trends in a sub-humid Montane Forest in Northern Kenya based on the CMIP5 model ensemble", *Global Ecology and Conservation*, 16, p. e00469. doi:10.1016/j.gecco.2018.e00469.
- Ngaina J. e Mutai B. (2013), "Observational evidence of climate change on extreme events over East Africa", *Global Meteorology*, 2(1), p. 2. doi:10.4081/gm.2013.e2.
- Ogalo L., Owiti Z. e Mutemi J. (2008), "Linkages between the Indian Ocean Dipole and East African Rainfall Anomalies", *Journal of Kenya Meteorological Society*, 2 (1), pp. 3–17.
- Omeny P.A., Okoola R., Hendon H. e Wheeler M. (2008), "East African Rainfall Variability Associated with the Madden-Julian Oscillation", *J.Kenya Meteorol. Soc*, 2(2), pp. 105–114.
- Omondi P.A. o., Awange J.L., Forootan E., Ogalo L.A., Barakiza R., Girmaw G.B., Fesseha I., Kululetera V., Kilembe C., Mbatia M.M., Kilavi M., King'uyu S.M., Omeny P.A., Njogu A., Badr E.M., Musa T.A., Muchiri P., Bamanya D. e Komutunga E. (2014), "Changes in temperature and precipitation extremes over the Greater Horn of Africa region from 1961 to 2010", *International Journal of Climatology*, 34(4), pp. 1262–1277. doi:10.1002/joc.3763.
- Ongoma V., Chen H. e Omony G.W. (2016), "Variability of extreme weather events over the equatorial East Africa, a case study of rainfall in Kenya and Uganda", *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1–2), pp. 295–308. doi:10.1007/s00704-016-1973-9.
- Orindi V.A. e Ochieng A. (2005), "Case Study 5: Kenya Seed Fairs as a Drought Recovery Strategy in Kenya", *IDS Bulletin*, 36(4), pp. 87–102. doi:10.1111/j.1759-5436.2005.tb00236.x.
- Ouma J.O., Olang L.O., Ouma G.O., Oludhe C., Ogallo L. e Artan G. (2018), "Magnitudes of Climate Variability and Changes over the Arid and Semi-Arid Lands of Kenya between 1961 and 2013 Period", *American Journal of Climate Change*, 07(01), pp. 27–39. doi:10.4236/ajcc.2018.71004.
- Qing Y., Zhu-Guo M., Liang C. e Zhu-Guo M.A. (2011), "A Preliminary Analysis of the Relationship between Precipitation Variation Trends and Altitude in China", *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4(1), pp. 41–46. doi:10.1080/16742834.2011.11446899.
- Reuter H.I., Nelson A. e Jarvis A. (2007), "An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data", *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9), pp. 983–1008. doi:10.1080/13658810601169899.
- Rintoul S., Aoki S., Campos E., Chambers D., Feely R., Gulev S., Johnson G., Josey S., Kostianoy A., Mauritzen C., Roemmich D., Talley L., Wang F., Qin D., Plattner G., Tignor M., Allen S., Boschung J., Nauels A., et al. (2013), *Observations: Ocean. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Rowell D.P., Booth B.B.B., Nicholson S.E. e Good P. (2015), "Reconciling past and future rainfall trends over East Africa", *Journal of Climate*, 28(24), pp. 9768–9788. doi:10.1175/JCLI-D-15-0140.1.
- Santos R.M. e Bakhshoodeh R. (2021), "Climate change/global warming/climate emergency versus general climate research: comparative bibliometric trends of publications", *Heliyon*, 7(11). doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08219.
- Schmocker J., Liniger H.P., Ngeru J.N., Brugnara Y., Auchmann R. e Brönnimann S. (2016), "Trends in mean and extreme precipitation in the Mount Kenya region from observations and reanalyses", *International Journal of Climatology*, 36(3), pp. 1500–1514. doi:10.1002/joc.4438.
- Segond M.L., Neokleous N., Makropoulos C., Onof C. e Maksimovic C. (2007), "Simulation and spatio-temporal disaggregation of multi-site rainfall data for urban drainage applications", *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), pp. 917–935. doi:10.1623/hysj.52.5.917.
- Shongwe M.E., van Oldenborgh G.J., van den Hurk B. e van Aalst M. (2011), "Projected Changes in Mean and Extreme Precipitation in Africa under Global Warming. Part II: East Africa", *Journal of Climate*, 24(14), pp. 3718–3733. doi:10.1175/2010JCLI2883.1.
- State Department for Development of the Arid and Semiarid Lands (2018), *Strategic plan (2018 - 2022): Unlocking the Potential of ASALS for Accelerated National Development*. Nairobi. Disponibile a: <http://www.asals.go.ke/wp-content/uploads/2019/05/ASAL-Report-Final-for-printing.pdf> (Ultimo accesso: 12 November 2020).
- Thiongo K. e Ngaira J.K. (2019), "Strategies used by farmers to cope with drought in Machakos County, Kenya", *IJRDO-Journal Of Applied Management Science*, (June).
- Uhe P., Philip S., Kew S., Shah K., Kimutai J., Mwangi E., van Oldenborgh G.J., Singh R., Arrighi J., Jjemba E., Cullen H. e Otto F. (2018), "Attributing drivers of the 2016 Kenyan drought", *International Journal of Climatology*, 38, pp. e554–e568. doi:10.1002/joc.5389.
- Vigna I., Bigi V., Pezzoli A. e Besana A. (2020), "Comparison and bias-correction of satellite-derived precipitation datasets at local level in northern Kenya", *Sustainability (Switzerland)*, 12(7). doi:10.3390/su12072896.
- Wilks D.S. (1995), *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press.

Williams A.P., Funk C., Michaelsen J., Rauscher S.A., Robertson I., Wils T.H.G., Koprowski M., Eshetu Z. e Loader N.J. (2012), "Recent summer precipitation trends in the Greater Horn of Africa and the emerging role

of Indian Ocean sea surface temperature", *Climate Dynamics*, 39(9–10), pp. 2307–2328. doi:10.1007/s00382-011-1222-y.

Yang X., Xie X., Liu D.L., Ji F. e Wang L. (2015), "Spatial Interpolation of

Daily Rainfall Data for Local Climate Impact Assessment over Greater Sydney Region", *Advances in Meteorology*, 2015. doi:10.1155/2015/563629.