



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria per l' Ambiente e il
Territorio

Tesi di laurea magistrale

**Scenari a scala globale della futura impronta
idrica della produzione cerealicola.**

Relatori:

Prof. Francesco Laio

Prof. Luca Ridolfi

Prof. Marta Tuninetti

Candidato:

Nicola Cocco

Anno accademica 2020/2021

Ringraziamenti

Sono stati numerosi i compagni di viaggi che ho incontrato durante il mio percorso. Alcuni di questi hanno fatto una breve comparsa, altri mi hanno accompagnato per l'intero tragitto e continuano a farlo, altri ancora mi hanno sorpreso, arrivando proprio nelle ultime fasi del lavoro di tesi che conclude il mio percorso universitario. Per tutti loro nutro profonda gratitudine, per avermi presentato delle sfide, per avermi aiutato a mettermi in dubbio e migliorarmi e, soprattutto, per l'ispirazione che sempre mi hanno dato sotto innumerevoli aspetti, senza la quale non sarei la persona che sono adesso.

Alla mia famiglia dedico questa tesi, come simbolo della conclusione di un percorso formativo e di vita, che non sarebbe stato possibile senza il loro aiuto, e di possibilità future che non sarebbero potute esistere senza i loro sacrifici e il loro sostegno.

Infine un sincero ringraziamento va ai miei cari relatori, Francesco Laio, Luca Ridolfi e Marta Tuninetti. Durante tutto il lavoro svolto per la realizzazione di questa tesi, hanno sempre dimostrato disponibilità, sostegno e incoraggiamento nei momenti di difficoltà, fornendo sempre spunti e consigli ispiratori, sia in termini didattici che personali.

Grazie a tutti voi.

Indice

1	Introduzione.....	1
2	Il modello LPJml.....	6
2.1	Fenologia della pianta.....	7
2.2	Superficie fogliare e crescita.....	7
2.3	Evapotraspirazione.....	9
2.4	Umidità del suolo.....	11
2.5	Data di semina.....	12
2.6	Aree coltivate e irrigazione.....	12
2.7	Input climatici.....	14
2.8	Coltivazione consociata.....	14
3	Procedura di calcolo.....	15
3.1	Database ISIMIP.....	15
3.2	Media fra i quattro modelli climatici.....	18
3.3	Filtro con aree MIRCA 2000.....	20
3.4	Calcolo resa, evapotraspirazione e impronta idrica medi.....	23
3.5	Aggregazione a scala nazionale.....	24
4	Validazione modello.....	26
4.1	Validazione serie storica: intervallo 1997-2003.....	27
4.2	Calibrazione.....	36
4.3	Validazione resa calibrata.....	38
4.4	Validazione impronta idrica calibrata.....	39
4.5	Validazione serie futura: intervallo 2010-2016.....	44
5	Risultati.....	52
5.1	Un'istantanea sul presente.....	52
5.2	Proiezioni future.....	55
5.3	Variazioni percentuali a scala nazionale.....	60
6	Conclusioni.....	80
7	BIBLIOGRAFIA:.....	83

1 INTRODUZIONE.

La produzione di cibo è aumentata costantemente negli ultimi decenni, parallelamente alla forte crescita demografica: dal 2000 la popolazione è cresciuta di 1.65 miliardi, e si prevede una crescita continua nei prossimi decenni [1]. Contemporaneamente con la crescita demografica, numerose nazioni hanno sperimentato un miglioramento del benessere economico che ha portato a un cambiamento delle abitudini alimentari [2]. In particolare è emerso come al crescere del prodotto interno lordo e del reddito nazionale lordo, si assista a un cambiamento della dieta verso un maggiore consumo di grassi e proteine, nonché a un consumo calorico pro capite superiore [3]. Il fabbisogno calorico mondiale sta quindi crescendo più rapidamente del previsto, in funzione del modificarsi delle abitudini alimentari nei paesi più ricchi.

Questo ha portato negli ultimi decenni a un sistema di produzione e distribuzione sempre più complesso. Si è infatti verificato un incremento dei flussi commerciali e una maggiore globalizzazione dei prodotti agricoli [3; 4]: recenti studi hanno dimostrato che circa un quarto del cibo prodotto, da fonti vegetali e animali, viene commerciato a livello internazionale [2]. Inoltre, all'interno di questo sistema commerciale, numerose nazioni hanno soddisfatto il proprio fabbisogno tramite l'importazione piuttosto che tramite la produzione, rendendosi dipendenti dalla produzione esterna per garantire sufficienza alimentare.

Le più recenti stime suggeriscono che la popolazione mondiale attuale, pari a 7.79 miliardi, crescerà fino a 10.67 miliardi nel 2080, con un conseguente incremento del fabbisogno calorico; lo studio di Tilman (2011) evidenzia che entro il 2050 la domanda di prodotti agricoli, in termini calorici, raddoppierà, la pressione nei confronti del settore agricolo si farà sempre più forte e di conseguenza sarà necessario adottare strategie per produrre cibo sufficiente a soddisfare la domanda. Questo obiettivo può essere raggiunto fondamentalmente in due modi: incrementando la superficie coltivata o massimizzando la produttività delle aree coltivate esistenti. Entrambe queste strategie implicano tuttavia delle criticità. La prima comporta la sottrazione di ambiente naturale e conseguentemente un forte impatto ambientale: la rimozione di habitat naturale rappresenta infatti una minaccia nei confronti della biodiversità, riducendo non solo la superficie disponibile per il mantenimento degli ecosistemi, ma promuovendone il frazionamento. Strategie agricole simili sono già state attuate negli ultimi decenni, portando a una drastica riduzione dell'habitat naturale, causando l'estinzione di diverse specie e riducendo la biodiversità in numerosi ambienti.

La seconda alternativa rappresenta la massimizzazione della resa nelle aree coltivate esistenti: al giorno d'oggi i paesi più poveri e ancora in via di sviluppo,

coltivano in modo estensivo avendo a disposizione poco capitale per il progresso tecnico e tecnologico del settore agricolo (Crop yield Gaps) [3].

Massimizzando la resa in queste regioni sarebbe possibile attuare un incremento della produzione e uno sfruttamento più efficace della superficie coltivata, senza intaccare direttamente l'habitat naturale. La realizzazione di questo obiettivo comporta, tuttavia, l'impiego di investimenti necessari per espandere la superficie equipaggiata per l'irrigazione, l'impiego di fertilizzanti e pesticidi, l'ibridazione di specie vegetali ad alta resa, lo studio e lo sviluppo di tecniche agricole adeguate alle specifiche condizioni locali e altri progressi tecnici [3]. In questo modo gli oneri connessi alla produzione agricola sarebbero divisi in modo più equo a livello globale, portando ad uno sfruttamento meglio distribuito anche della risorsa idrica, necessaria per l'irrigazione [3].

Allo stato attuale, la strategia che si sta palesando consiste nell'incrementare la resa nelle nazioni più ricche, in virtù del maggiore capitale disponibile e delle infrastrutture necessarie, mentre nelle nazioni più povere prevale il disboscamento e la successiva coltivazione delle aree. Nell'ipotesi che questo comportamento prosegua, secondo lo studio di Tilman (2011), si prevede che nel 2050 circa un miliardo di ettari di superficie sarà disboscato per far spazio all'agricoltura in espansione, con conseguente incremento nelle emissioni di gas serra e di azoto; il disboscamento porterà inoltre a una riduzione della superficie arborea, che attualmente funge da cuscinetto, assorbendo parte dell'anidride carbonica emessa. Al contrario, l'incremento della resa nelle nazioni meno progredite, porterebbe nel 2050 al disboscamento di soli 0.2 miliardi di ettari, e ad una consistente riduzione delle emissioni di gas serra e azoto connesse all'agricoltura.

La scelta della strategia da attuare condizionerà quindi l'evoluzione del cambiamento climatico che è già sperimentiamo. Le ulteriori modificazioni che subirà il clima, con un intensificarsi degli eventi climatici estremi, uno spostamento delle aree desertiche, un aumento della temperatura e delle concentrazioni di anidride carbonica, [5] impatterà direttamente sul settore agricolo.

Il cambiamento climatico impatterà anche sull'Impronta Idrica Unitaria (Water Footprint - WF); il WF è indicatore che consente di definire la produzione di una specie vegetale in termini di quantità di acqua necessaria per la sua coltivazione (metricubi di acqua necessari alla produzione di una tonnellata di prodotto, o, analogamente, i litri per chilogrammo di produzione).

Il WF è:

- inversamente proporzionale alla resa, e
- direttamente proporzionale all'evapotraspirazione

Si intuisce come l'impatto del cambiamento climatico sulla resa e l'impronta idrica possa essere molto complesso: ad esempio l'aumento della temperatura media globale comporta un incremento dell'impronta idrica, ma contemporaneamente potrebbe incrementare o ridurre la resa a seconda delle condizioni locali e della tipologia vegetale considerata. In concomitanza con

l'incremento della temperatura media globale si prevede inoltre, in alcune zone, un intensificarsi delle precipitazioni, che può portare a un aumento dell'umidità del suolo contrastando l'effetto dell'innalzamento della temperatura [2]. In futuro si stima inoltre un incremento delle fluttuazioni inter-annuali di resa, specialmente nelle basse latitudini, con impatti negativi più accentuati nei climi tropicali, dove si assiste anche a una riduzione del periodo disponibile per la crescita di cereali [6].

Negli ultimi anni la comunità scientifica sta indagando con grande interesse un ulteriore fattore di impatto nei confronti del settore agricolo, rappresentato dalla CO₂ atmosferica. La corretta crescita dei prodotti agricoli deriva dall'efficienza dei processi fotosintetici, intimamente connessi con i processi di evapotraspirazione e assimilazione del carbonio, i quali avvengono tutti attraverso gli stomi. Studi recenti hanno dimostrato come l'esposizione a livelli elevati di anidride carbonica possa condurre a particolari adattamenti strutturali da parte della pianta: la riduzione della superficie specifica degli stomi, le modificazioni nella loro forma e distribuzione sulla foglia e la riduzione del tempo di apertura degli stomi necessario ad assimilare sufficiente anidride carbonica per sostenere la fotosintesi [7]. Queste alterazioni comportano la riduzione dell'evapotraspirazione e quindi dell'acqua necessaria alla pianta per un corretto sviluppo [7; 8]. Numerosi studi, in situazioni controllate, hanno dimostrato come l'effetto dell'anidride carbonica abbia un impatto anche sui processi fotosintetici, operando un effetto fertilizzante e incrementando la resa delle colture [8]. L'anidride carbonica ha quindi un doppio effetto sulle specie vegetali: da una parte l'aumento dell'efficienza dei processi fotosintetici che comporta l'incremento della resa, con conseguente riduzione dell'impronta idrica e, dall'altra, la riduzione della dimensione degli stomi e del loro tempo di apertura da cui deriva una minore evapotraspirazione.

L'importanza del settore agricolo per garantire il soddisfacimento del fabbisogno calorico e la complessità delle interazioni clima-agricoltura, sta suscitando un sempre maggiore interesse da parte della comunità scientifica. L'indagine degli impatti futuri del cambiamento climatico ha portato allo sviluppo di modelli matematici, capaci di simulare con sempre maggiore completezza i numerosi fattori coinvolti nel fenomeno. Con lo scopo di esplorare l'impatto del cambiamento climatico, dell'innalzarsi delle temperature e dell'incremento delle concentrazioni di CO₂ sull'agricoltura, si è quindi deciso di proiettare nel futuro la resa agricola e l'impronta idrica unitaria ad essa associata tramite il modello ecosistemico LPJml [9]. Questo modello simula i processi biofisici e biochimici alla base della crescita dei principali tipi di cereali coltivati [9]: attraverso la simulazione dinamica dei processi fotosintetici e di allocazione del carbonio, del ciclo dell'acqua, delle fluttuazioni stagionali di CO₂ e dello sviluppo fenologico della pianta, il modello è capace di simulare e proiettare nel futuro la resa agricola e l'evapotraspirazione

associata alla coltivazione dei cereali. Attraverso i dati climatici, anch'essi simulati, è inoltre possibile indagare l'impatto di due distinti scenari di cambiamento climatico:

1. RCP 2.6
2. RCP 6.0.

Il primo rappresenta lo scenario più ottimista, definito scenario di mitigazione e caratterizzato da una riduzione elevata delle emissioni: questo scenario prevede il raggiungimento delle emissioni massime nel 2020, a cui segue un repentino calo che porterà le emissioni a zero nel 2080, con il raggiungimento del picco di concentrazione di anidride carbonica nel 2050, pari a 440 ppm [5]; l'obiettivo associato a questo scenario è quello di mantenere il riscaldamento globale inferiore a 2°C rispetto ai livelli preindustriali. Lo scenario RCP 6.0, denominato scenario di mitigazione, prevede invece uno scarso intervento nella riduzione delle emissioni, che raggiungerebbero il picco emissivo nel 2060, con una successiva riduzione, che si assesterebbe a valori superiori a quelli odierni nel 2100 [5]. A questo scenario è associato un riscaldamento compreso tra +1.4°C e +3.1°C rispetto ai livelli preindustriali.

Nel corso della presente analisi si è deciso di mantenere le aree coltivate fisse all'anno 2000: questa approssimazione conferisce all'analisi un orientamento molto interessante, permettendo di attuare un vero e proprio esperimento che consente di evidenziare cosa accadrebbe al settore agricolo in conseguenza del cambiamento climatico, senza nessun intervento antropico. Orientando l'analisi in questa direzione è stato possibile sfruttare le carenze legate alla modellazione di fenomeni complessi, come il clima e l'agricoltura, ponendo in totale evidenza gli effetti del cambiamento climatico e dell'effetto fertilizzante della CO₂.

La modificazione del clima che si sta verificando è un fenomeno globale, tuttavia, la sua manifestazione a scala locale sarà molto varia. La produzione cerealicola inoltre si estende su diverse zone climatiche, con una distribuzione eterogenea delle tipologie vegetali coltivate: per questo motivo si è deciso di effettuare un'analisi su scala globale, indagando la variazione di impronta idrica in tutte le zone e nazioni coltivatrici dei rispettivi cereali.

I cereali analizzati sono:

- grano;
- mais;
- riso;
- soia.

Secondo lo studio di D'Odorico et al (2014) nel 2009 questi cereali coprivano il 50% del fabbisogno calorico globale, di cui il grano costituisce il 20%, il mais il 13%, il riso 16% e l'8% la soia. Analizzando quattro diverse tipologie di cereali sarà inoltre

possibile osservare le loro differenti risposte al cambiamento climatico, sia nel tempo che nello spazio.

Nel Capitolo 2, si descriverà nel dettaglio il modello ecosistemico LPJml e la parametrizzazione in esso previste per la simulazione di grano, mais, riso e soia. Nel Capitolo 3 verrà esposta la procedura di calcolo e saranno descritti i dati in ingresso utilizzati e la loro fonte. Il Capitolo 4 riguarderà la procedura di confronto fra i dati simulati e i dati osservati, si descriverà la procedura di calibrazione attuata nel presente lavoro e le motivazioni che l'hanno resa necessaria. Nel Capitolo 5 si discuteranno infine le proiezioni future di impronta idrica, a scala globale e a scala nazionale, per le quattro tipologie di cereali analizzate.

2 IL MODELLO LPJML.

In questo capitolo verranno descritte le caratteristiche del modello LPJml e le parametrizzazioni in esso adottate per la simulazione dei fenomeni coinvolti nello sviluppo delle piante. Analizzeremo la schematizzazione della pianta e delle sue parti, la simulazione dei processi fotosintetici, di sviluppo e di maturazione, la determinazione della data di semina nonché la parametrizzazione adottata per la descrizione dei fenomeni di evapotraspirazione e umidità del suolo. Descriveremo quindi i dati climatici in ingresso al modello, la determinazione delle superfici coltivate e la loro distinzione in coltivazioni con e senza irrigazione artificiale. Osserveremo inoltre come esistano delle differenze nella parametrizzazione delle diverse specie vegetali, necessaria per tenere conto delle caratteristiche specifiche delle quattro tipologie di cereali analizzate.

Il modello LPJml simula la complessa interazione fra vegetazione, suolo e clima, simulando l'allocazione del carbonio nelle varie parti della pianta (apparato fogliare, radici e organi fruttiferi), il trasferimento del carbonio al suolo e i suoi strati, e il bilancio idrico con l'ambiente. Tutte le variabili vengono simulate in modo dinamico e sono interconnesse fra loro, così da poter osservare l'effetto della progressiva modificazione del clima e della composizione atmosferica in tutti i suoi aspetti. Questo aspetto è fondamentale per simulare il rapporto di reciproca influenza tra clima e vegetazione e per poter tenere conto del progressivo effetto dell'incremento di CO₂ nell'atmosfera [9;11].

Una modellazione dinamica dei fenomeni di crescita delle specie vegetali, funzione dei parametri climatici e atmosferici e la profonda interconnessione fra queste variabili, sono aspetti fondamentali nella valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici futuri sull'agricoltura. La capacità del LPJml di simulare in modo dinamico questi aspetti, in congiunzione alla sua comprovata applicabilità nello studio di vegetazione, del settore agricolo e delle risorse idriche, dimostrata da numerosi studi [9;10;11;12], nonché la valutazione effettuata nel lavoro di Christoph et al (2017) [13], hanno motivato la scelta dell'impiego dell'LPJml.

Di seguito verranno discusse nel dettaglio le modalità di simulazione di data di semina, fenologia, sviluppo fogliare, processi fotosintetici, irrigazione, umidità del suolo, ciclo dell'acqua ed evapotraspirazione; per approfondimenti dettagliati si veda Bondeau et al (2007) [9], articolo di riferimento in materia LPJml.

L'LPJml viene quindi affiancato a un modello climatico per la generazione dei dati di ingresso necessari, quali temperatura, precipitazione, composizione atmosferica; nel corso del presente lavoro sono stati utilizzati quattro modelli climatici (GFDL-ESM2M, HADGEM2-ES, ipsl-cm5a-lr, MIROC5), con lo scopo di conferire robustezza al lavoro avendo a disposizione un ampio ventaglio di dati a descrizione degli scenari futuri.

2.1 FENOLOGIA DELLA PIANTA.

Il modello LPJml simula lo sviluppo fenologico della pianta attraverso la “*heat units theory*” derivata dal lavoro di Boswell (1926) [9;10;13]. Secondo questo metodo, quando la temperatura media giornaliera supera un determinato valore, chiamato Temperatura di base (T_b), si accumulano HU “heat unit”. A ogni tipologia vegetale viene attribuito uno specifico numero di “phenological heat units” (PHU), che è necessario accumulare per poter raggiungere lo sviluppo completo; raggiunta la maturazione è quindi prevista la raccolta degli organi fruttiferi, che nel caso dei cereali sono costituiti dai grani [9].

Come detto precedentemente il modello utilizza una parametrizzazione specifica per ognuna delle specie vegetali oggetto della simulazione, quali grano, mais, riso e soia. Riferendosi alla categoria denominata “temperate cereals” [9], di cui fa parte il grano, il numero di PHU è determinato sulla base della data di semina, in conformità con la durata della stagione di crescita. Questo permette di simulare indirettamente la selezione delle varietà vegetali più adatte a crescere nello specifico contesto climatico locale, attribuendo un numero superiore di PHU per le coltivazioni in aree calde o temperate, mentre un numero inferiore di PHU viene attribuito alle varietà coltivate nei climi più freddi. Per le altre tipologie di cereali le PHU sono invece fisse e derivate dalla letteratura.

Il valore di temperatura di base (T_b) deriva, invece, dai database SWAT per tutte le tipologie vegetali ad eccezione del mais, per il quale è consentito un range più ampio di T_b , consentendo la differenziazione fra mais tropicale (T_b 15 C°) e mais temperato (T_b 5 C°). Al grano viene attribuita una T_b pari a 0°C, mentre per riso e soia è prevista una T_b di 10°C.

Lo sviluppo sarà quindi funzione della data di semina e della lunghezza della stagione di crescita, durante la quale è possibile, in funzione del clima, accumulare i PHU necessari alla maturazione.

2.2 SUPERFICIE FOGLIARE E CRESCITA.

La schematizzazione operata dal modello si basa sulla suddivisione della pianta in quattro parti:

- l’apparato fogliare
- l’apparato radicale
- gli organi fruttiferi (grani nel caso dei cereali)

- gli apparati temporanei.

Il carbonio, derivante dai processi fotosintetici, viene distribuito in questi quattro compartimenti.

Lo sviluppo della pianta viene parametrizzato tramite:

- *LAF* (leaf area index) → che rappresenta il grado di sviluppo della foglia
- *l'hi* (harvest index) → che rappresenta la frazione di biomassa contenuta negli organi fruttiferi al momento della raccolta

Entrambi i suddetti parametri variano da un valore massimo ottenuto in concomitanza delle condizioni ottimali fino ad un valore minimo ottenuto in caso di carenza di acqua; a tal proposito devono essere consultati i dati indicati nella tabella 1.

L'allocazione del carbonio viene simulata con step giornaliero, in modo tale da considerare l'eventuale coltivazione della stessa specie vegetale in due cicli diversi durante l'anno, prevista tuttavia solo per il riso. Attuare una simulazione con risoluzione temporale inferiore all'anno permette, inoltre, di apprezzare l'influenza dei cicli stagionali sullo sviluppo delle specie vegetali attraverso il *LAI* e le *PHU*. Inoltre, l'allocazione del carbonio negli organi fruttiferi, che avviene solo nelle fasi finali di crescita della pianta, è funzione dell'evoluzione del *LAI* durante l'intero ciclo vitale.

La porzione di radiazione solare che viene effettivamente utilizzata dalla pianta per la fotosintesi, definita dal parametro *fPAR* (*fraction of photosynthetically active radiation*), viene determinata utilizzando la seguente formula:

$$fPAR = 0.95(1 - e^{k1*LAI}) \quad (2.1)$$

dove *k1* (light extinction coefficient) è fissato a 0.5.

Lo sviluppo fogliare ottimale viene invece calcolato in funzione dei *PHU*, come segue:

$$fLAI_{max} = \frac{fPHU}{fPHU + e(l1 - l2 * fPHU)} \quad (2.2)$$

dove *fLAI_{max}* è la frazione del valore massimo di *LAI* corrispondente ad una data frazione di *PHU*, *fPHU* rappresenta la suddetta frazione, mentre *l1* e *l2* sono due coefficienti di forma. Il raggiungimento del valore massimo di *LAI* si verifica in condizioni climatiche ottimali [9]. Il mancato raggiungimento del valore massimo di sviluppo fogliare può essere determinato dalla condizione di stress idrico, o dal mancato raggiungimento della temperatura necessaria a collezionare *PHU*, da cui deriva uno sviluppo incompleto.

Il modello non prevede una simulazione esplicita dell'apporto di nutrienti e fertilizzanti da parte dell'uomo. Questo aspetto viene riprodotto indirettamente modulando il LAI_{max} e $a-a$. LAI rappresenta il rapporto fra la superficie fogliare e la superficie su cui la pianta stessa cresce, di conseguenza rappresenta la densità delle piante coltivate e quindi la loro produttività media, rispecchiando così, in funzione del valore di LAI_{max} , le pratiche agricole rispettivamente adottate [10], in termini di coltivazione estensiva o intensiva. La modulazione del LAI_{max} , in funzione del grado di utilizzo di fertilizzanti della rispettiva nazione, è prevista tuttavia solo per grano e mais, le due tipologie di cereali più importanti.

Il parametro $a-a$, serve per regolare la produzione di biomassa delle foglie al livello di stand: lo stand, all'interno di LPJml rappresenta una frazione di cella caratterizzata da stesso microclima e stessa tessitura del terreno, e fornisce una misura dell'efficienza della pianta nell'utilizzare la radiazione solare (PAR) per i processi fotosintetici. Tramite questo parametro, e tramite l'assunzione che, in aree coltivate in modo intensivo, tale fattore assuma il valore massimo ($a-a$ è compreso fra 0.4 e 1), è possibile simulare indirettamente l'apporto di nutrienti. Il grado di utilizzo di fertilizzanti attribuito ad una specifica nazione, mediante l'attribuzione degli opportuni valori ai coefficienti sopra discussi, è stato determinato dagli sviluppatori del modello facendo riferimento ai database IFA.

Tramite la modulazione di questi due parametri (LAI_{max} , $a-a$) il modello LPJml simula l'apporto di nutrienti per grano e mais, mentre per riso e soia questa approssimazione non è stata applicata per carenza di informazioni necessarie a parametrizzare le pratiche agricole adottate.

In tabella 1 (pag. 13) sono riportati i dettagli della parametrizzazione delle quattro tipologie di cereali discusse nel presente lavoro (Grano, Mais, Riso e Soia).

2.3 EVAPOTRASPIRAZIONE.

L'evapotraspirazione (E) viene simulata attraverso il metodo Priestley-Taylor, come somma dell'evapotraspirazione dal suolo (E_s), delle perdite per intercettazione da parte della pianta (E_i) e dell'evaporazione dovuta alla traspirazione della pianta durante il periodo di crescita (E_t).

Le perdite per intercezione (E_i) vengono calcolate attraverso la seguente equazione:

$$E_i = E_q * \alpha * fwet * fv; \quad (3.1)$$

dove E_q rappresenta l'evapotraspirazione giornaliera all'equilibrio, funzione della temperatura e dalla radiazione solare netta, α è il coefficiente di Priestley-

Taylor (pari a 1.32), f_{wet} è la frazione di tempo, all'interno delle 24 ore, in cui le foglie sono umide, e infine f_v è la frazione di cella coperta dalla pianta.

La quota di acqua persa per traspirazione da parte della pianta (ET) è pari al prodotto della frazione di cella coperta dalla pianta e il valore minimo tra i parametri S e D definiti come segue.

$$ET = \min(S, D) \cdot f_v \quad (3.2)$$

$$S = E_{max} \cdot f_R \cdot W_r \quad (3.3)$$

$$D = \frac{(1 - f_{wet}) \cdot E_q \cdot \alpha_m}{1 + \frac{g_m}{g_{pot}}} \quad (3.4)$$

dove S indica l'umidità trattenuta dall'apparato radicale, di cui f_r indica la frazione per ogni strato di suolo, W_r rappresenta la frazione di umidità del suolo disponibile per la pianta e E_{max} è l'evapotraspirazione massima in condizione di suolo saturo.

D rappresenta la domanda di traspirazione atmosferica, funzione del coefficiente di Priestley-Taylor massimo (1.391) α_m , g_m è la conduttanza di scala (3.26 mm/s) e g_{pot} rappresenta la conduttanza potenziale, riferita alla canopia della coltura.

In fine l'evapotraspirazione dal suolo viene definita come:

$$E_s = E_q \cdot \alpha \cdot (W_{r20})^2 \cdot (1 - f_v) \quad (3.5)$$

dove il termine W_{r20} rappresenta l'umidità di una colonna di suolo di spessore pari a 20, sottostante l'area coperta dalla vegetazione [9;11]. La conduttanza potenziale (g_{pot}) viene espressa in funzione del tasso massimo di fotosintesi giornaliero (A_{dt}); quest'ultimo rappresenta i grammi di carbonio prodotti al giorno per metro quadro in condizioni ottimali, qualora non si verifichi lo stress idrico, secondo la seguente equazione:

$$g_{pot} = g_{min} + \frac{1.6A_{dt}}{c(1 - \lambda)} \quad (3.6)$$

dove c rappresenta la frazione molare di anidride carbonica ambientale, mentre λ rappresenta il rapporto fra la pressione parziale di anidride carbonica intercellulare e quella ambientale.

In conclusione la domanda di traspirazione D aumenta al crescere della

conduttanza potenziale (g_{pot}) la quale a sua volta è inversamente proporzionale alla concentrazione ambientale di anidride carbonica e direttamente proporzionale al tasso di fotosintesi [11]. In questa maniera il modello è capace di simulare in modo dinamico l'effetto fisiologico dei livelli di CO_2 sulla pianta nel tempo.

2.4 UMIDITÀ DEL SUOLO.

Il modello LPJml considera il suolo come la sovrapposizione di due singoli strati di spessore fisso, pari a 50 cm (strato più superficiale) e 100 cm (strato sottostante) [8]. L'umidità dello strato superficiale viene determinata giornalmente sulla base del bilancio idrico presentato di seguito [11]:

$$W = (W_{t-1} + P - EI + M - ES - \beta ET - p - R) \quad (3.7)$$

dove:

1. W rappresenta il contenuto idrico dello strato in questione, espresso in mm;
2. W_{t-1} è il contenuto idrico del giorno precedente;
3. P è la precipitazione [mm/giorno] che al di sotto dei $0^\circ C$ viene considerato come precipitazione nevosa e va ad inspessire strato nevoso;
4. M rappresenta l'apporto idrico fornito dallo scioglimento delle nevi;
5. EI rappresenta la perdita per intercezione, discussa nei paragrafi successivi;
6. ES rappresenta l'evaporazione dal suolo, che avviene attraverso una colonna di suolo profonda 20 cm, sottostante l'area non coperta dalla pianta;
7. ET rappresenta le perdite per respirazione della pianta, pesata per la frazione di apparato radicale β presente nei primi 50 cm di suolo;
8. p è il tasso di percolazione [mm/giorno], funzione della conducibilità idraulica del suolo e del contenuto relativo di acqua dello strato superficiale W_r , calcolato come il rapporto fra il contenuto in acqua dello strato W e il contenuto di acqua disponibile per la pianta W_{max} ;
9. infine R rappresenta il deflusso superficiale che avviene quando W_r è superiore a W_{max} . Il contenuto idrico dello strato inferiore viene determinato in modo analogo ad eccezione di Et , pesata in questo caso dal reciproco del parametro β .

La descrizione effettuata deriva dallo studio di Greten et al. (2007) [11].

2.5 DATA DI SEMINA.

La data di semina viene determinata sulla base dei parametri climatici quali temperatura e precipitazione. Basandosi sulla temperatura, si considera la data media (mediata nei 20 anni precedenti) in cui la temperatura media giornaliera supera (per coltivazioni primaverili) o ricade sotto (per coltivazioni invernali) un certo valore determinato empiricamente. Considerando invece la disponibilità di acqua, la data di semina viene determinata sulla base della precipitazione cumulata nei dieci giorni precedenti. Nello specifico caso del mais, si distingue fra coltivazioni in regioni tropicali e temperate, considerando quindi valori di temperatura e precipitazione cumulata diversi, in funzione della latitudine. Quando la data di semina non può essere determinata sulla base dei parametri climatici si attribuisce una data fissa, funzione dell'emisfero.

Per le specifiche sulla data di semina relative ai cereali analizzati è possibile consultare la tabella 1.

2.6 AREE COLTIVATE E IRRIGAZIONE.

Le finalità del presente lavoro, come sopra menzionato, sono quelle di illustrare l'evoluzione di resa e impronta idrica, sotto l'influenza dei soli cambiamenti climatici, rappresentati dagli scenari RCP 2.6 e 6.0, escludendo quindi l'intervento umano, sia in termini di espansione o abbandono delle aree coltivate, sia in termini di progresso tecnico e tecnologico. Per evidenziare la sola influenza del clima, il quale ha un impatto diretto su resa agricola ed impronta idrica, si è quindi deciso di mantenere l'estensione delle aree coltivate fissa all'anno 2000, utilizzando i dati provenienti dal database MIRCA2000 [14], distinti in frazione irrigata e non irrigata. Sia le aree totali, che la loro suddivisione in irrigate e non, si mantengono quindi costanti, sia nella serie storica (1997-2005) sia nella serie futura (2006-2080), distinta nei due scenari di cambiamento climatico RCP 2.6 e 6.0. In questo modo è possibile osservare l'impatto del cambiamento climatico a parità di area coltivata.

Nelle aree dove si prevede irrigazione, il modello assume l'assenza di stress idrico: in queste aree il modello prevede l'apporto di acqua non appena l'umidità dello strato superficiale del suolo non sia sufficiente a mantenere il rapporto fra, apporto idrico proveniente dalla pianta stessa e la domanda evaporativa atmosferica, pari a 0.7. Nel caso in cui non si preveda irrigazione artificiale, qualora si verificassero le situazioni di stress idrico, si provvede attribuendo un *harvest index* ed un LAI minimo così da simulare lo sviluppo inferiore della pianta, vedi tabella1 (pag. 13).

CEREALE	ADATTAMENTI LOCALI	Data di semina	Temperatura di base T_b ($^{\circ}\text{C}$)	Phenological Heat Units (Phu ($^{\circ}\text{C}$ al giorno))	LAI Massimo LAI_max	Harvest index ottimale hi_opt (0-1)	Harvest index minimo hi_min (0-1)
Grano	sdate, phu	$f(\text{temp})$: wt 12 $^{\circ}\text{C}$; st 5 $^{\circ}\text{C}$ N: (270-60); S: (85-240) Init: N: 330; S: 150;	0	$f(\text{date})$ 1500-2500	$f(\text{fert})$ 3-7	0,4	0,2
Mais	Sdate, Tb	$f(\text{temp, prec})$: st 14 $^{\circ}\text{C}$; Init: N: 140; S: 320	$f(\text{date})$: 5-15;	1600	$f(\text{fert})$ 3-7	0,5	0,3
Riso	Coltivazione con doppio ciclo in Asia tropicale	Data di semina fissa: Init: N: 120; S: 200;	10	Ciclo singolo: 1600 Doppio ciclo: 1500	5	0,5	0,25
Soia	Nessuno	Data di semina fissa: Init: N: 140; S: 320;	10	1000	3	0,3	0,01

Nomenclatura tabella 1:

sdate, data di semina (N ed S indicano la data attribuita rispettivamente all'emisfero Nord e Sud); T_b , temperatura di base; *phu*, phenological heat units; LAI_{max} Leaf Area Index massimo, raggiungo in condizioni ottimali; $hi_{opt/min}$, harvest index massimo (in condizioni ottimali, assenza di stress idrico) e minimo (in presenza di stress idrico); *temp*, temperatura; *perc*, precipitazioni. Relativamente alla data di semina *fert*, fertilizzanti. $f(\text{temp})$, $f(\text{prec})$ indicano rispettivamente la dipendenza nei confronti di temperatura e precipitazione, mentre *wt* e *st* indicano rispettivamente la tipologia Winter type o Spring type del cereale considerato (grano) a cui viene attribuita una diversa temperatura limite per il collezionamento delle *phu*. *Int* indica invece l'attribuzione del valore di default di data di semina qualora non fosse possibile la determinazione in funzione di *prec* e *temp*. Per il mais la temperatura di base T_b è funzione della data di semina ($f(\text{sdate})$). Per mais e grani il LAI_{max} è funzione dei fertilizzanti ($f(\text{fert})$).

2.7 INPUT CLIMATICI.

I dati climatici provengono dai GCM (Global Climate Models) GFDL-ESM2M, HADGEM2-ES, ipsl-cm5a-lr, MIROC5. Secondo il protocollo ISIMIP, i dati provenienti dai modelli sono stati sottoposti a bias-correction mediante il metodo Fast-Track, riferendosi ai dataset EWEMBI [15].

2.8 COLTIVAZIONE CONSOCIATA

La coltivazione consociata di più tipologie vegetali nella stessa area è una pratica largamente impiegata con lo scopo di ottimizzare l'uso della superficie coltivata e sfruttare specifiche proprietà delle colture, quali funzioni di sostegno reciproco, liberazioni nutrienti dal suolo, protezione contro l'insolazione di una specie verso la sua consociata e altre. Il modello LPJlm non prevede la simulazione di queste tecniche di coltivazione, tuttavia un surrogato di questa tecnica è presente: dopo la raccolta della coltura principale il modello permette la crescita di specie erbacee nella stessa area, il cui apparato fogliare e radicale, in termini di nutrienti, viene aggiunto al suolo all'inizio del nuovo ciclo di coltivazione [9].

Un'altra pratica molto utilizzata è quella di coltivare la stessa tipologia vegetale in due diversi cicli all'interno dello stesso anno: la simulazione di questa pratica è prevista all'interno del modello LPJml solo per il riso e solo per l'Asia tropicale.

3 PROCEDURA DI CALCOLO

Di seguito analizzeremo la procedura di calcolo adottata, descrivendo tutti i passaggi eseguiti, articolati come segue:

1. Download dei dati da database ISIMIP;
2. media dei dati provenienti dai quattro modelli climatici utilizzati;
3. filtro con aree MIRCA 2000;
4. calcolo di resa ed evapotraspirazione medi, a partire da i dati distinti in frazione irrigata e non;
5. calcolo del valore di impronta idrica a partire dai dati di resa ed evapotraspirazione medi;
6. aggregazione a scala nazionale;
7. calibrazione resa agricola sui dati della Food and Agriculture Organization (FAO);
8. successiva rielaborazione dei dati e analisi.

3.1 DATABASE ISIMIP.

L'Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) è stato fondato da Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) e dall'istituto International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). Esso nasce dallo sforzo di modellatori di tutto il mondo e rappresenta un database, in continua crescita, dove convergono i risultati generati dai modelli più usati oggi per l'indagine e lo studio del cambiamento climatico.

L'obiettivo di questa iniziativa è quella di applicare un protocollo che permetta la comunicazione fra i vari modelli così da poter eseguire analisi multisetoriali e interdisciplinari, con l'obiettivo di indagare in modo sempre più completo il fenomeno del cambiamento climatico nonché i complessi e molteplici settori che ne sono coinvolti [16]. Il lavoro svolto da ISIMIP è organizzato in simulazioni, ognuna delle quali è orientata verso uno specifico settore. Le simulazioni vengono svolte utilizzando vari modelli, i quali vengono esposti allo stesso set di dati climatici e forzanti socio-economiche.

La simulazione associata ai dati utilizzati nel presente lavoro, viene denominata ISIMIP2b. L'obiettivo di questa simulazione è quello di indagare l'impatto degli scenari a bassa emissione, RCP 2.6 e 6.0, a cui si associa un incremento della temperatura globale pari a 1.5°C. Lo sviluppo di ISIMIP2b, infatti, è avvenuto in

risposta a quanto emerso nella Conference of Parties (COP) avvenuta a Parigi nel 2015 durante la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) [17]. Durante questa conferenza venne esplicitamente richiesto all'Intergovernmental Panel on CLimate CHange (IPCC) di fornire un report, nel 2018, riguardante specificatamente gli effetti di un surriscaldamento globale pari a 1.5°C rispetto ai valori preindustriali [17], associato agli scenari RCP 2.6 e 6.0.

I settori investigati nella simulazione ISIMIP2b sono:

- il comparto idrico, globale e regionale;
- pesca ed ecosistemi marini;
- biomi, e biodiversità terrestre;
- foreste;
- sistemi costieri;
- salute;
- laghi;
- permafrost;
- agricoltura e comparto agro-economico;
- fornitura e domanda di energia.

Come descritto nel l'articolo Frieler et al (2017) [17], la simulazione ISIMIP2b è stata sviluppata in modo da perseguire l'indagine degli impatti climatici in tre macro direzioni:

- 1) La distinzione degli impatti del riscaldamento globale a partire dall'epoca preindustriale, dagli impatti derivanti da successivi interventi antropici come l'utilizzo del suolo e la deforestazione;
- 2) Eseguire proiezioni future degli effetti di un innalzamento della temperatura pari a +1.5°C, rispetto al periodo preindustriale, secondo gli scenari di cambiamento climatico RCP 2.6 e RCP 6.0, mantenendo le forzanti socioeconomiche fisse a livelli del 2005;
- 3) Eseguire le stesse analisi di cui il punto 2, considerando i cambiamenti socioeconomici seguiti dallo Shared Socioeconomic Pathway SSPP2.

Il presente lavoro si concentra sull'analisi descritta nel punto 2, analizzando l'impatto climatico sull'agricoltura tramite il modello ecosistemico LPJml, mantenendo le forzanti socioeconomiche fisse al 2005, ma considerando l'influenza della variazione di concentrazione di CO₂ nell'atmosfera, sui processi fotosintetici dei cereali.

I dati generati da ISIMIP sono resi disponibili attraverso il portale ISIMIP [16], figura 1, [<https://esg.pik-potsdam.de/projects/isimip/>], dai cui provengono i dati utilizzati nel presente lavoro. Il portale ISIMIP permette di selezionare facilmente

il settore di interesse, il modello che si vuole utilizzare e i modelli climatici che con esso comunicano, inoltre, è possibile esplorare varie serie temporali che si estendono dal periodo preindustriale all'anno 2099.

The screenshot shows the ISIMIP portal interface. At the top, it is hosted by the Potsdam-Institute for Climate Impact Research and powered by ESGF and CoG. The main title is "Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project". Below the title, there are navigation links for "Home" and "About Us", and a "Technical Support" button. A search bar is present with a "Search" button and a "Reset" button. The search results show a list of simulation rounds, with "LPJmL (74)" selected. The search constraints are: "Wheat", "full irrigation (firr), no irrigation (noirr)", "LPJmL", "yield", and "co2". The total number of results is 74. The first result is "isimip2a.output.agriculture.LPJmL.GSWP3.historical.default.co2.firr.yield.whe.yearly".

Figura 1 Interfaccia del portale ISIMIP.

Attraverso il portale è stato quindi possibile reperire i dati di resa (Y) e evapotraspirazione (AET), selezionando i seguenti parametri di ricerca:

- modello LPJmL;
- modelli climatici GFDL-ESM2M, HADGEM2-ES, ipsl-cm5a-lr, MIROC5;
- serie storica 1861-2005;
- serie futura 2006-2099, differenziata scenario RCP 2.6 e 6.0;
- forzanti socioeconomiche fisse al 2005;
- concentrazione atmosferica di CO₂ variabile nel tempo secondo gli scenari RCPs (aspetto fondamentale per la simulazione dell'effetto fertilizzante della CO₂ sui cereali);
- resa ed Evapotraspirazione distinte in coltivazione con irrigazione e senza irrigazione;
- cereali considerati: Grano, mais, riso e soia.

I dati sono forniti in formato netCDF, con risoluzione temporale annuale e risoluzione spaziale pari a 0.5°x0.5° (55.5 x 55.5 [km] all'equatore), corrispondenti ad una griglia tridimensionale di dimensioni 360x720xN (Latitudine-Longitudine-Anno). Per ogni tipologia di cereale esistono quindi quattro griglie tridimensionali, rispettivamente di resa e AET distinte in frazione irrigata (firr) e non irrigata (noirr), per ognuno dei quattro modelli climatici; per un totale di 16 griglie per ogni cereale.

Il passaggio successivo riguarda il calcolo della media fra i dati provenienti dai quattro modelli climatici utilizzati, così da ottenere un totale di quattro griglie per ogni tipologia di cereale: due per la resa (firr e noirr) e due di AET (firr e noirr): questa procedura è schematizzata in figura 2.

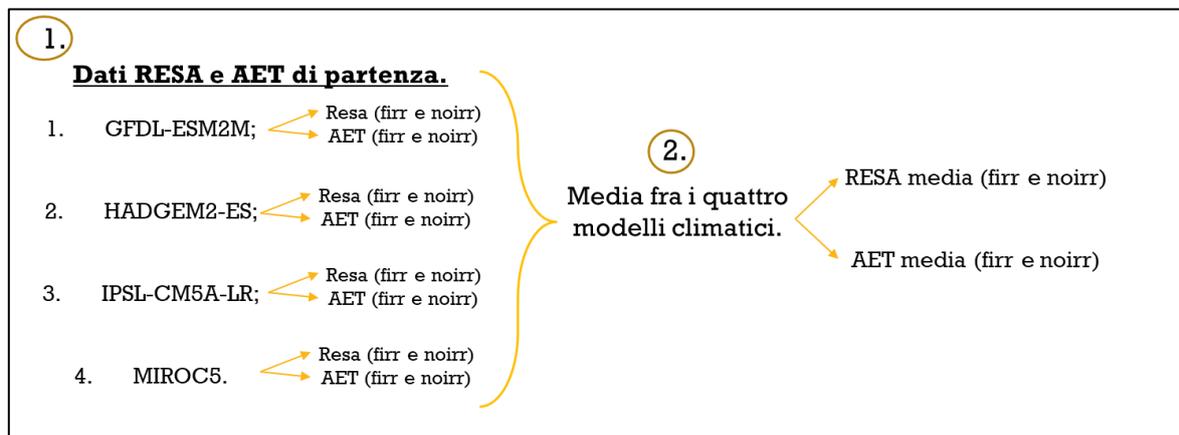


Figura 2 Schematizzazione della procedura di media fra i quattro modelli a partire dai dati di partenza ISIMIP. In figura, la nomenclatura firr e noirr indica rispettivamente i dati riferiti alla coltivazione con irrigazione (full irrigation) e senza irrigazione (no irrigation).

3.2 MEDIA FRA I QUATTRO MODELLI CLIMATICI.

Come esposto nel precedente capitolo, i dati di resa ed evapotraspirazione, provenienti dal modello LPJml, derivano e dipendono dai dati generati da quattro modelli climatici: GFDL-ESM2M, HADGEM2-ES, ipsl-cm5a-lr, MIROC5. Ognuno di questi modelli possiede una diversa parametrizzazione dei fenomeni climatici che esso simula, e differenti saranno le variabili climatiche, sia per numero che per natura, simulate da ogni modello: questo comporta risultati diversi a seconda del modello climatico utilizzato. A tal proposito, si è deciso di operare la media dei dati provenienti dai 4 modelli sopra citati, così da dare maggiore robustezza all'analisi.

In modo da non conferire maggiore rilevanza ad un modello rispetto agli altri, si è scelto di applicare la media semplice, operata a scala di cella, come schematizzato di seguito in figura 3.

$$\left(\begin{array}{c} \text{GFDL-ESM2M.} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3,70 & 3,77 & 3,80 \\ \hline 3,89 & 3,99 & 4,02 \\ \hline 4,08 & 4,14 & 4,20 \\ \hline \end{array} \\ 360 \\ 720 \end{array} \right) + \begin{array}{c} \text{HADGEM2-ES.} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3,96 & 4,03 & 4,01 \\ \hline 4,14 & 4,23 & 4,18 \\ \hline 4,20 & 4,25 & 4,25 \\ \hline \end{array} \\ 360 \\ 720 \end{array} + \begin{array}{c} \text{ipsl-cm5a-lr.} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3,90 & 3,97 & 3,97 \\ \hline 4,01 & 4,11 & 4,14 \\ \hline 4,03 & 4,11 & 4,16 \\ \hline \end{array} \\ 360 \\ 720 \end{array} + \begin{array}{c} \text{MIROC5.} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3,97 & 4,04 & 4,02 \\ \hline 4,11 & 4,21 & 4,21 \\ \hline 4,22 & 4,27 & 4,28 \\ \hline \end{array} \\ 360 \\ 720 \end{array} \Big) / 4 = \begin{array}{c} \text{MEDIA.} \\ \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3,88 & 3,95 & 3,95 \\ \hline 4,04 & 4,13 & 4,14 \\ \hline 4,13 & 4,19 & 4,22 \\ \hline \end{array} \\ 360 \\ 720 \end{array}$$

Figura 3 Schematizzazione della procedura di media a scala di cella dei dati provenienti dai quattro modelli.

Le matrici/griglie utilizzate contengono delle celle in cui il modello non calcola la resa o l'evapotraspirazione, indicate come NaN (not a number): la media sopra descritta, schematizzata in figura 3, è stata applicata escludendo queste celle dal conteggio. Una volta effettuata la media si pongono pari a zero i valori di resa o evapotraspirazione inferiori a 0.0001: i dati sono infatti frutto di una simulazione, si è quindi deciso di escludere valori irrealistici, come una resa o un'evapotraspirazione eccessivamente bassi.

I dati a questo punto sono distinti in resa ed evapotraspirazione, con o senza irrigazione, che il modello calcola su ogni superficie considerata coltivabile in funzione delle caratteristiche climatiche e pedologiche. Occorre quindi attribuire i valori di resa ed evapotraspirazione alle aree effettivamente coltivate, come descritto nel seguente capitolo.

3.3 FILTRO CON AREE MIRCA 2000.

Le aree coltivate, distinte fra irrigate e non irrigate, derivano dai database MIRCA2000. I dati relativi a questo database provengono dal portale https://www.unifr Frankfurt.de/45218031/Data_download_center_for_MIRCA2000, della Goethe Universitat [14]. I dati sono forniti sotto forma di griglie 360x720, con la stessa risoluzione spaziale dei dati ISIMIP (30 min arc; 55.5x55.5 km all'equatore) e rappresentano le aree coltivate totali annuali, distinte in irrigate e non.

Le aree sono state utilizzate come filtro, seguendo quanto appreso da letteratura [13]. La filtrazione con le aree viene effettuata in modo da considerare i valori di resa ed evapotraspirazione nelle sole celle dove le aree MIRCA prevedono coltivazione. La procedura di filtrazione opera anche nella direzione opposta, escludendo le aree MIRCA per le quali il modello LPJml non consideri possibile la coltivazione.

Il primo passaggio della filtrazione prevede l'attribuzione dei valori di NaN alla matrice delle aree. I dati MIRCA2000 non contengono NaN ma sole celle dove l'area è pari a zero o superiore. I NaN derivano dalla simulazione svolta dal modello LPJml, quindi, per mantenere in questi passaggi questa informazione, si attribuisce il valore di NaN, contenuto nelle matrici di resa e evapotraspirazione, alle rispettive celle della matrice delle aree coltivate, come schematizzato in figura 4.

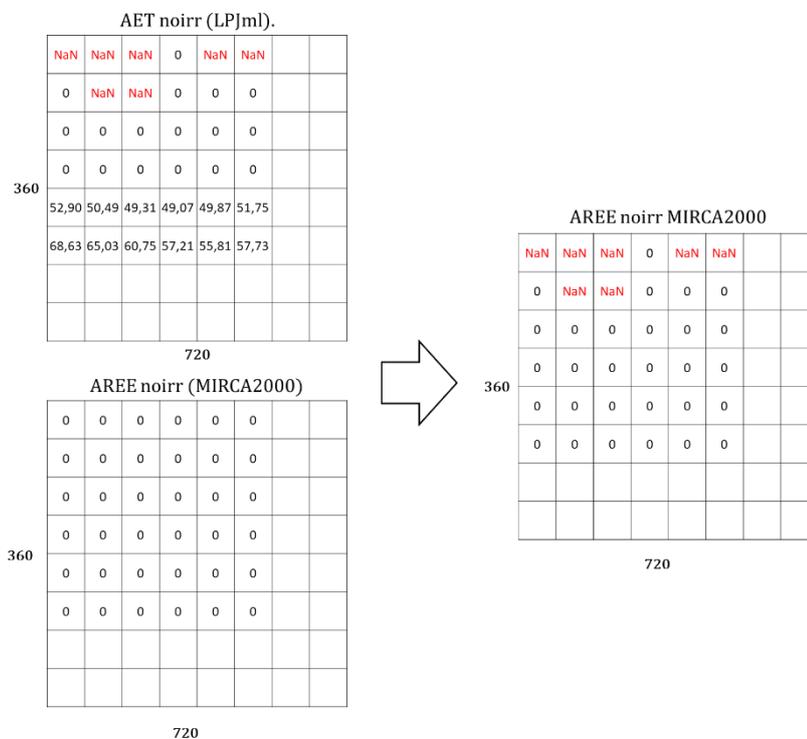


Figura 4 Schematizzazione della procedura di attribuzione NaN alle aree MIRCA2000.

Il passaggio successivo prevede la mutua esclusione dei valori nulli dalle due matrici utilizzate: in figura 4 si può osservare come il modello simuli un'evapotraspirazione diversa da zero in alcune celle, mentre le aree MIRCA2000 riportano, nelle stesse celle, un'area coltivata pari a zero. Si procede quindi ponendo pari a zero i valori di evapotraspirazione in queste celle, come esemplificato in figura 5. Come sopra accennato qual ora il modello riportasse dei valori nulli di resa o evapotraspirazione, mentre i database MIRCA2000 indicano un'area coltivata diversa da zero, si pongono queste celle uguali a zero. L'obiettivo di questa procedura è quello di ottenere una corrispondenza perfetta fra i dati contenuti nelle tre matrici.

In questo modo la resa e l'evapotraspirazione, generate dal modello su ogni superficie climaticamente e pedologicamente coltivabile, vengono attribuite alle sole aree dove esiste effettiva coltivazione, come esemplificato in figura 6 e in figura 7.

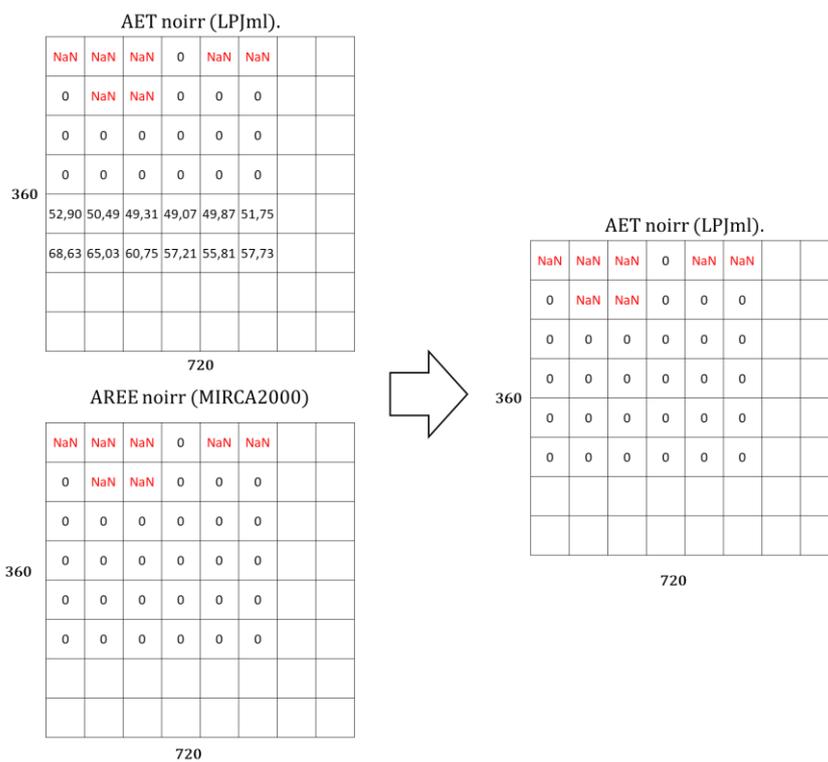


Figura 5 Schematizzazione della procedura di mutua filtrazione tra matrici di Resa/Evapotraspirazione e aree MIRCA2000.

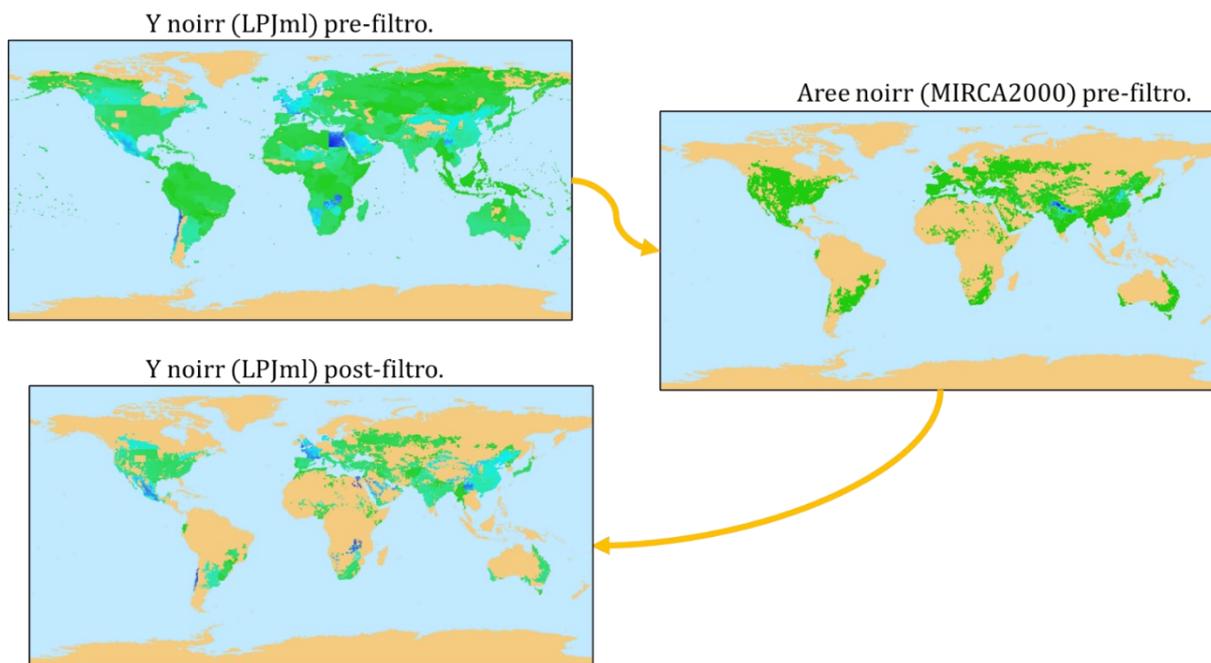


Figura 6 Visualizzazione del risultato finale del processo di mutua filtrazione schematizzato in figura 5: in figura, a titolo esemplificativo, si osserva la resa non irrigata (noirr) prima e dopo il filtro sulle aree MIRCA2000 (noirr).

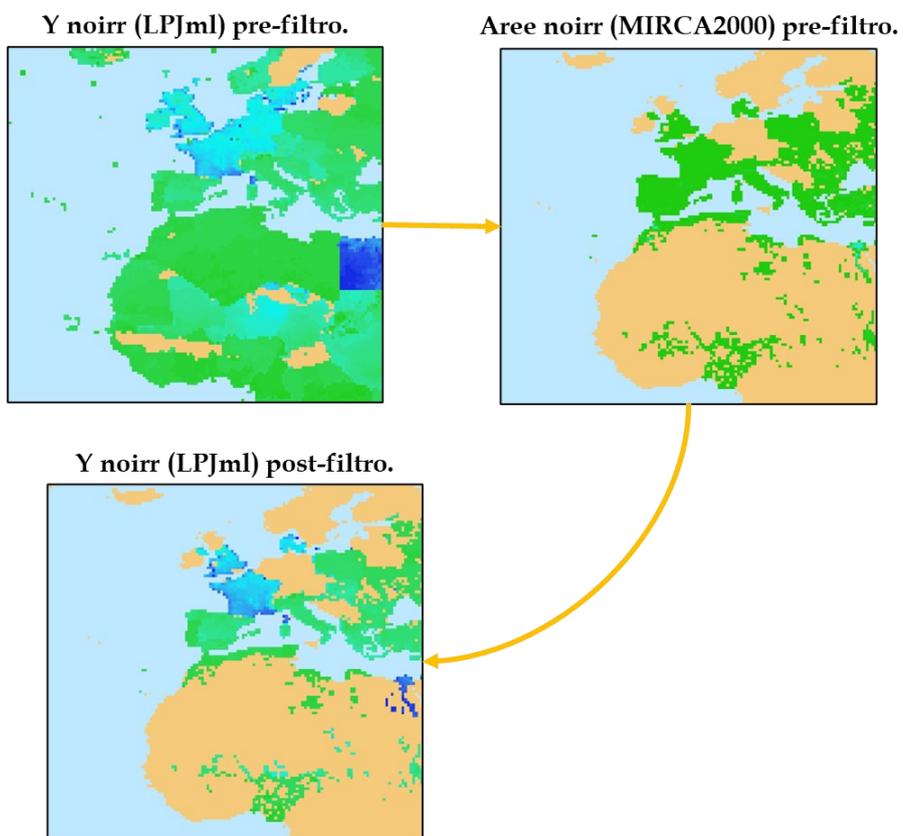


Figura 7 Dettaglio della procedura esemplificata in figura 6.

3.4 CALCOLO RESA, EVAPOTRASPIRAZIONE E IMPRONTA IDRICA MEDI.

L'analisi svolta nel presente lavoro di tesi si concentra sullo studio dell'evoluzione futura di resa e impronta idrica medi, senza distinzione fra coltivazione frr e noirr. Il passaggio successivo è quindi rappresentato dal calcolo della media fra i dati riferiti alle aree coltivate con irrigazione e senza irrigazione, mediante le seguenti formule:

$$Y_{media} = \frac{Y_{irr} * Aree_{irr} + Y_{noirr} * Aree_{noirr}}{Aree_{irr} + Aree_{noirr}} \left[\frac{ton}{ha} \right] \quad (4.1)$$

$$AET_{media} = \frac{AET_{irr} * Aree_{irr} + AET_{noirr} * Aree_{noirr}}{Aree_{irr} + Aree_{noirr}} [mm] \quad (4.2)$$

dove, Y_{media} e AET_{media} rappresentano la media pesata fra la resa irrigata e non, i pedici *noirr* e *irr*, sono riferiti rispettivamente alle coltivazioni effettuate senza irrigazione e con irrigazione artificiale. Esattamente come visualizzato nelle schematizzazioni esposte nei capitoli precedenti, le formule sopra descritte sono applicate a scala di cella. Una volta calcolati i valori medi si procede quindi ponendo pari a zero i valori inferiori a 0.0001, e si procede applicando ancora una volta la filtrazione per mutua esclusione descritta precedentemente, così da assicurare perfetta corrispondenza fra le matrici.

A partire da questi valori si calcola quindi l'impronta idrica media, la produzione media, e il volume, mediante le seguenti formule:

$$WF = \frac{10 * AET_{media}}{Y_{media}} \left[\frac{m^3}{ton}; \frac{l}{kg} \right] \quad (4.3)$$

$$PRD = Y_{media} * AREA_{tot} [ton] \quad (4.4)$$

$$VOL = WF * PRD [m^3] \quad (4.5)$$

Dove WF rappresenta l'impronta idrica, PRD rappresenta la produzione, e VOL il volume. L'impronta idrica così calcolata rappresenta quindi la quantità di acqua utilizzata per la produzione di un chilogrammo di cereali.

3.5 AGGREGAZIONE A SCALA NAZIONALE.

L'aggregazione a scala nazionale di Y e WF , viene eseguita operando una media pesata sull'area coltivata per la Y , e sulla produzione per l'impronta idrica, come descritto di seguito:

$$Y_{nz} = \frac{\sum_i Y_{media_i} * Area_{tot_i}}{\sum_i Area_{tot_i}} \left[\frac{ton}{ha} \right] \quad (4.6)$$

$$WF_{nz} = \frac{\sum_i WF_{media_i} * PRD_{media_i}}{\sum_i PRD_{media_i}} \left[\frac{m^3}{ton} \right] \quad (4.7)$$

Dove Y_{nz} e WF_{nz} rappresentano l'impronta la resa e l'impronta idrica media nazionale. Y_{media_i} , WF_{media_i} , $Area_{tot_i}$ e PRD_{tot_i} rappresentano rispettivamente la resa, l'impronta idrica, l'area e la produzione, nell' i -esima cella appartenente alla nazione. Per attribuire le celle di resa, impronta idrica, area e produzione, alle rispettive nazioni, si è utilizzata una matrice dei codici. All'interno di questa matrice, le celle che compongono ogni nazione posseggono tutte il medesimo valore, unico per ogni nazione, come raffigurato in figura 8. Mediante un processo iter-attivo è quindi possibile selezionare, dalle matrici delle variabili considerate, le sole celle appartenenti ad una specifica nazione e quindi applicare le formule descritte sopra; al termine della procedura è possibile ottenere i valori medi nazionali e visualizzare le relative mappe a scala nazionale, come è possibile osservare in figura 9 e 10.



Figura 8 Esempificazione della matrice dei codici nazionali: come si può osservare i pixel che compongono ogni nazione possiedono tutti lo stesso valore unico, rappresentato in figura da un colore.

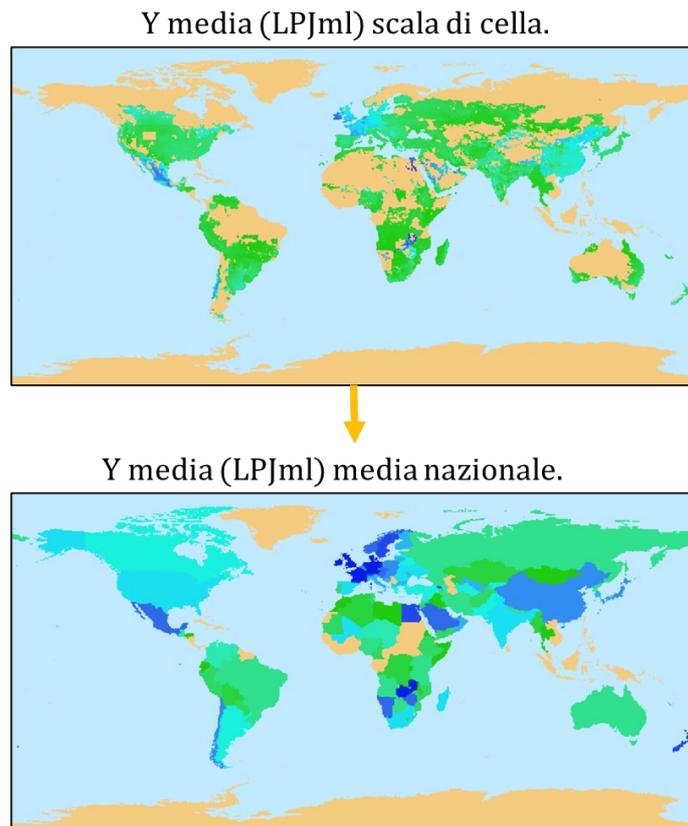


Figura 9 Visualizzazione del processo di aggregazione in dati medi nazionali a partire dai dati a scala di cella.

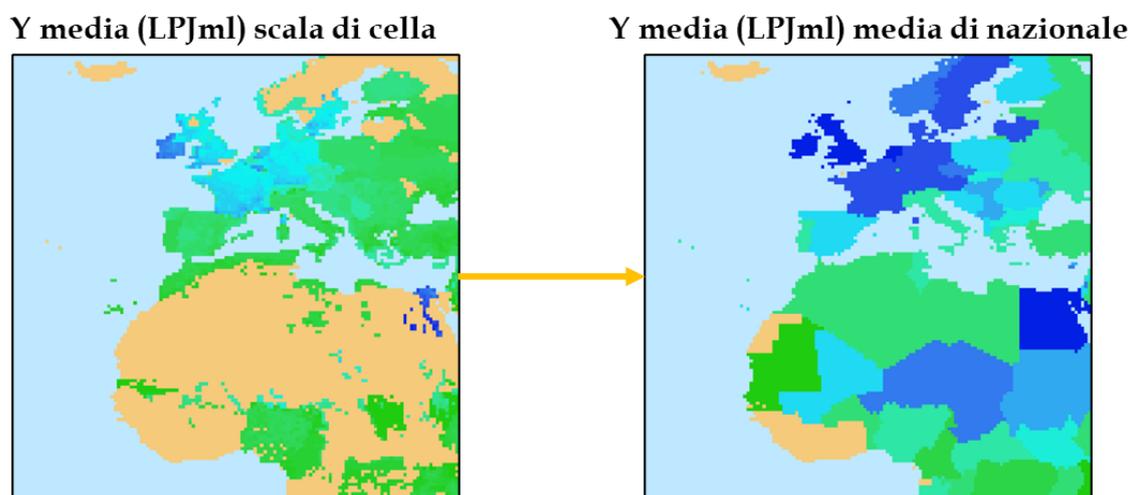


Figura 10 Dettaglio della procedura esemplificata in figura 9.

4 VALIDAZIONE MODELLO.

La capacità del modello di simulare correttamente le variabili e i fenomeni coinvolti nel settore agricolo ed idrico, è stata verificata precedentemente in vari studi [9;10;11;12,13]. Nel presente lavoro si è tuttavia deciso di effettuare la validazione indipendentemente, con l'obiettivo di verificare la bontà della procedura di calcolo, l'applicazione delle aree MIRCA2000, e, a scopi didattici, a fini di prendere dimestichezza con la manipolazione dei dati e l'utilizzo del software impiegato nel corso della procedura (Matlab).

La validazione si è concentrata sulla resa agricola, confrontata con i dati di riferimento prelevati dai database FAO [19], seguendo quanto appreso dalla letteratura [9; 11; 13; 14], e sull'impronta idrica, quest'ultima confrontata con i dati provenienti dal database CWASI [20]. Essendo le aree coltivate riferite all'anno 2000, si è deciso di effettuare la validazione delle prestazioni del modello sulla serie storica nell'anno 2000.

I valori di resa e impronta idrica, governati dalle condizioni climatiche, variano considerevolmente di anno in anno: si è quindi deciso, di effettuare una media temporale in un intorno dell'anno 2000, pari all'intervallo 1997-2003. Questa procedura è stata applicata nel corso dell'intera analisi: a titolo esemplificativo, qualora si incontri nel testo il valore di impronta idrica nell'anno 2040, si tenga presente che questo valore rappresenta una media dei valori compresi nell'intervallo 2037-2043, tuttavia, a fini di un'esposizione più scorrevole, si indicherà semplicemente l'anno 2040.

Gli strumenti utilizzati durante il processo di validazione sono gli scatter-plot e il calcolo del coefficiente di Pearson, pesato e non pesato. Negli scatter-plot si riportano lungo l'asse delle ascisse i dati di riferimento FAO, e nelle ordinate i dati simulati, mediati a scala nazionale. Gli elementi circolari rappresentano i valori delle singole nazioni e la loro dimensione è proporzionale all'area coltivata, nel caso si analizzi la resa agricola, e alla produzione, nel caso si analizzi l'impronta idrica. Una perfetta correlazione dei dati comporterebbe la disposizione degli elementi circolari sulla bisettrice, a indicare l'uguaglianza reciproca dei valori di riferimento e simulati, mentre un discostamento dalla linea bisettrice, indica una sovrastima o sottostima rispetto ai dati di riferimento.

Il coefficiente di Pearson $[R]$ fornisce invece una misura quantitativa della correlazione dei dati, ed è stato calcolato seguendo la seguente formula:

$$R = \frac{\sum[\text{peso}(x - \bar{x})(y - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(\text{peso}(x - \bar{x})^2) * \sum(\text{peso}(y - \bar{y})^2)}} \quad (4.1)$$

dove x rappresentano i dati ISIMIP, \bar{x} rappresentano la loro media (pesata), y rappresentano i dati ISIMIP, \bar{y} rappresentano la loro media (pesata).

L'applicazione del peso nel calcolo della correlazione permette di dare maggiore importanza ai dati appartenenti alle nazioni maggiori coltivatrici del rispettivo cereale analizzato. Sono infatti queste le nazioni per le quali è cruciale fornire una valutazione corretta degli impatti del cambiamento climatico sull'impronta idrica e la produttività. Il coefficiente di Pearson non pesato è stato calcolato ponendo i pesi pari ad uno, e calcolando la media aritmetica dei valori di resa. Il coefficiente di Pearson non pesato non differenzia fra le maggiori o minori produttrici e permette di analizzare la correlazione d'insieme dei dati. Questo valore è stato utilizzato soprattutto nella verifica della calibrazione, descritta di seguito, così da osservare i suoi effetti anche sulle nazioni piccole produttrici.

4.1 VALIDAZIONE SERIE STORICA: INTERVALLO 1997-2003.

La resa generata dal modello è connessa alla raccolta dei soli grani secchi dei cereali, mentre la resa FAO è espressa sul raccolto effettivo, considerando il contenuto idrico dei cereali. Per procedere al confronto si è quindi considerato un contenuto idrico pari a 12% per mais e grano, 13% per il riso e 9% per la soia, seguendo le informazioni reperite da letteratura [10;13]; il contenuto in acqua è stato sottratto ai dati di riferimento. I dati FAO e i dati simulati sono quindi stati mediati nell'intervallo temporale 1997-2003 e si è proceduto al confronto mediante scatter-plot e calcolo del coefficiente di Pearson, pesato sulle aree e non pesato.

4.1.1 GRANO.

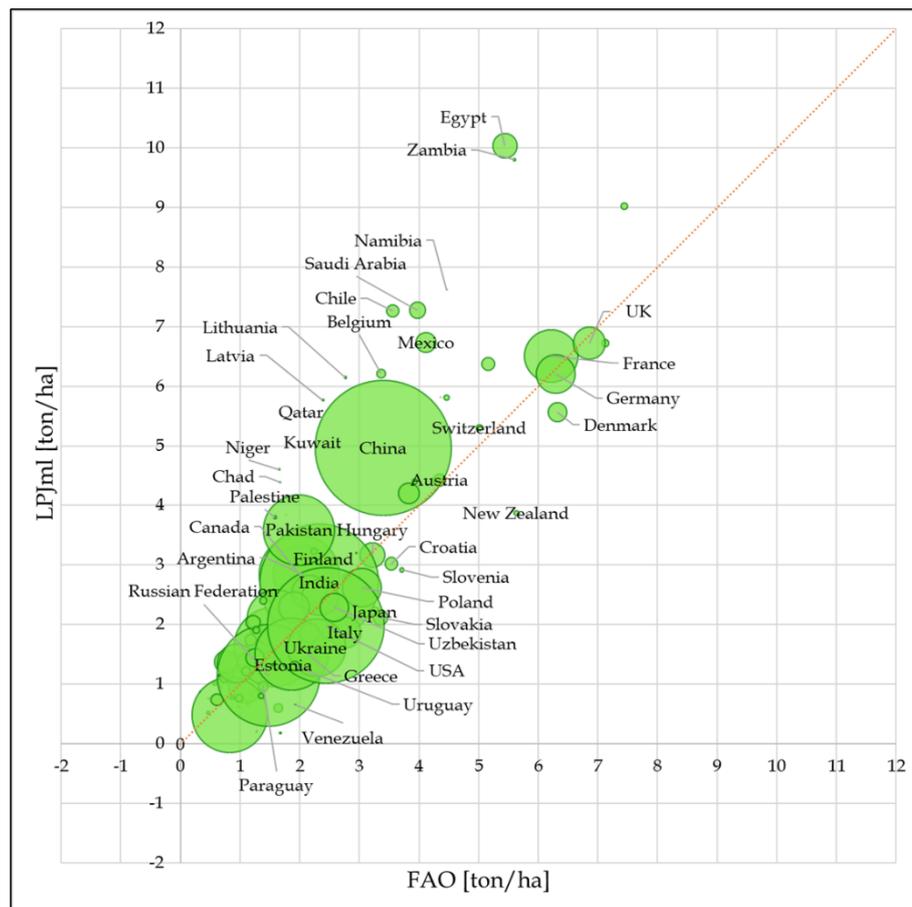


Figura 11 Confronto fra resa media nazionale, pesata sulle aree, simulata dal modello LPJ, e resa media nazionale da FAO statistic 2019, mediati nell'intervallo 1997-2003: cereale GRANO.

In figura 11 è possibile osservare come la resa simulata, relativa alle principali produttrici mondiali [19], mostri una buona corrispondenza con i dati FAO, con un'ottima correlazione anche per le principali produttrici europee, quali Germania, Francia, Regno Unito e Danimarca. Fanno eccezione Pakistan e Cina, per le quali si riscontra una leggera sovrastima. La simulazione della resa per le piccole produttrici, tra le quali Namibia, Cile, Kuwait, Qatar, Messico, Egitto e Zambia, risulta spesso fortemente sovrastimata. Queste nazioni sono accumulate da una coltivazione effettuata con forte irrigazione, con una superficie irrigata compresa tra 95 e 100% dell'area totale coltivata, mentre in Cina la superficie irrigata è pari a 70%. Un'erronea attribuzione dell'irrigazione, da parte dei dati di MIRCA2000 o da parte del modello, potrebbe essere alla base della sovrastima osservata.

Il modello tende inoltre a sovrastimare la resa per alcuni paesi dell'ex unione sovietica, quali Lettonia e Lituania, dove si evidenzia una problematica simile.

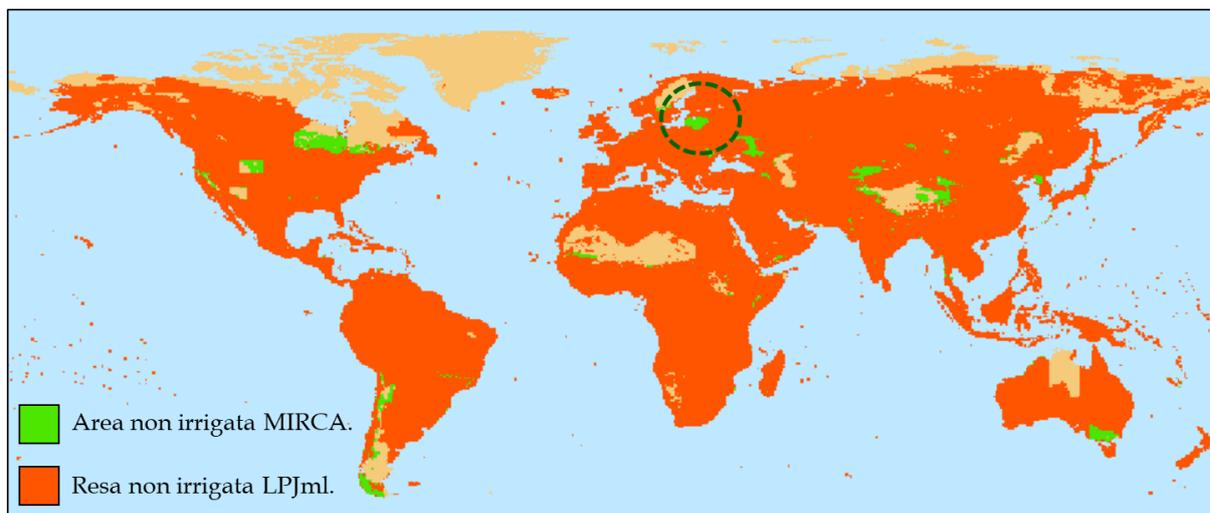


Figura 12 Sovrapposizione dai dati di area non irrigata MIRCA2000, e della resa non irrigata generata dal modello, relativamente alla coltivazione del grano. La zona cerchiata in verde ospita Lituania e Lettonia.

La mappa, rappresentata in figura 12, rappresenta la sovrapposizione delle mappe di resa senza irrigazione e le relative aree MIRCA2000. Come si può osservare si riscontrano numerose zone dove, secondo i dati MIRCA2000, la superficie risulta essere coltivata senza irrigazione, mentre i dati generati dal modello attribuiscono una resa senza irrigazione nulla; nello specifico, l'area cerchiata in verde racchiude la Lituania e la Lettonia. La mancata attribuzione di superficie coltivata senza irrigazione, tipicamente associata a rese inferiori rispetto alla coltivazione con irrigazione, potrebbe essere alla base della sovrastima evidenziata.

In definitiva, la simulazione della resa connessa alla coltivazione del grano, per nazioni con una spiccata tendenza alla coltivazione con irrigazione, risulta essere sovrastimata. Questa problematica sembra inoltre essere più marcata per le produttrici minori, mentre le principali produttrici mantengono una buona correlazione. Questo è confermato dal coefficiente di Pearson pesato pari a 0.87.

4.1.2 MAIS

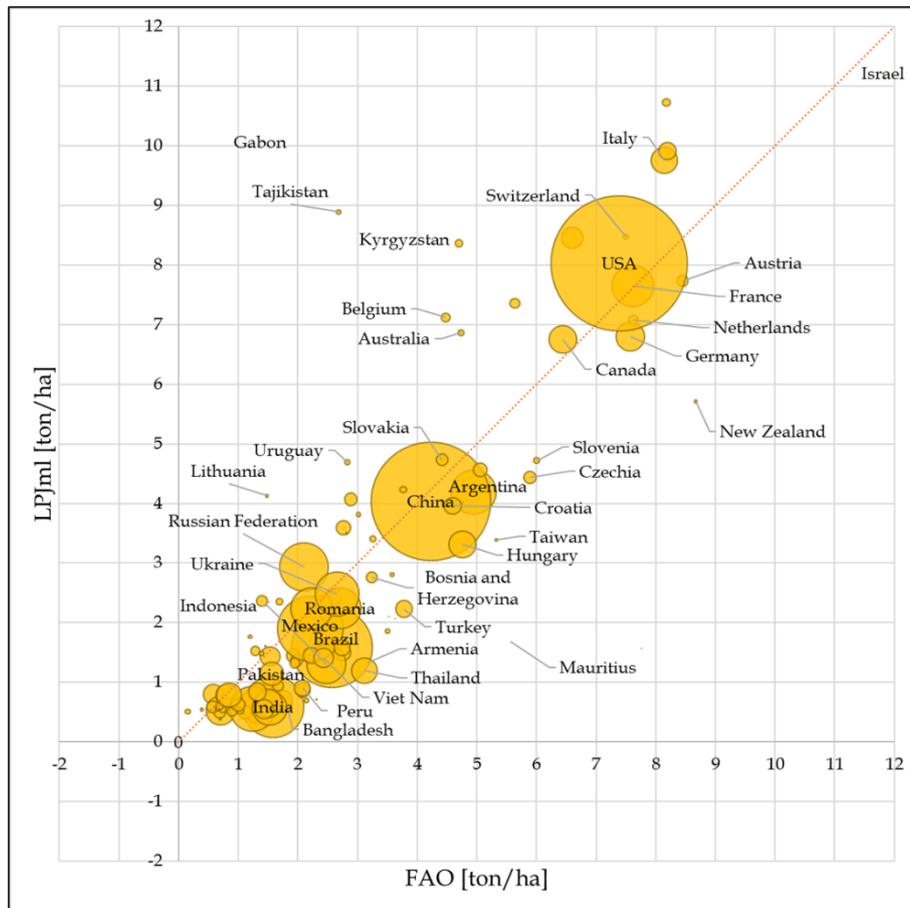


Figura 13 Confronto fra resa media nazionale, pesata sulle aree, simulata dal modello LPJ, e resa media nazionale da FAO 2019, mediata nell'intervallo 1997-2003: cereale MAIS.

Le principali produttrici di mais sono USA, Cina, Brasile, Argentina, Ucraina, Indonesia, India, Messico, Romania e Russia [19]. Per tutte queste nazioni si evidenzia un'ottima correlazione fra i dati osservati FAO e i dati simulati, ad esclusione di Russia e USA, per le quali si registra una leggera sovrastima. In figura 14 si evidenzia la sovrapposizione fra le aree interessate da una resa non irrigata, e le aree non irrigate MIRCA2000, utilizzate come riferimento. Come osservato precedentemente per il grano, si individuano vaste zone, nel nord della Russia, coltivate senza irrigazione che vengono escluse dal modello. La sovrastima associata alla Russia può essere spiegata da questa incongruenza, analogamente a quanto osservato per il grano nel capitolo precedente.

Osservando lo scatter-plot in figura 13, si notano numerose nazioni piccole produttrici per le quali il modello sovrastima la resa, in modo evidente per Tajikistan, Kirghizistan, Australia, Belgio e Gabon. Per tutte queste nazioni si riscontra una coltivazione con fortissima irrigazione o con irrigazione

sostanzialmente assente: la superficie irrigata risulta pari rispettivamente a 100%, 99.9% e 76%, per Tajikistan, Kirghizistan e Australia, mentre in Belgio e Gabon, la superficie irrigata è minima, pari rispettivamente a 1.6% e 0%, secondo i dati MIRCA2000 utilizzati.

Una problematica simile si osserva anche per Tailandia, Turchia, Uruguay e Nuova Zelanda; queste ultime sono accumulate da una coltivazione effettuata prevalentemente senza irrigazione. Queste problematiche possono essere spiegate ancora una volta con una probabile erronea assegnazione dell'irrigazione, da parte dei dati MIRCA2000, che, per nazioni con una spiccata tendenza all'irrigazione o viceversa, sembra compromettere la simulazione della resa.

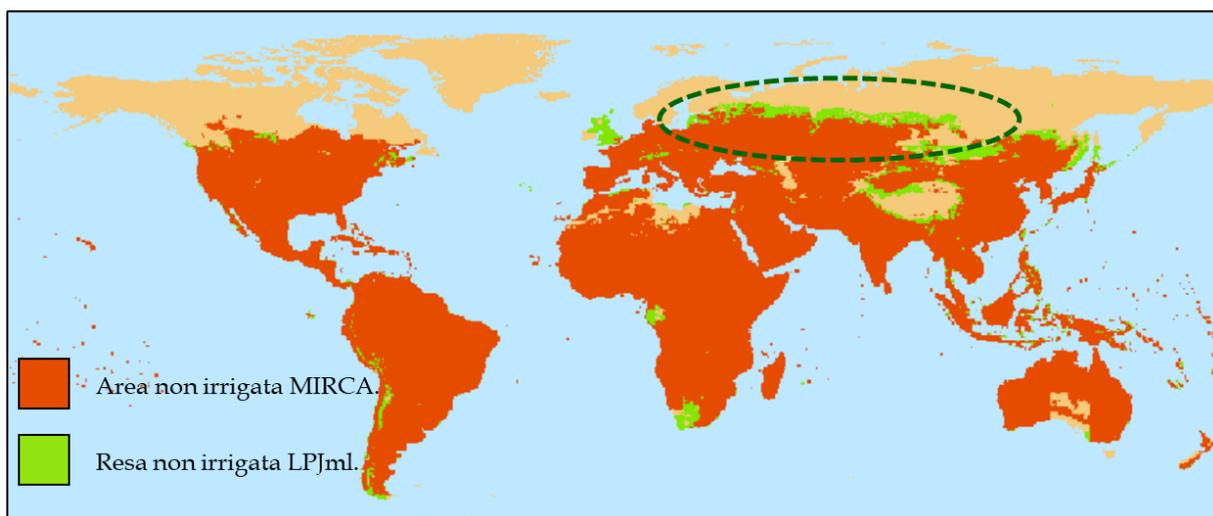


Figura 14 Confronto fra resa media nazionale simulata dal modello LPJ, e resa media nazionale da FAO 2019, mediata nell'intervallo 1997-2003: cereale MAIS. L'area cerchiata in verde mette in evidenza i territori della Russia.

Nonostante le incongruenze evidenziate, il modello è in grado di simulare la resa del mais con buona correlazione, facendo registrare un coefficiente di Pearson, pesato sull'area coltivata, pari a 0.97.

4.1.3 RISO

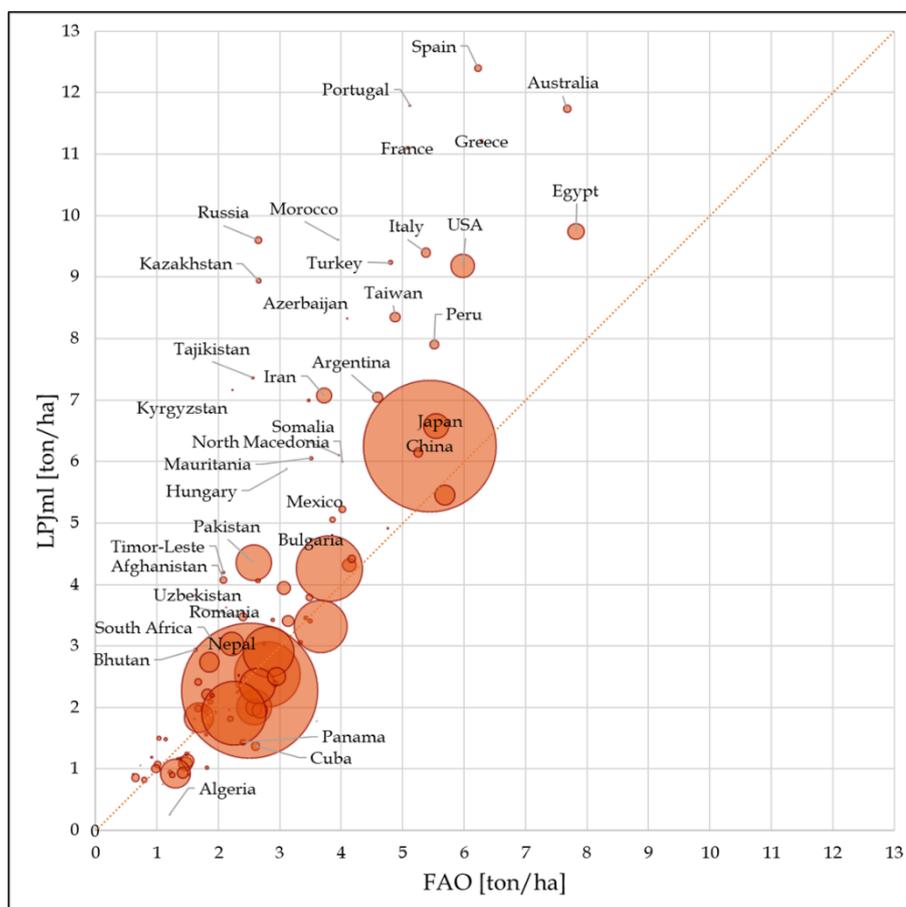


Figura 15 Confronto fra resa media nazionale, pesata sulle aree, simulata dal modello LPJ, e resa media nazionale da FAO statistic 2019, mediata nell'intervallo 1997-2003: cereale RISO.

La valutazione dei dati simulati riguardanti il riso, nella letteratura di riferimento di Bondeau et al. 2010, non è stata effettuata a causa di incongruenze fra le osservazioni satellitari di sviluppo fenologico e i dati simulati. Nonostante questo, nel corso del presente studio si è deciso di effettuare l'analisi delle prestazioni del modello nella simulazione del riso, con buoni risultati, come descritto di seguito.

L'89% della produzione mondiale di riso proviene dal continente asiatico [4], da Cina, India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Thailandia, Myanmar, Filippine e Pakistan. Tutte queste nazioni, ad esclusione di Pakistan e Cina, per le quali si riscontra una leggera sovrastima, mostrano un'ottima correlazione con i dati FAO, come è possibile osservare dallo scatter-plot in figura 15. Numerose sono invece le nazioni per le quali si registra una marcata sovrastima della resa da parte del modello. La capacità del modello di simulare correttamente la resa nei paesi asiatici,

deriva dall'adattamento locale previsto per l'Asia tropicale, dove il modello prevede la possibilità di effettuare due coltivazioni con, riso-riso, all'interno dello stesso anno.

Anche nel caso del riso, come già evidenziato per grano e mais, si riscontra una marcata tendenza alla sovrastima della resa in nazioni che effettuano coltivazioni con forte irrigazione. Si evidenziano inoltre, anche in questo caso, numerose aree coltivate MIRCA2000, sia irrigate che non irrigate, dove il modello considera la resa nulla, altro aspetto già evidenziato anche per grano e mais.

Nonostante queste problematiche, la simulazione della resa associata al riso fa registrare una buona correlazione con i dati FAO, con un coefficiente di Pearson pari a 0.95.

4.1.4 SOIA

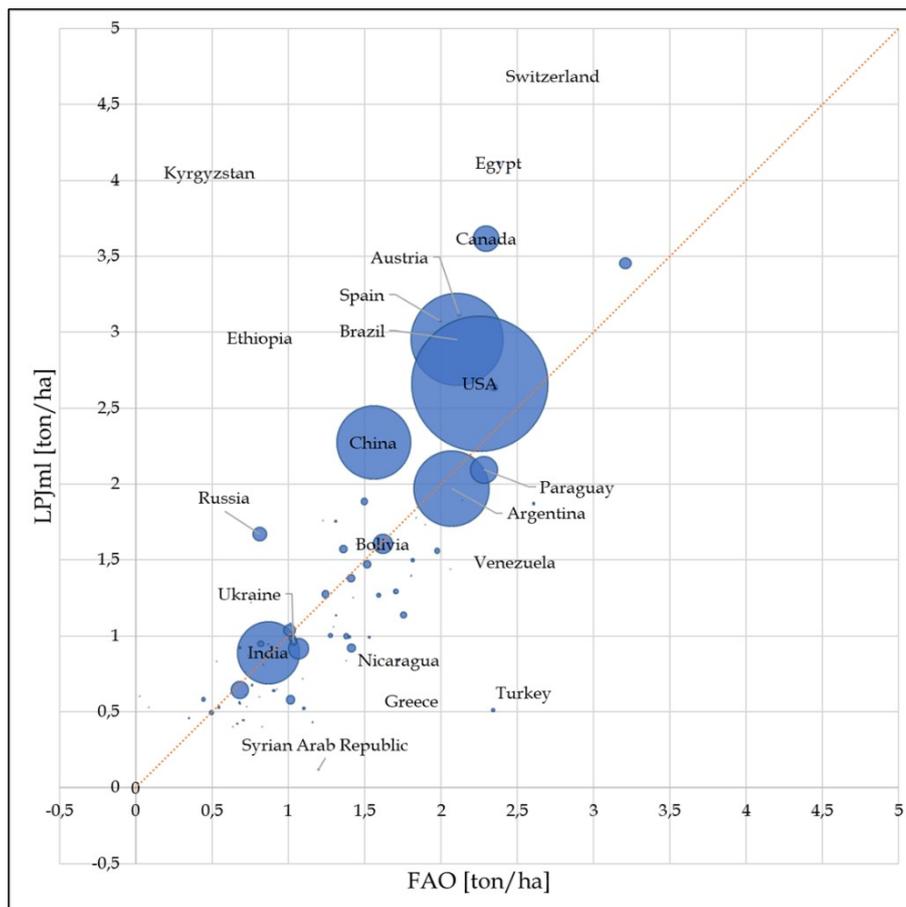


Figura 16 Confronto fra resa media nazionale, pesata sulle aree, simulata dal modello LPJ, e resa media nazionale da FAOstatistic 2019, mediati nell'intervallo 1997-2003: cereale SOIA.

La soia è il cereale meno diffusamente coltivato fra quelli analizzati. Come si può osservare dal grafico in figura 16, e dalla dimensione degli elementi circolari in esso presenti, solo Stati Uniti, Brasile, Cina, Argentina e India, coltivano abbondantemente la soia. Il modello simula con buona correlazione la resa associata ad Argentina e India, mentre la resa di USA, Cina e Brasile, presenta una leggera sovrastima rispetto ai dati FAO. Come si può osservare in figura 17, anche nel caso della soia, si riscontra l'esclusione da parte del modello di numerose aree adibite alla coltivazione senza irrigazione. L'esclusione di queste aree, potrebbe essere alla base della sovrastima della resa osservata in Cina, Brasile, Canada e Kirghizistan.

La scarsa capacità del modello di simulare la resa negli Stati Uniti può essere invece rintracciata nella parametrizzazione approssimativa applicata alla soia. La data di semina è infatti fissa per questo cereale, con unica differenziazione fra emisfero Nord e Sud. Il momento della semina determina l'inizio dello sviluppo

della pianta, determinando quindi la stagione durante la quale la pianta raggiungerà la maturazione.

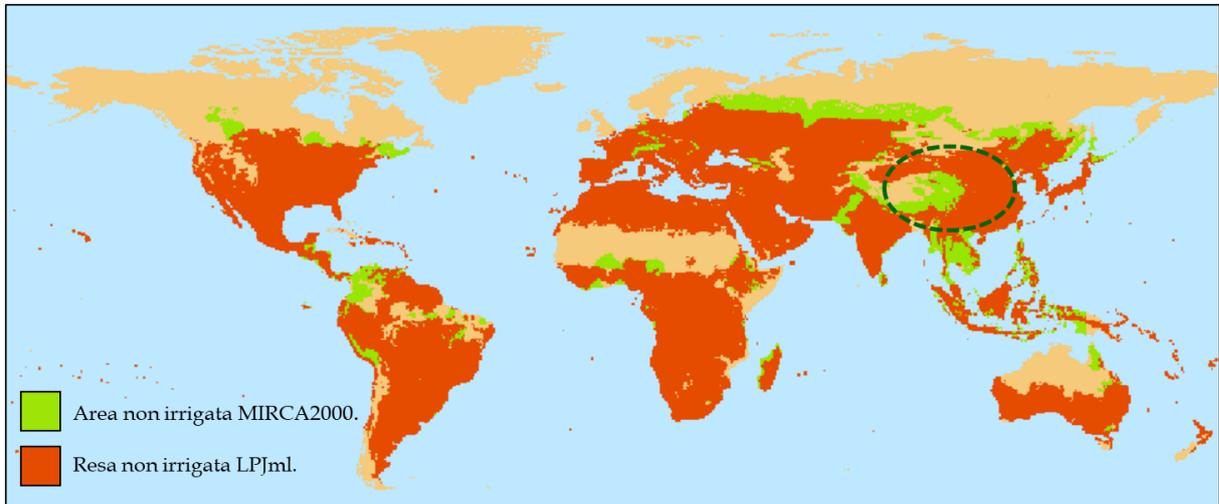


Figura 17 Confronto fra resa media nazionale simulata dal modello LPJ, e resa media nazionale da FAO 2019, mediati nell'intervallo 1997-2003: cereale SOIA.

L'accumulo degli HU da parte della pianta e le perdite per evapotraspirazione, sono funzione delle condizioni climatiche e quindi della stagione di crescita della pianta: ne consegue che l'attribuzione di una data di semina approssimativa comporterà un'erronea simulazione della resa e della WF . Questo aspetto, in una nazione vasta come gli stati uniti, che si estende su diverse zone climatiche, potrebbe essere all'origine delle incongruenze osservata.

La simulazione della soia risulta comunque buona nonostante le incongruenze riscontrate, con un coefficiente di Pearson pesato sulle aree pari a 0.84.

4.2 CALIBRAZIONE.

Sulla base delle incongruenze descritte nel capitolo precedente, si è deciso di effettuare la calibrazione della resa agricola riferendosi ai dati osservati FAO.

Una volta convertite le rese FAO tenendo conto del contenuto idrico dei cereali, come descritto precedentemente nel capitolo 3, si è proceduto calcolando il rapporto fra le rese medie nazionali, generate dal modello, mediate nell'intervallo 1997-2003, e le rese prelevate dai database FAO, mediate nello stesso intervallo, come schematizzato nel diagramma in figura 18. Il coefficiente correttivo utilizzato per la calibrazione è stato quindi calcolato mediante la seguente formula:

$$C_{crtt_i} = \frac{Y_{FAO_i}}{Y_{LPJml_i}} \quad (4.2)$$

dove C_{crtt-i} rappresenta il coefficiente correttivo delle i -esima nazione, Y_{FAO-i} rappresenta la resa FAO dell' i -esima nazione, e infine $Y_{LPJml-i}$ rappresenta la resa, dell' i -esima nazione, generata dal modello.

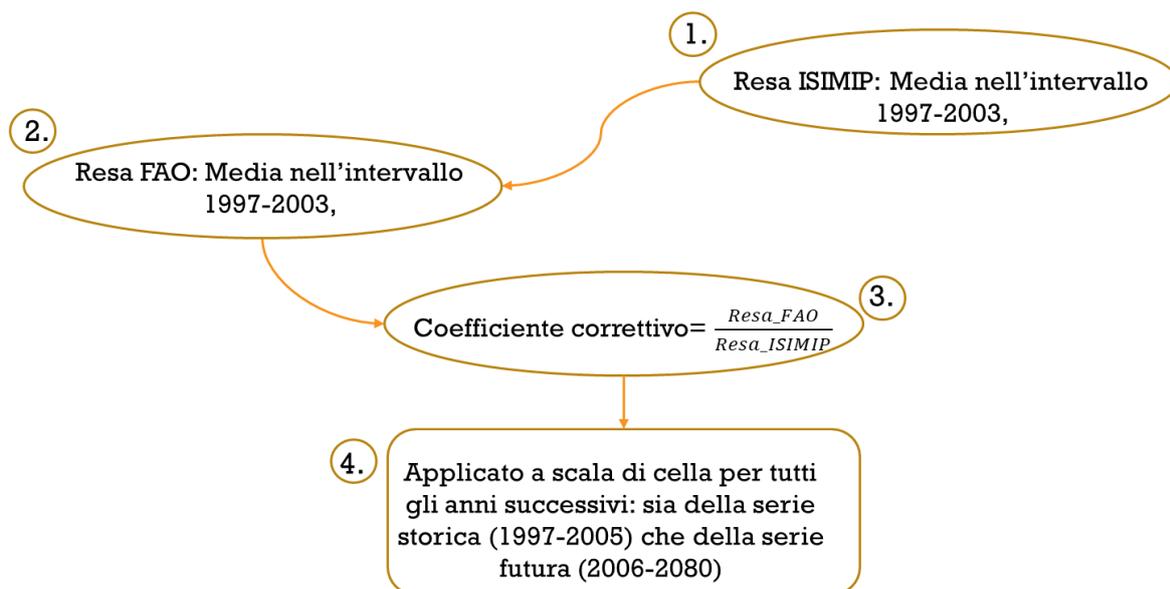


Figura 18 Schematizzazione della procedura di calcolo del coefficiente di calibrazione.

In questo modo si ottiene un coefficiente correttivo unico per ogni nazione, il quale viene successivamente applicato a scala di cella, come esemplificato in figura 19. Lo stesso coefficiente viene applicato per tutti gli anni della serie temporale storica (1997-2005) e futura (2006-2099), quest'ultima distinta nei due scenari di cambiamento climatico RCP 2.6 e 6.0.

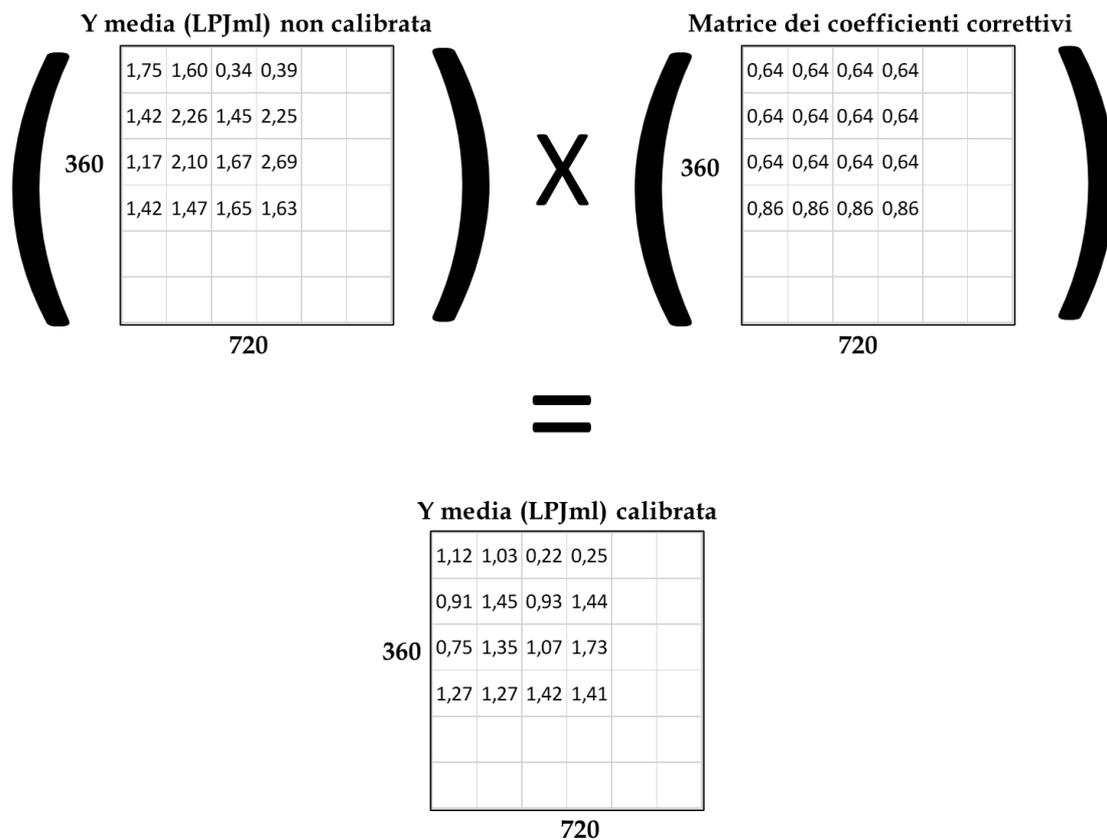


Figura 19 Visualizzazione della procedura di applicazione del coefficiente di calibrazione mediante prodotto elemento per elemento.

Mediante la calibrazione della resa è possibile inoltre migliorare la correlazione dei dati di impronta idrica in maniera indiretta, essendo quest'ultima funzione della resa stessa. Si è quindi proceduto confrontando i dati calibrati nella serie storica, intervallo 1997-2003 e nella serie futura, intervallo 2010-2016, con i dati osservati, come esposto nei capitoli successivi.

4.3 VALIDAZIONE RESA CALIBRATA.

Applicando il fattore correttivo così calcolato, la resa media nazionale simulata, nell'intervallo 1997-2003, viene forzata ad eguagliare i dati di riferimento FAO. La validazione della resa storica ha quindi lo scopo di verificare la corretta applicazione del coefficiente correttivo, confermando l'uguaglianza fra le serie di dati, come testimonia la disposizione dei dati lungo la linea bisettrice in figura 20.

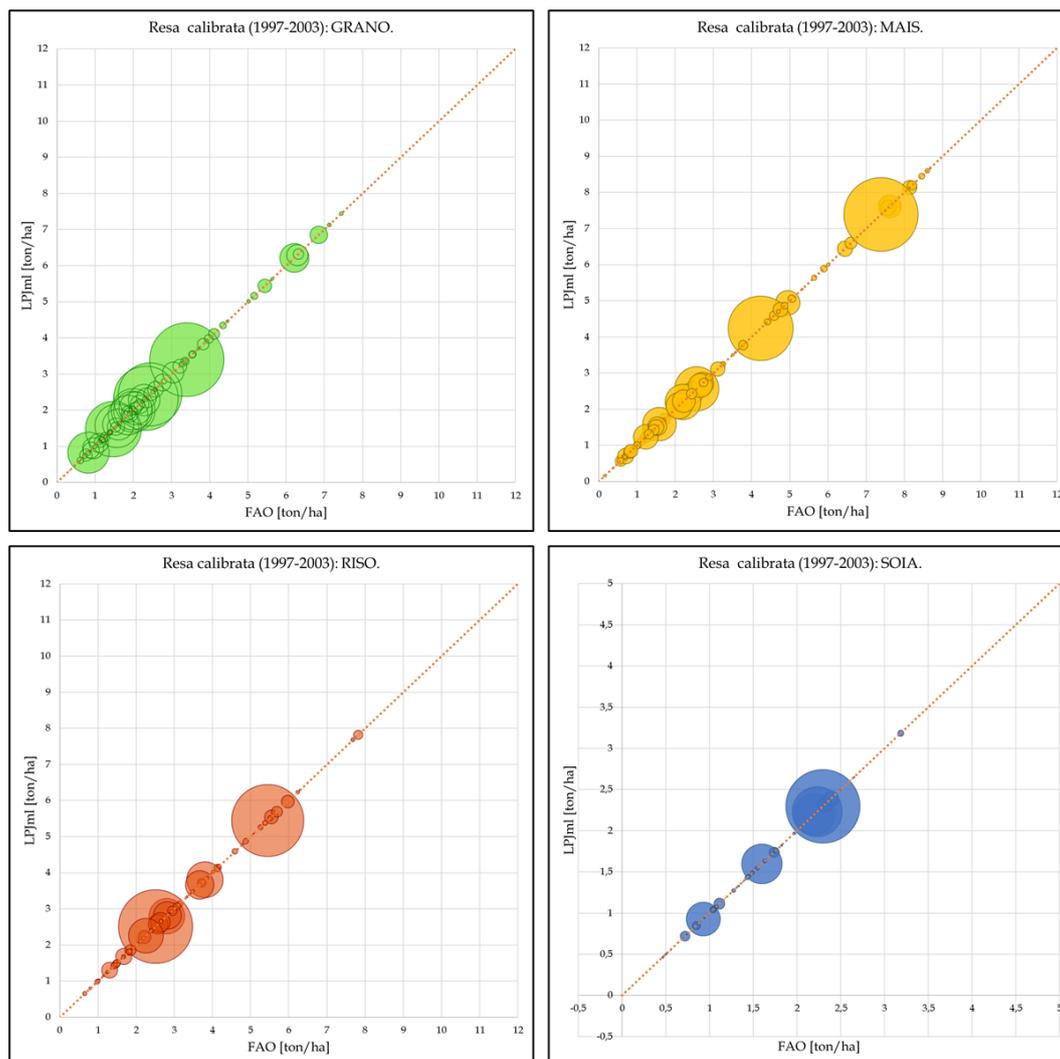


Figura 20 Scatter plot di resa (LP]ml) calibrata vs resa (FAO), mediata nell'intervallo 1997-2003. Ogni elemento circolare rappresenta una nazione, la loro dimensione è pari all'area totale coltivata nella medesima nazione. In verde il grano, giallo il mais, in rosso il riso e in blu la soia.

4.4 VALIDAZIONE IMPRONTA IDRICA CALIBRATA.

Di seguito confronteremo i dati provenienti dal database CWASI, sviluppato nel lavoro di Tamea et al (2021)[20] e l'impronta idrica simulata. Analizzeremo quindi la correlazione fra i dati simulati sia prima della calibrazione che dopo la calibrazione, così da verificare la riuscita della procedura.

Il database CWASI (Coping with Water Scarcity In a globalized world), finanziato dall'Unione Europea, raccoglie i dati di impronta idrica (WF) e di impronta idrica virtuale (Virtual WF), relativi a 370 prodotti agricoli. I dati di impronta idrica sono forniti in sotto forma di media nazionale, coprendo l'intervallo temporale 1961-2016. L'impronta idrica unitaria [l/kg] connessa alla produzione agricola, derivata dal database CWASI, viene calcolata utilizzando il metodo fast-track (FT) sviluppato nel lavoro Tuninetti et al (2017) [21] : la WF così calcolata è funzione dell'evapotraspirazione che avviene nel corso del periodo di crescita e della resa agricola, in conformità con l'impronta idrica simulata dal modello LPJml [20]. Nello specifico l'impronta idrica unitaria, indicata in Tame et al(2021) [20] come $uWFp$ (unitary Water Footprint), relativa al prodotto agricolo p , prodotto nella nazione c , nell'anno t viene calcolata tramite la seguente equazione:

$$uWFp_{c,p,t} = \overline{uWFp_{c,p,T}} \cdot \frac{\overline{Y_{c,p,T}}}{\overline{Y_{c,p,t}}} \quad (4.3)$$

Dove $\overline{uWFp_{c,p,T}}$ è l'impronta idrica di riferimento proveniente dai database WaterStat, mediata nell'intervallo temporale T 1996-2005, $\overline{Y_{c,p,T}}$ rappresenta la resa media nazionale mediata nello stesso intervallo T , mentre $\overline{Y_{c,p,t}}$ è la media nazionale relativa ad un generico anno t dell'intervallo 1961-2016 [20]. I dati di resa media nazionale $\overline{Y_{c,p,T}}$ utilizzati per il calcolo dell'impronta idrica unitaria, sono stati calcolati operando una media temporale, pesata sulle aree coltivate, nell'intervallo 1996-2005, utilizzando i dati di resa e superficie coltivata FAOSTAT (FAO 2019) [20].

Nel corso della presente validazione si è operata una media temporale dei dati CWASI nell'intervallo 1997-2003 (serie storica) e 2010-2016 (serie futura), che sono quindi stati confrontati con i dati simulati mediati negli stessi intervalli.

I dati di impronta idrica medi nazionali e il coefficiente di Pearson pesato, sono stati calcolati utilizzando la produzione nazionale come peso. La produzione nazionale è stata utilizzata anche per il dimensionamento degli elementi circolari negli scatter-plot di impronta idrica presentati di seguito.

4.4.1 Grano.

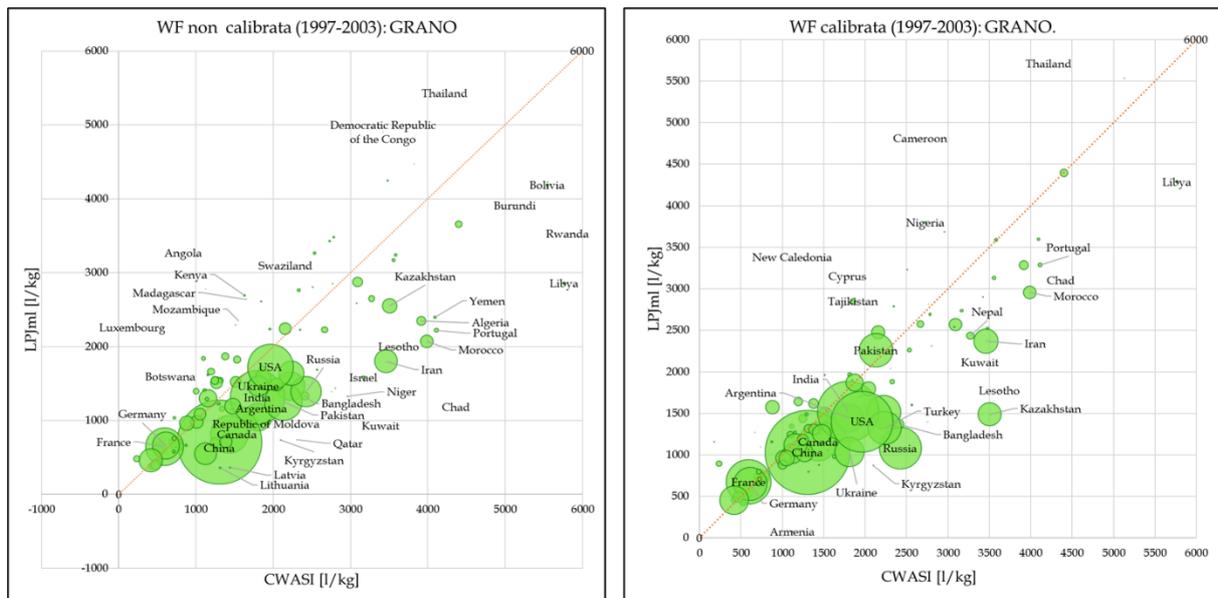


Figura 21 A sinistra lo scatter plot dei valori di impronta idrica medi nazionali prima della calibrazione, a destra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: GRANO.

Osservando i dati di impronta idrica non calibrati in figura 21 si può osservare come, nonostante si mantenga una buona correlazione, l'impronta idrica delle maggiori produttrici quali, Cina, India, Russia, Francia, USA, Canada, Ucraina, Pakistan e Argentina, risulti leggermente sottostimata; fanno eccezione Francia e Germania dove la correlazione è ottima. A queste nazioni si affiancano Iran, Marocco e Kazakistan, per le quali la *WF* simulata risulta fortemente sottostimata. Numerose nazioni produttrici secondarie di grano, mostrano una correlazione molto buona, posizionandosi nei pressi della linea mediana. Infine, in alto a sinistra in figura 22, si osservano alcuni casi di forte sovrastima in paesi come Nuova Caledonia, Madagascar, Kenya, Angola e il Mozambico.

Analizzando invece i dati sottoposti a correzione, grafico a destra in figura 21, si osserva come la calibrazione porta ad un miglioramento della correlazione per la maggior parte delle nazioni, in special modo, Cina, Pakistan, India ed Argentina, mentre l'impronta idrica dell'Iran subisce una correzione leggera. La correzione risulta efficace anche per numerose nazioni piccole produttrici, per le quali prima della calibrazione si registrava una forte sovrastima. La procedura sembra tuttavia portare ad una leggera sottostima dell'impronta idrica di USA e Romania, mentre fortemente sottostimati a seguito della calibrazione risultano i dati del Kazakistan. Il coefficiente di Pearson pesato passa da 0.82, prima della calibrazione, a 0.81 per i dati calibrati, confermando una leggera riduzione della correlazione a seguito della calibrazione. Il coefficiente di Pearson non pesato mostra invece un miglioramento della correlazione generale e passa da 0.64 a 0.90, a seguito della calibrazione.

4.4.2 Mais.

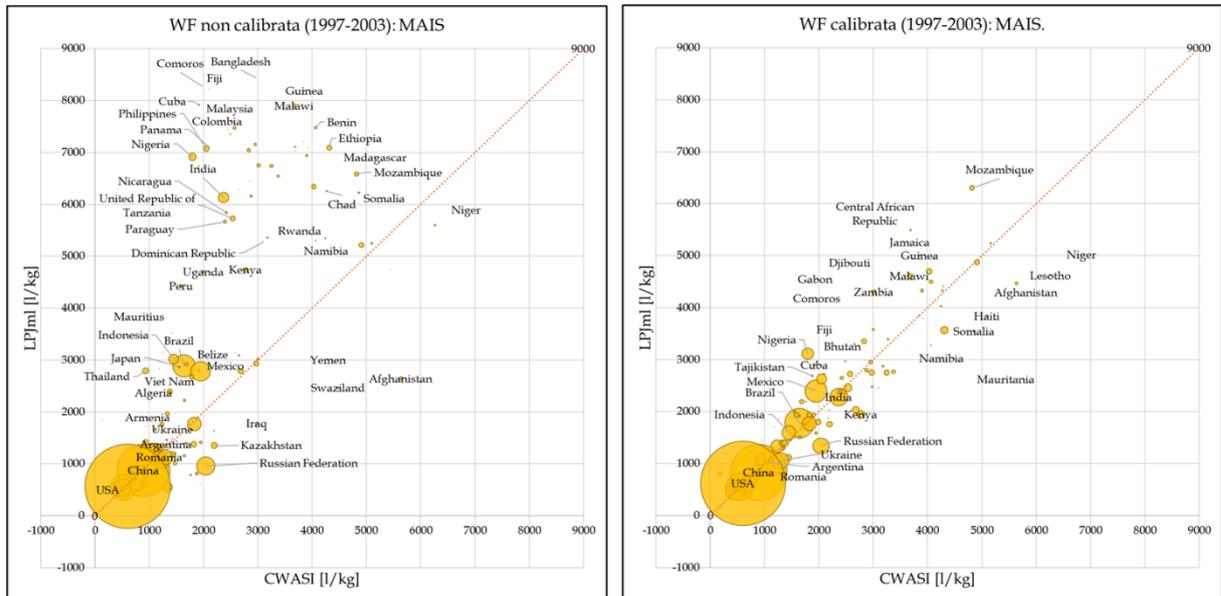


Figura 22 A sinistra lo scatter plot dei valori di impronta idrica medi nazionali prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: MAIS.

L'impronta idrica simulata di USA, Cina, Romania, Ucraina e Russia, tutte importantissime produttrici di mais a livello mondiale [19], mostra un'ottima correlazione, con una leggera sottostima per la Russia. Indonesia, Brasile e Messico, anch'esse fra le maggiori produttrici di mais, fanno registrare invece una leggera sovrastima rispetto ai dati di riferimento. Risulta invece evidente come l'impronta idrica di numerosi paesi interessati da climi caldi, aridi o tropicali, tra i quali Bangladesh, Nigeria, Panama, Ecuador, Madagascar, Zambia, Mozambico, Filippine, risulti fortemente sovrastimata; tra questi spicca l'India, settima produttrice mondiale, in alto a sinistra in figura 22. Osservando lo scatter-plot relativo ai dati calibrati, parte destra della figura 22, si osserva come la forte sovrastima che interessa numerose nazioni piccole produttrici viene corretta in modo soddisfacente tramite la procedura. L'impronta idrica di India, Brasile e Messico, precedentemente sovrastimata, viene anch'essa corretta efficacemente. Il coefficiente di Pearson pesato passa da 0.77 a 0.94, mentre il coefficiente di Pearson non pesato passa da 0.49 a 0.84, confermando il miglioramento della correlazione grazie alla calibrazione della resa.

4.4.3 Riso.

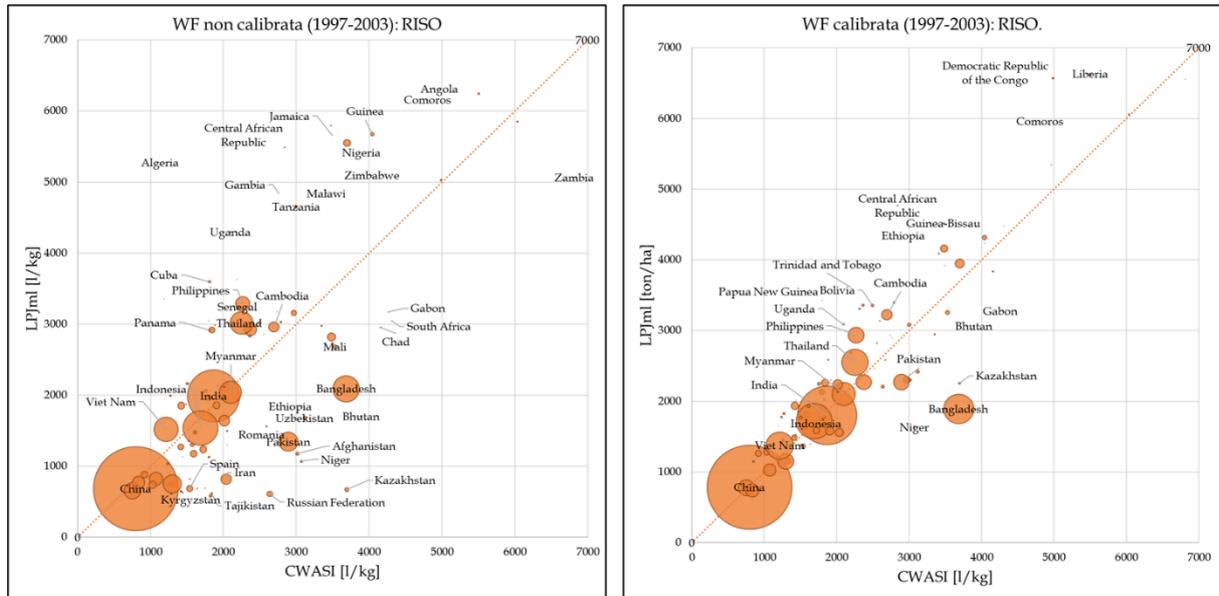


Figura 23 A sinistra lo scatter plot dei valori di impronta idrica medi nazionali prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: RISO.

Osservando lo scatter-plot di impronta idrica non calibrata in figura 23, si evidenzia come in Cina, India, Indonesia e Vietnam, si riscontra un'ottima correlazione con i dati di riferimento, anche prima della calibrazione. Thailandia e Cambogia mostrano invece una leggera sovrastima mentre l'impronta idrica in Bangladesh e Pakistan, rispettivamente quarta e nona produttrice mondiale [19], risulta sottostimata. Come già riscontrato per mais e grano, il modello simula con difficoltà l'impronta idrica in numerose nazioni dove la coltivazione di riso è poco estesa, sovrastimando o sottostimando la l'impronta idrica.

Mediante la calibrazione della resa, l'impronta idrica di numerose piccole coltivatrici, per le quali precedentemente si registrava una forte sovrastima, o sottostima, viene corretta efficacemente. Inefficace risulta invece la procedura per quanto riguarda il Bangladesh, la cui impronta idrica continua ad essere sottostimata.

Il coefficiente di Pearson pesato, passa da 0.78 a 0.84 grazie alla calibrazione, mentre il coefficiente di Pearson non pesato passa da 0.59 a 0.83, confermando la buona riuscita della procedura.

4.4.4 Soia.

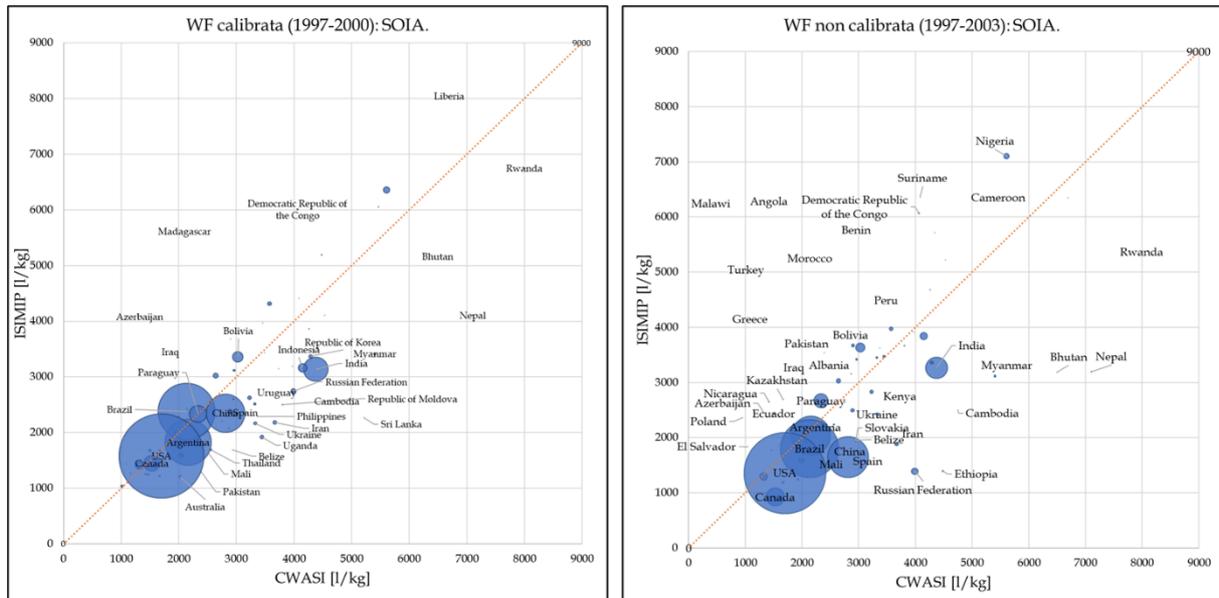


Figura 24 A sinistra lo scatter plot dei valori di impronta idrica medi nazionali prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: SOIA.

Osservando lo scatter-plot di impronta idrica non calibrata, parte sinistra della figura 24, si evidenzia che l'impronta idrica simulata di USA, Canada, Brasile e Argentina, alcune tra le maggiori coltivatrici di soia, viene simulata una buona correlazione con i dati di riferimento, anche prima della calibrazione. In Cina e India, invece, il modello sottostima l'impronta idrica. La simulazione dell'impronta idrica connessa alle nazioni piccole produttrici risulta invece inaccurata, con numerosi casi di sovrastima o sottostima.

Applicando il coefficiente correttivo, come si può osservare nella in figura 24 sezione destra, la correlazione delle principali produttrici viene migliorata ulteriormente, riducendo la sottostima che interessava Canada, Brasile e Cina. Inoltre, viene efficacemente risolta anche la forte sovrastima che interessava le piccole produttrici, la procedura sembra tuttavia inefficiente nella correzione dell'impronta idrica dell'India. Il coefficiente di Pearson pesato passa da 0.74 a 0.85, mentre il coefficiente calcolato trascurando i pesi, passa da 0.14 a 0.88.

4.5 VALIDAZIONE SERIE FUTURA: INTERVALLO 2010-2016.

Come esposto nei precedenti capitoli, l'analisi svolta nel presente lavoro si concentra sull'intervallo temporale che va da 1997 al 2080. Come già esposto nei capitoli precedenti, questo intervallo temporale si divide in una serie storica (1997-2005) e una serie futura (2006-2080), distinta nei due scenari di cambiamento climatico RCP 2.6 e 6.0.

Per valutare dell'efficacia della calibrazione anche nella correzione della serie futura, si è scelto di effettuare la validazione nell'anno 2013, mediando nell'intervallo temporale 2010-2016. Le condizioni climatiche e di composizione atmosferica rappresentate dallo scenario RCP 6.0 sono le più vicine a quelle dell'anno 2013, si è quindi scelto di effettuare la validazione sui dati relativi a questo scenario. Di seguito si presentano quindi gli scatter-plot di resa media nazionale, e impronta idrica media nazionale, sia calibrati che non calibrati.

4.5.1 Validazione resa.

4.5.1.1 *Grano.*

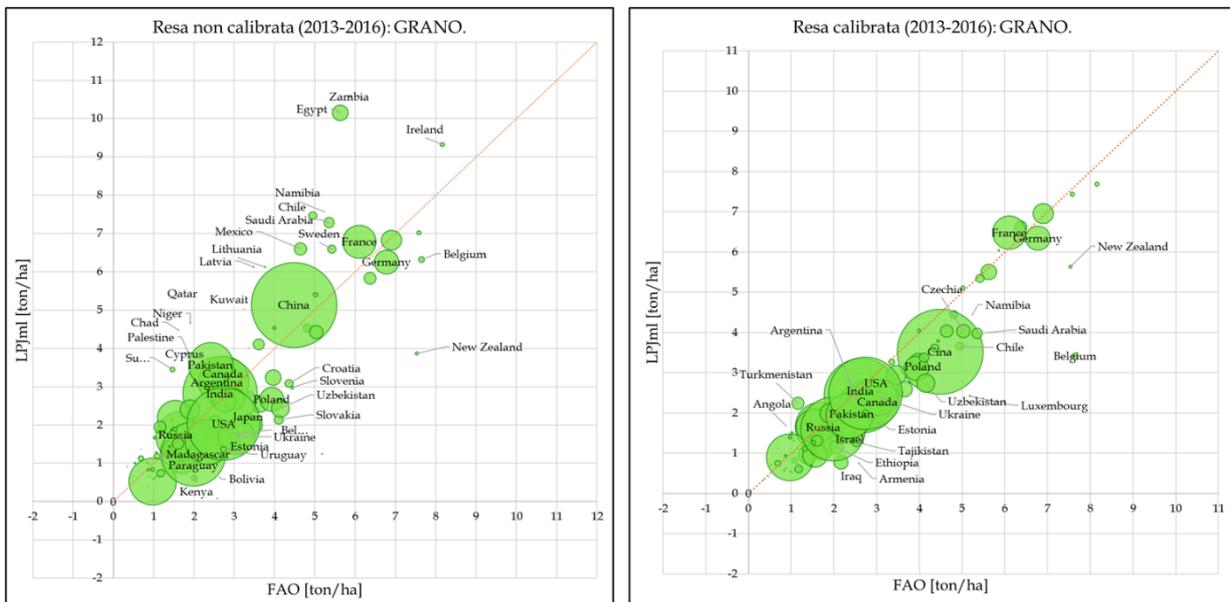


Figura 25 A sinistra lo scatter plot dei valori resa media nazionale, pesata sulle aree, prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: GRANO.

Osservando lo scatter-plot di resa non calibrata, a sinistra, e di resa calibrata a destra, in figura 25, è possibile constatare che i dati relativi a Cina, Pakistan, Canada e Argentina, i quali presentavano una leggera sovrastima, vengono corretti in modo

efficace tramite la procedura di calibrazione. Lo scatter-plot relativo alla serie non calibrata evidenzia, inoltre, numerose nazioni per le quali il modello sovrastima, o sottostima fortemente i dati. Anche questa problematica viene risolta per mezzo della calibrazione. Interessante notare come la calibrazione, che si ricorda essere riferita all'anno 2000, comporta una leggera sottostima dei dati relativi alla Cina, rispetto ai dati FAO relativi all'intervallo 2010-2016. Questo aspetto può derivare dal miglioramento nella selezione e ibridazione di varietà di grano ad alta resa avvenuto negli ultimi decenni, aspetto non simulato dall'LPJml. Avendo inoltre calcolato il coefficiente di calibrazione riferendosi ai dati di resa FAO dell'anno 2000, la sua applicazione può essere alla base della leggera sovrastima evidenziata.

L'efficacia della calibrazione resta evidente, portando il coefficiente di Pearson pesato sulle aree da 0.89 a 0.95.

4.5.1.2 *Mais.*

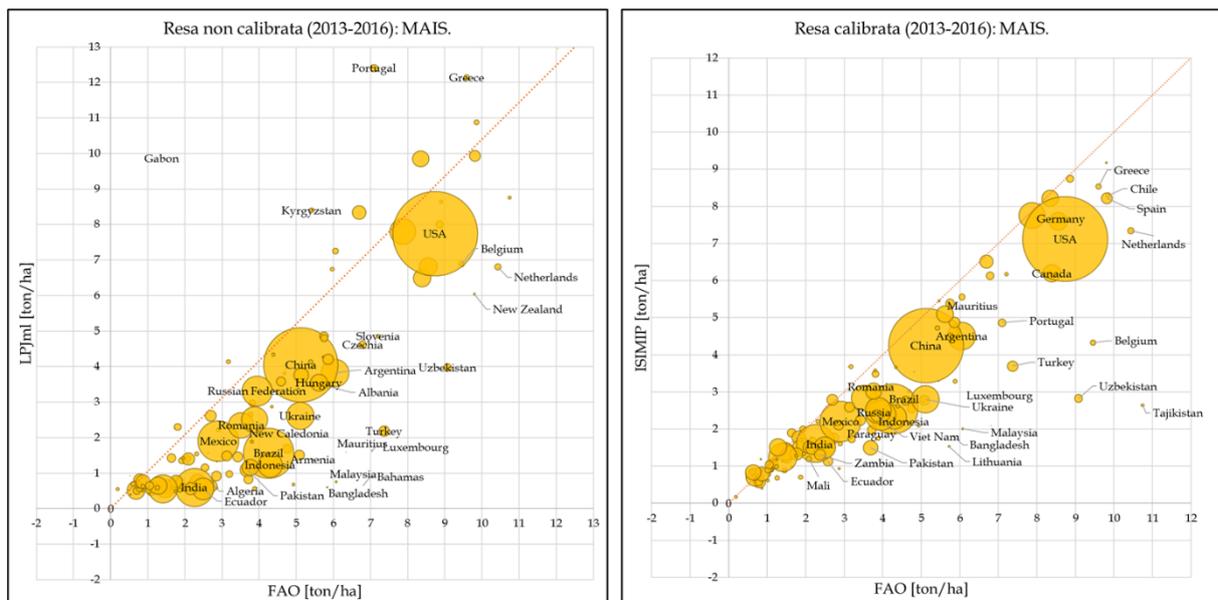
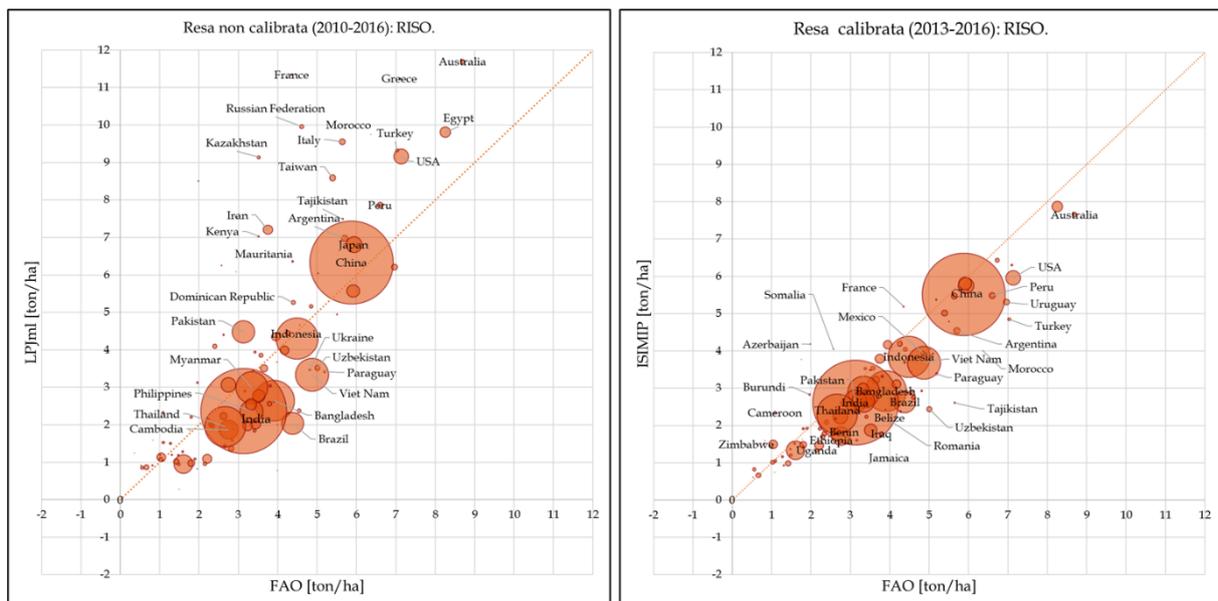


Figura 26 A sinistra lo scatter plot dei valori resa media nazionale, pesata sulle aree, prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: MAIS.

La sezione destra in figura 26, relativa ai dati di WF non calibrati, evidenzia come la simulazione del mais nell'anno 2013 mostri una marcata sovrastima che interessa la quasi totalità delle nazioni, comprese tutte le principali produttrici. Questa problematica può essere attribuita allo sviluppo, avvenuto negli ultimi decenni, di numerose specie ibride del cereale, che garantiscono una resa superiore a quella simulata all'interno del modello [9]. Un altro aspetto che può comportare una

sottostima da parte del modello, è connesso allo sviluppo di pratica agricole, diffuse spesso in asia, che prevedono la coltivazione consociata di più specie vegetali all'interno dello stesso anno, a fini di migliorare la produttività delle colture [9, 14]. La coltivazione consociata non è prevista per il mais e questo può essere alla base della sottostima osservata. Mediante la calibrazione è stato tuttavia possibile ridurre la sottostima evidenziata per la maggior parte delle nazioni, ed è stato possibile risolvere la forte sovrastima che interessa Portogallo, Grecia, Gabon, e Kirghizistan. Alcune nazioni, come Uzbekistan, Turchia, e Tajikistan, non sembrano invece rispondere alla calibrazione. La correlazione risulta tuttavia migliorata grazie alla calibrazione, con un coefficiente di Pearson pesato pari che passa da 0.94, per la serie non calibrata, a 0.96 per la serie calibrata.

4.5.1.3 Riso



Osservando il grafico relativo alla serie non calibrata in figura 27, si può osservare

Figura 27 A sinistra lo scatter plot dei valori resa media nazionale, pesata sulle aree, prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: MAIS.

come il modello simuli molto bene la resa delle principali produttrici anche nella serie futura. Il riso viene coltivato per la maggior parte in asia, ed in questi paesi è molto diffusa la coltivazione del riso in due cicli nel corso dello stesso anno. Il modello prevede questa pratica per il riso, mentre come già detto la esclude per tutte le altre tipologie di cereali, riuscendo quindi a simulare correttamente la resa nei paesi asiatici, principali produttori mondiali, anche prima della calibrazione [9;11]. In figura 27 si può osservare come numerose nazioni, interessate sia da climi caldi e aridi, come Kazakistan, Tajikistan, Marocco, Azerbaijan, che da climi freddi o temperati come Russia, Francia, Italia, Grecia e USA, vengano simulate con forte

sovrastima da parte del modello. Applicando la calibrazione sviluppata nel presente lavoro è stato tuttavia possibile risolvere efficacemente anche queste problematiche. La calibrazione porta ad un miglioramento della correlazione per quasi tutte le nazioni dove il riso viene coltivato, facendo registrare un coefficiente correttivo pari a 0.97, contro lo 0.92 relativo alla serie non calibrata.

4.5.1.4 Soia.

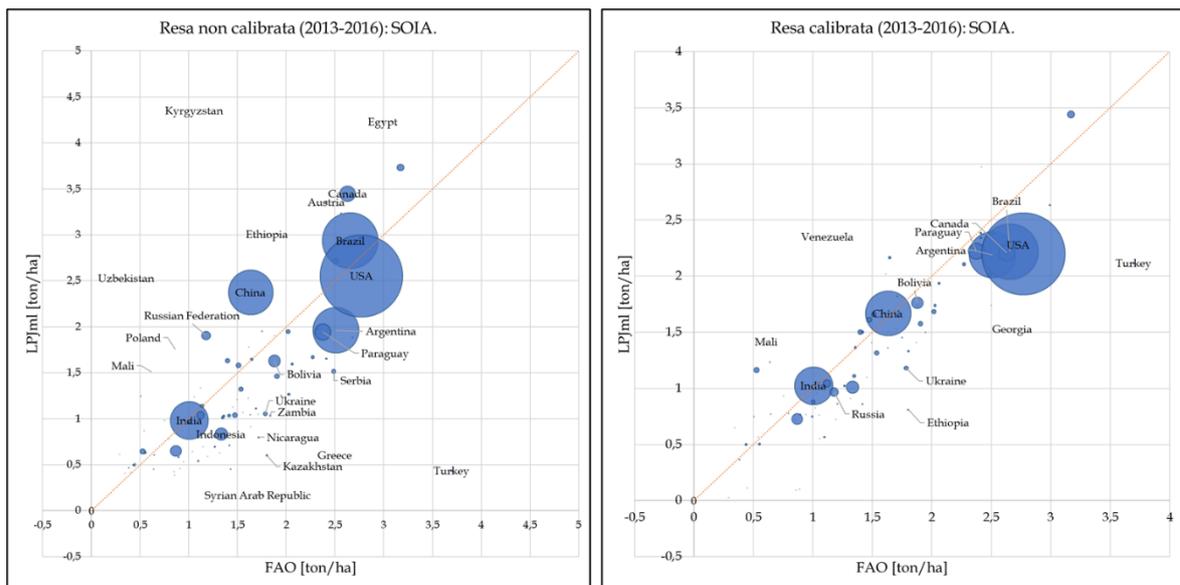


Figura 28 A sinistra lo scatter plot dei valori resa media nazionale, pesata sulle aree, prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: SOIA.

Come si può osservare nella sezione sinistra della figura 28, la resa in Cina e Brasile, due fra le principali produttrici, risulta sovrastimata, mentre USA, Indonesia, India e Argentina fanno registrare una leggera sottostima. Numerose sono le nazioni per le quali il modello sottostima la resa, come Bolivia, Kazakistan, Grecia, Turchia e Serbia, mentre la resa in Russia, Polonia, Uzbekistan, Canada, Egitto e Kirghizistan risulta fortemente sovrastimata. La scarsa capacità del modello nel simulare resa della soia, come già spiegato nel paragrafo riguardante la validazione della serie storica, può essere attribuita all'approssimativa parametrizzazione prevista dal modello per la soia.

Applicando il coefficiente correttivo è stato tuttavia possibile risolvere queste incongruenze con l'eccezione dei dati relativi agli USA. Anche in questo lo sviluppo di tecniche agricole e di specie ibride ad alta efficienza può aver portato ad un incremento dei valori di resa superiori a quelli previsti dal modello. Il coefficiente di Pearson conferma la buona riuscita della correzione applicata, passando da 0.77 a 0.96 dopo la calibrazione.

4.5.2 Validazione impronta idrica.

4.5.2.1 Grano

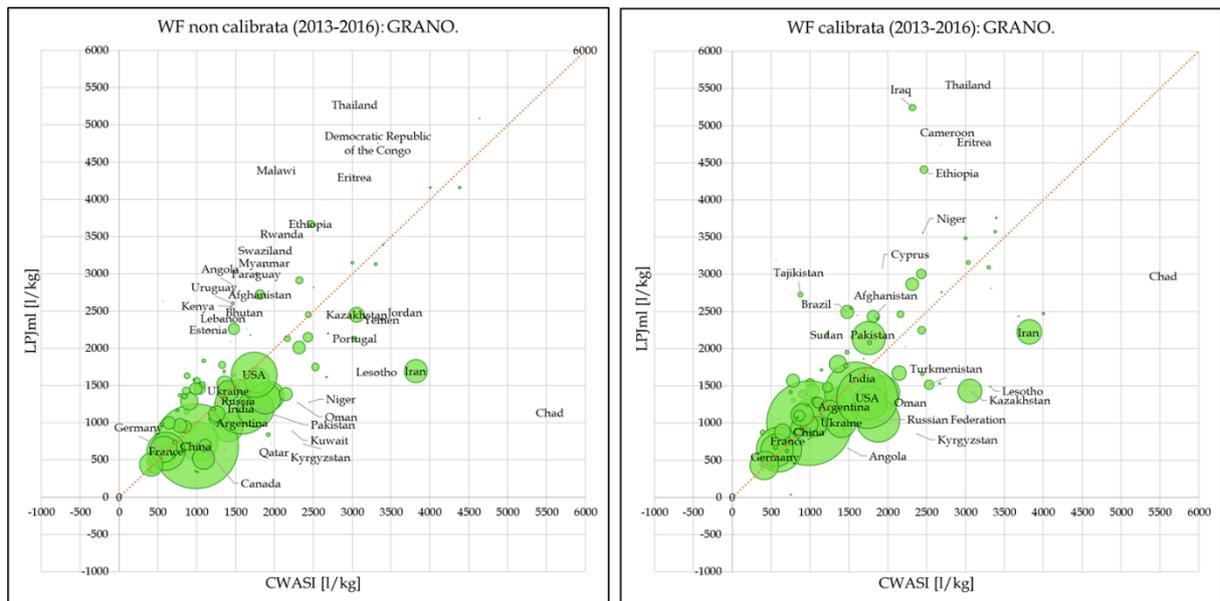


Figura 29 A sinistra lo scatter-plot dei valori di impronta idrica medi nazionali, pesata sulla produzione, prima della calibrazione e a destra lo scatter-plot dei dati calibrati. Cereale: GRANO.

Come si può osservare nella sezione sinistra della figura 29, la simulazione dell'impronta idrica connessa al grano risulta essere molto buona per le principali produttrici, quali USA, Ucraina, Francia, Germania, Russia, e India, con una leggera sottostima per Cina, Canada, Argentina e Pakistan. Iran e Kazakistan, nazioni con un'importante produzione di grano, presentano invece un'evidente sottostima. L'impronta idrica associata a numerose nazioni piccole produttrici risulta invece sovrastimata.

Applicando la correzione si può osservare, nella sezione destra della figura 29, come la sottostima che interessava Cina, prima produttrice mondiale, Canada e Argentina venga risolta efficacemente. La calibrazione comporta tuttavia alcune problematiche: l'impronta idrica di Usa e Russia risulta sottostimata a seguito della calibrazione, la sottostima che interessava il Kazakistan viene esacerbata, ed infine l'impronta idrica dell'Iran viene corretta blandamente.

Il coefficiente di Pearson pesato passa da 0.77 prima della calibrazione a 0.70 dopo l'applicazione del coefficiente correttivo a suggerire un lieve peggioramento della correlazione a seguito della calibrazione. Tuttavia, considerando il coefficiente di Pearson non pesato, trascurando quindi la relativa importanza della produzione

nazionale, si osserva come la calibrazione della resa sia efficace nella correzione dell'impronta idrica anche nell'anno 2013, portando il coefficiente di Pearson non pesato da 0.58 a 0.83, indicando un efficace correzione della WF associata alle piccole produttrici.

4.5.2.2 *Mais*

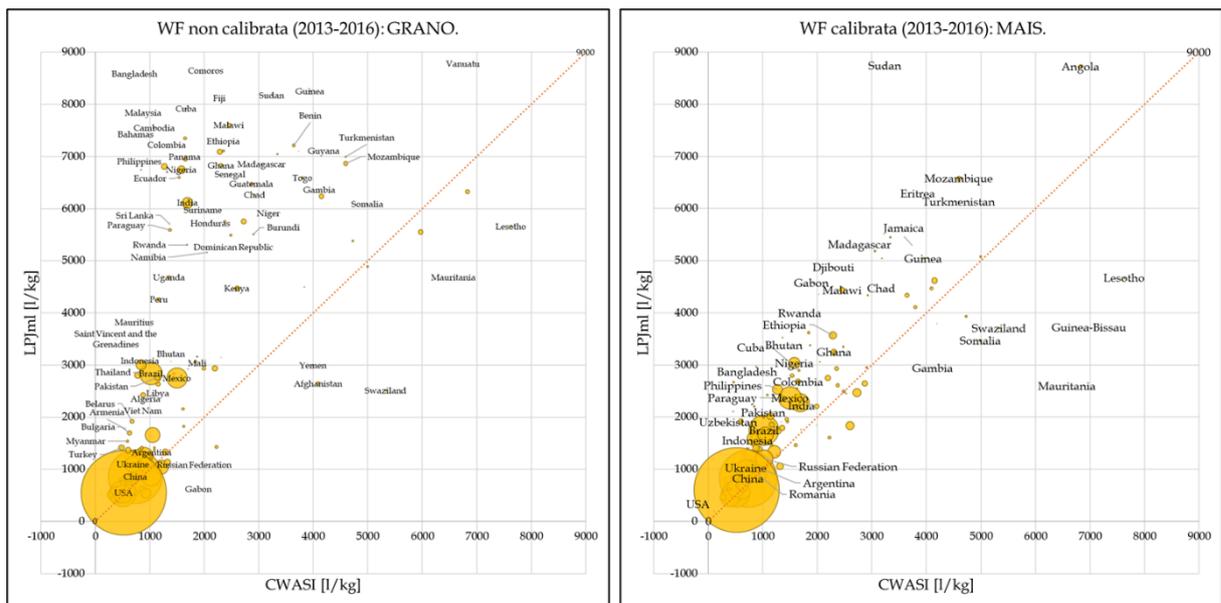


Figura 30 A sinistra lo scatter plot dei valori di impronta idrica medi nazionali, pesata sulla produzione, prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: MAIS

Come osservato precedentemente nella validazione della serie storica, l'impronta idrica del mais risulta fortemente sovrastimata per numerose nazioni anche riferendosi all'anno 2013, come può essere osservato in figura 30. La correlazione delle principali produttrici risulta invece molto buona con l'eccezione di Messico, Brasile e Indonesia, per le quali il modello sovrastima leggermente la WF.

Attraverso la calibrazione della resa, è stato possibile risolvere con ottimi risultati queste incongruenze: la sovrastima attribuita a Messico, Brasile e Indonesia viene alleviata notevolmente e l'impronta idrica delle nazioni piccole produttrici, notevolmente sovrastimata in precedenza, viene avvicinata ai dati di riferimento con ottimi risultati. Nei confronti del mais la calibrazione è quindi molto efficace, sia per le produttrici minori che per le principali produttrici mondiali, portando il coefficiente di correlazione da 0.74 a 0.90 dopo la calibrazione. Il coefficiente di Pearson non pesato passa invece da 0.47 a 0.80, confermando la buona riuscita della procedura.

4.5.2.3 Riso.

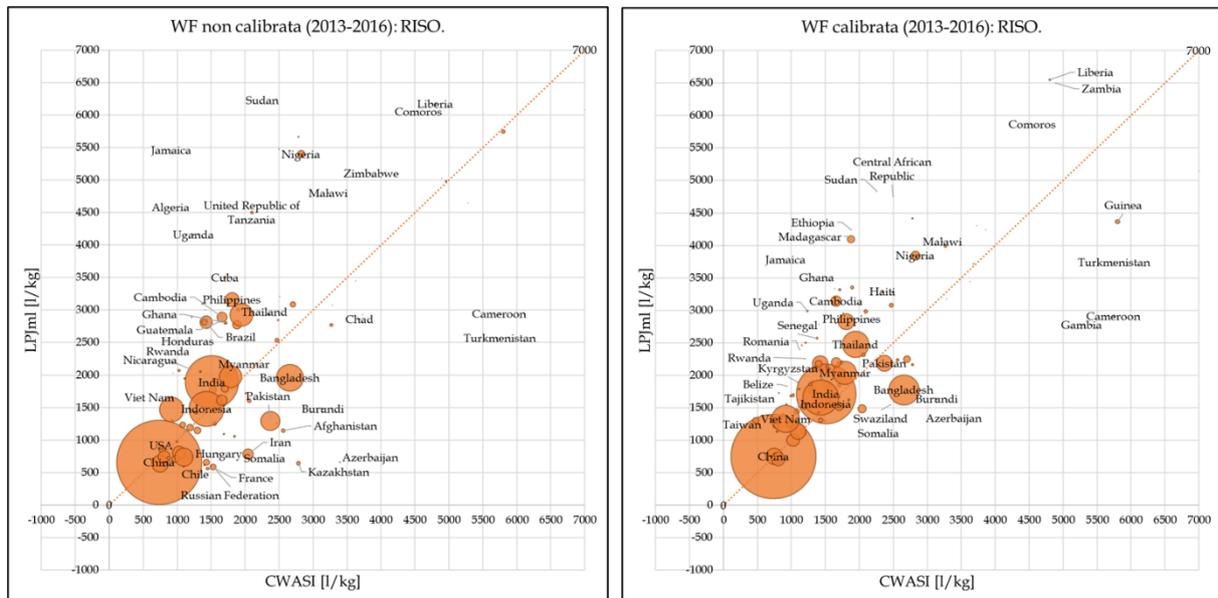


Figura 31 A sinistra lo scatter plot dei valori di impronta idrica medi nazionali, pesata sulla produzione, prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: RISO.

Osservando il grafico relativo alla serie non calibrata in figura 31, si osserva come l'impronta idrica di alcune delle principali produttrici, quali Thailandia, Brasile e Filippine, risulti leggermente sovrastimata, mentre in Bangladesh e Pakistan si evidenzia sottostimata dei dati simulati rispetto ai dati di riferimento.

Come già osservato per le altre tipologie di cereali, il modello simula con difficoltà l'impronta idrica delle nazioni con bassa produzione, sovrastimando o sottostimando i valori dell'impronta idrica in queste nazioni. Questa incongruenza viene efficacemente risolta attraverso la calibrazione, con l'eccezione di Cameroon, Turkmenistan e Comoros. Inoltre la sovrastima che interessava importanti produttrici di riso come Thailandia e Brasile è stata risolta, mentre l'impronta idrica associata al Bangladesh e alle Filippine non riesce ad essere corretta del tutto mediante la calibrazione della resa. La calibrazione risulta comunque efficace anche nel caso del mais, portando il coefficiente di correlazione da 0.78 a 0.83 dopo la calibrazione; il coefficiente di Pearson non pesato passa invece da 0.62 a 0.76.

4.5.2.4 Soia

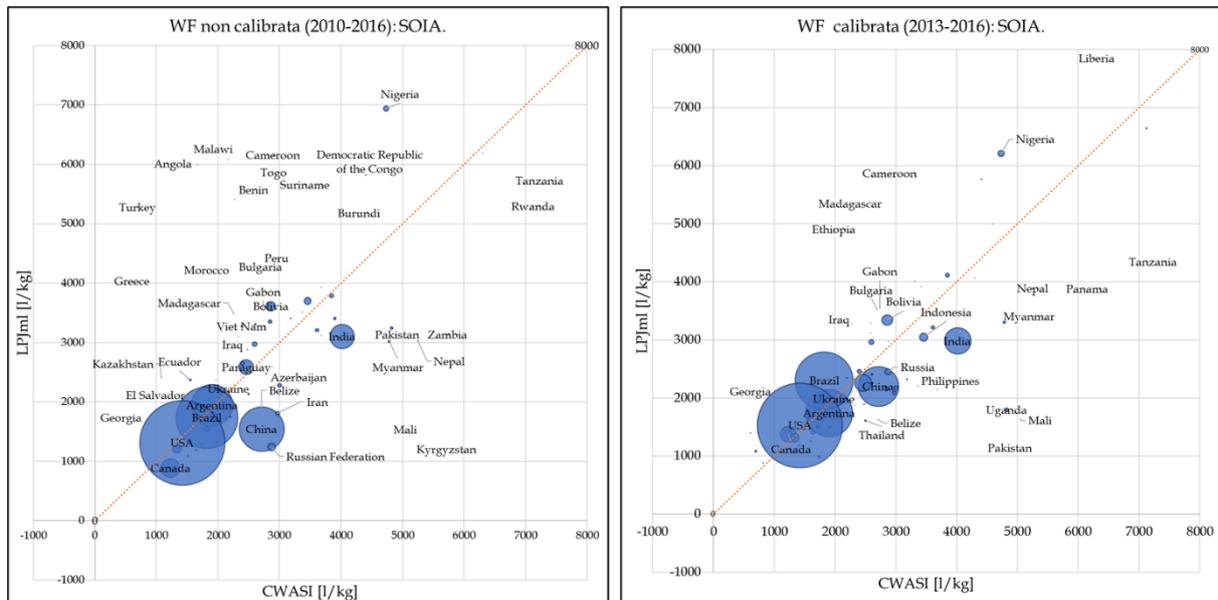


Figura 32 A sinistra lo scatter plot dei valori di impronta idrica medi nazionali, pesata sulla produzione, prima della calibrazione, a sinistra lo scatter plot dei dati calibrati. Cereale: SOIA.

Usa, Brasile, Argentina e Ucraina, tra le principali produttrici [4], mostrano un'ottima correlazione anche prima della calibrazione, come si può osservare in figura 32. Una leggera sottostima interessa invece Cina, Russia e India, mentre la Bolivia è interessata da una leggera sovrastima. La simulazione delle piccole produttrici porta spesso, ancora una volta, alla sovrastima/sottostima dell'impronta idrica anche nel caso della soia. Questo aspetto interessa nazioni come l'Angola, il Cameroon, la Nigeria, la Turchia, la Repubblica democratica del Congo ed altre, mentre l'impronta idrica di Pakistan, Kirghizistan, Myanmar, Nepal e Zambia risulta invece sottostimata.

In figura 32, sezione destra, si può osservare come alcune di queste incongruenze vengano risolte attraverso la calibrazione: la sottostima che interessa la Cina viene ridotta efficacemente ed è stato possibile correggere le incongruenze che riguardavano numerose piccole produttrici. Tuttavia la correzione dell'impronta idrica in India e Bolivia risulta inefficace. Il calcolo del coefficiente di Pearson pesato dimostra l'efficacia della procedura di calibrazione anche nel caso della soia, con una correlazione pari a 0.75 prima della calibrazione e 0.81 dopo la calibrazione, mentre il coefficiente di Pearson non pesato passa da 0.33 a 0.70.

5 RISULTATI.

Nei prossimi paragrafi verranno esposti i risultati dell'analisi svolta, partendo da un inquadramento sul presente per poi analizzare le proiezioni future di impronta idrica, a scala globale e nazionale.

Il primo paragrafo fornirà una visione d'insieme della situazione nell'anno 2019: verranno esposti i dati FAO riguardanti resa e produzione medie globali per grano, mais, riso e soia, questi dati saranno quindi confrontati con quelli derivati dal modello. I dati di resa globale media (2019) verranno quindi affiancati a valori di impronta idrica associati, così da apprezzare le differenze, in termini di consumi idrici, fra i cereali osservati.

La seconda parte dell'analisi riguarda, invece, le proiezioni future di produzione e impronta idrica media globale: in questo paragrafo sarà possibile osservare il diverso impatto dei due possibili scenari di cambiamento climatico (RCP 2.6 e 6.0), e la diversa risposta di grano, mais, riso e soia.

Infine, il terzo paragrafo, riguarda l'analisi a scala nazionale: in questa fase si analizzeranno le variazioni di impronta idrica media nazionale, per i due scenari di cambiamento climatico e secondo due intervalli di variazioni, 2020-2040 e 2020-2080. Si analizzerà l'evoluzione dell'impronta idrica per la dieci principali produttrici, per poi concentrarsi sulle aree geografiche da cui deriva la maggior parte della produzione mondiale, rispettivamente per ogni cereale.

I dati di resa, e impronta idrica, sono sempre mediati utilizzando rispettivamente le aree e la produzione come pesi. I dati di produzione rappresentano invece la produzione totale. Come detto precedentemente, i dati attribuiti ad uno specifico anno sono il risultato della media temporale in un intorno dell'anno: l'intorno considerato comprende i tre anni precedenti e i tre anni successivi all'anno indicato nel testo. Per la determinazione delle nazioni principali produttrici dei rispettivi cereali, si è fatto riferimento ai database FAO, relativi all'anno 2019.

5.1 UN'ISTANTANEA SUL PRESENTE.

Nel 2019 il cereale maggiormente prodotto risulta essere il mais, con una produzione totale globale pari a $1.5 \cdot 10^9$ tonnellate. La produzione di questo cereale proviene per il 49,2% dalle Americhe e il 32,1% dall'Asia, mentre la restante parte proviene da Europa e Africa. L'elevata produzione del mais è legata in gran parte alla sua altissima resa media, pari a 5.8 tonnellate per ettaro coltivato. Seguono riso e grano, con una resa agricola rispettivamente pari a 4.66 e 3.55 ton/ha, che rappresentano le due tipologie di cereale con produzione [ton] maggiore dopo il riso. Nonostante la coltivazione del riso risulti più efficiente, la produzione media

globale di riso e grano è molto simile e pari, rispettivamente, a $7.55 \cdot 10^8$ e $7.6 \cdot 10^8$ tonnellate. Infine la soia è il cereale con una resa agricola minore, pari a 2.7 tonnellate di cereale prodotto su ettaro coltivato, da cui deriva una produzione totale globale pari a $3.3 \cdot 10^8$ tonnellate; per i dati sopra descritti si faccia riferimento all'istogramma in figura 33.

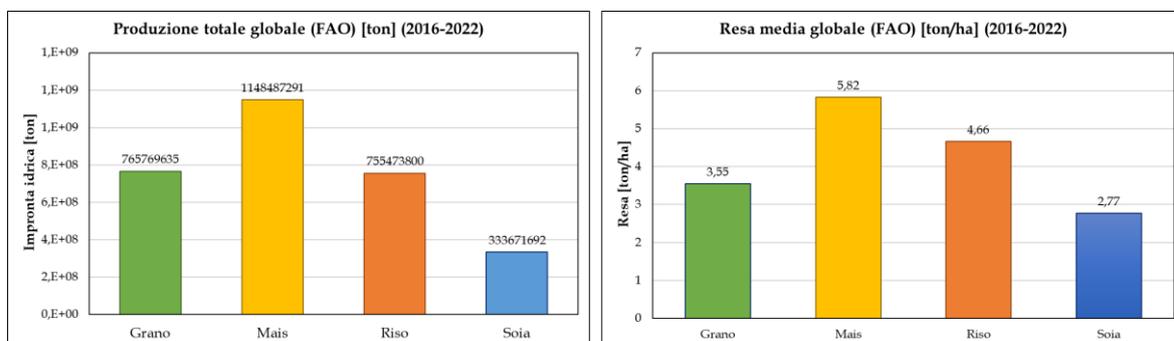


Figura 33 Dati di resa e produzione media globale relative a grano, mais, riso e soia: dati FAO riferiti all'anno 2019.

Come si può osservare in figura 34, anche secondo le simulazioni effettuate, la resa agricola superiore è associata al mais, a cui fanno seguito riso, grano ed infine la soia, con l'efficienza minore.

Fra i quattro cereali analizzati la soia presenta l'efficienza idrica minore, con un consumo medio pari a circa 1500 litri ogni chilogrammo di cereale prodotto, molto superiore a quella associata agli altri cereali pari a 1040 l/kg per il riso, 915 l/kg per il grano e 776 l/kg per il mais.

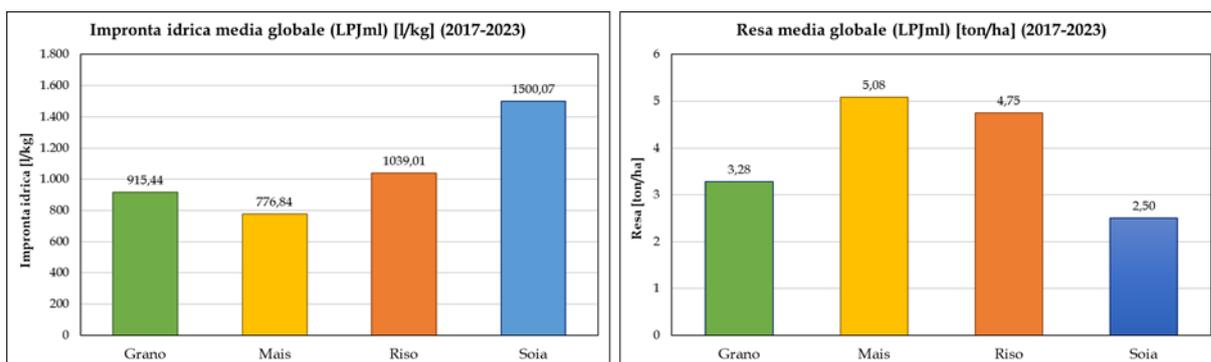


Figura 34 Dati di resa e impronta idrica media globale, relativi a grano, mais, riso e soia: dati simulati referiti all'anno 2019.

Secondo le simulazioni effettuate, nel 2019 il mais è il cereale la cui coltivazione risulta più efficace, sia in termini di produttività che in termini di consumi idrici, con resa pari a 5.08 ton/ha e una *WF* pari a 776.84 l/kg. La soia ricade invece nell'estremo opposto, con una resa agricola molto bassa, pari a 2.5 ton/ha, a cui si associano consumi idrici pari a 1500 l/kg, mentre riso e grano presentano livelli di resa, pari rispettivamente a 3.28 ton/ha e 4.75 ton/ha, con un'impronta idrica pari a 915.44 l/kg e 1039 l/kg.

Di seguito analizzeremo come il cambiamento climatico modificherà la situazione sopra descritta, secondo i due scenari di cambiamento climatico considerati. Analizzeremo l'evoluzione della produzione nelle aree considerate l'impronta idrica ad essa associata, sia a scala globale che a scala nazionale.

5.2 PROIEZIONI FUTURE.

5.2.1 Serie temporali: scala globale.

5.2.1.1 *Grano.*

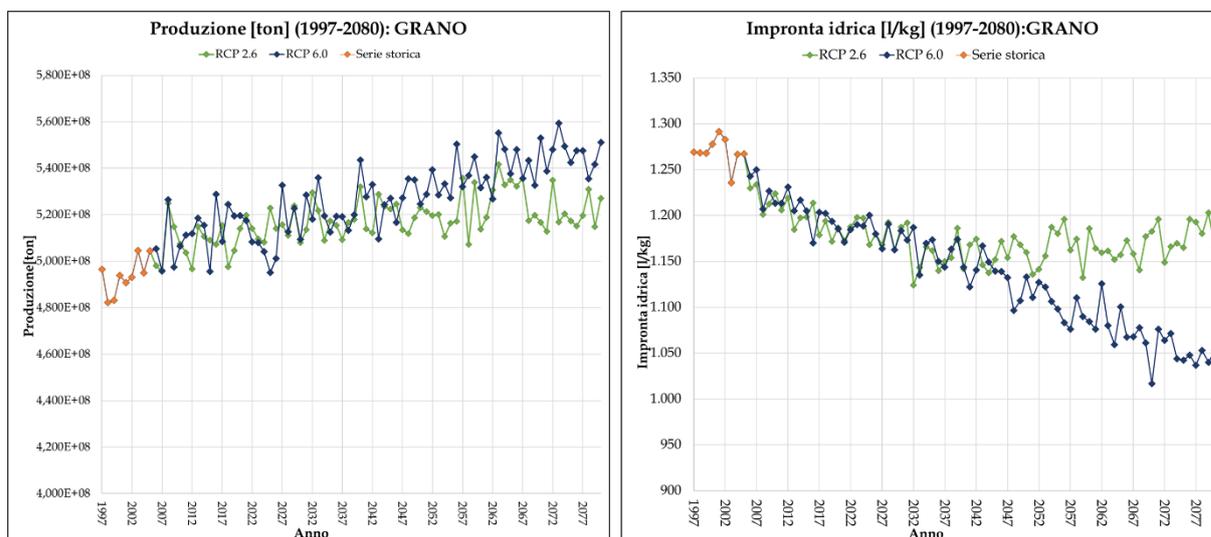


Figura 35 Serie temporale di produzione totale globale [ton], a sinistra, serie temporali di impronta idrica in [l/kg] a destra. In verde osserviamo la serie relativa allo scenario RCP 2.6, mentre in blu quella relativa allo scenario 6.0; in rosso la serie storica.

In figura 35 si osservano le serie temporali di produzione [ton] mondiale totale, e la relativa impronta idrica in [m³/ton, o l/kg] media globale. L'intervallo considerato comprende la serie storica, 1997-2005, e la serie futura, 2006-2080, per i due scenari considerati.

La produzione globale di grano, relativamente allo scenario RCP 6.0, mostra un chiaro incremento nel tempo, pari al +1.7% nell'intervallo 2020-2040, mentre tra 2020 e il 2080, anno finale della serie, la produzione totale cresce del +5.5%. L'impronta idrica associata mostra un trend decrescente, passando da 1190 l/kg di grano prodotto nel 2020, fino a 1150 l/kg nel 2040 (-3.3%), fino a raggiungere il minimo nel 2080, con 1040 l/kg (-12.5%), corrispondenti a una riduzione dei consumi idrici pari a 150 litri per ogni chilogrammo di grano prodotto, rispetto all'anno 2020.

Come è possibile osservare in figura 35, le serie temporali di produzione e impronta idrica relative ai due scenari di cambiamento climatico presentano un iniziale parallelismo, a cui fa seguito una separazione a forbice che avviene in un intorno dell'anno 2045. Questo aspetto è particolarmente evidente se si osservano, in figura 35, le serie temporali di impronta idrica: successivamente all'anno 2045 si nota infatti un'interruzione del trend decrescente osservato precedentemente,

mentre si assiste, nonostante le forti fluttuazioni inter-annuali, a una stabilizzazione dei livelli di impronta idrica.

Riferendosi allo scenario RCP 2.6, l'impronta idrica passa infatti da 1184 [l/kg] nel 2020, a 1160 [l/kg] nel 2040 (-2.0%), evidenziando un miglioramento dell'efficienza idrica meno marcato rispetto allo scenario RCP 6.0. Considerando l'intervallo di variazione 2020-2060, questo andamento si conserva, facendo registrare un calo pari a -1.8%. Infine i valori di impronta idrica si stabilizzano procedendo verso l'anno 2080 e tornando simili a quelli registrati nel 2020, pari 1186 l/kg.

5.2.1.2 Mais.

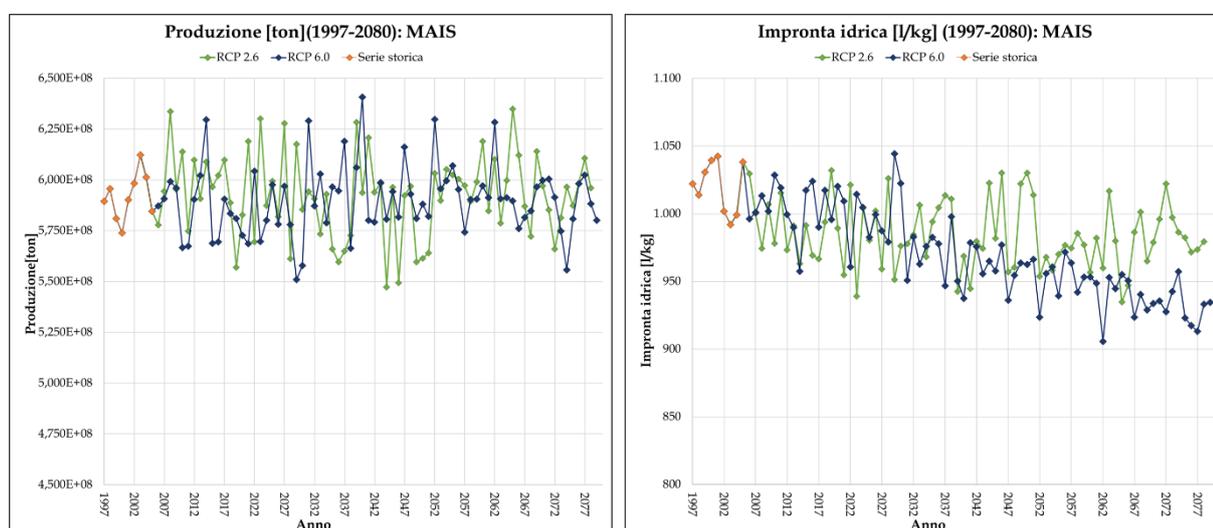


Figura 36 Serie temporale di produzione totale globale [ton], a sinistra, serie temporali di impronta idrica in [l/k] a destra. In verde osserviamo la serie relativa allo scenario RCP 2.6, mentre in blu quella relativa allo scenario 6.0; in rosso la serie storica.

Come è possibile osservare in figura 36, la serie temporale di produzione di mais presenta forti fluttuazioni inter-annuali, senza che sia possibile distinguere un trend definito o una particolare distinzione fra i due scenari. Analizzando la serie temporale di impronta idrica in figura 36, è invece possibile distinguere anche in questo caso un iniziale parallelismo delle serie temporali relative ai due scenari con successiva separazione sempre in un intorno dell'anno 2045. Nel caso del mais, tuttavia, per entrambe gli scenari si osservano variazioni inter-annuali più accentuate rispetto a quelle osservate per gli altri cereali, in particolar modo se si osservano i dati di produzione. Nello specifico, considerando lo scenario RCP 6.0, la produzione globale subisce, rispetto al 2020, un incremento pari al +2.9% nel 2040, al 2.2% nel 2060 e +0.5% nel 2080. Osservando invece i dati relativi allo scenario RCP 2.6, i valori di produzione, seppur con forti fluttuazioni inter-annuali, si conservano

pressoché costanti, con variazioni, sempre con riferimento all'anno 2020, pari a +0.4% nel 2040, +0.5% nel 2060 e +0.6% nel 2080.

L'efficienza idrica presenta invece un trend più marcato, con un calo costante nello scenario RCP 6.0: in particolare, secondo questo scenario, l'impronta idrica passa da 1001 l/kg nel 2020 a 963 l/kg nel 2040, calo corrispondente a -3.8%. Nel 2080 i valori arrivano a 927 l/kg, un calo pari a -7.41% rispetto al 2020, che equivalgono 26 litri in meno necessari per la produzione di un chilogrammo di mais.

Lo scenario RCP 2.6 presenta un andamento globalmente più costante, con valori di impronta idrica pari a 985 [l/kg] nel 2020, 976 nel 2040, 979 nel 2060 e infine 982 nel 2080, corrispondenti a variazioni minime, rispettivamente pari a -0.9%, -0.6% e 0.3%.

5.2.1.3 Riso.

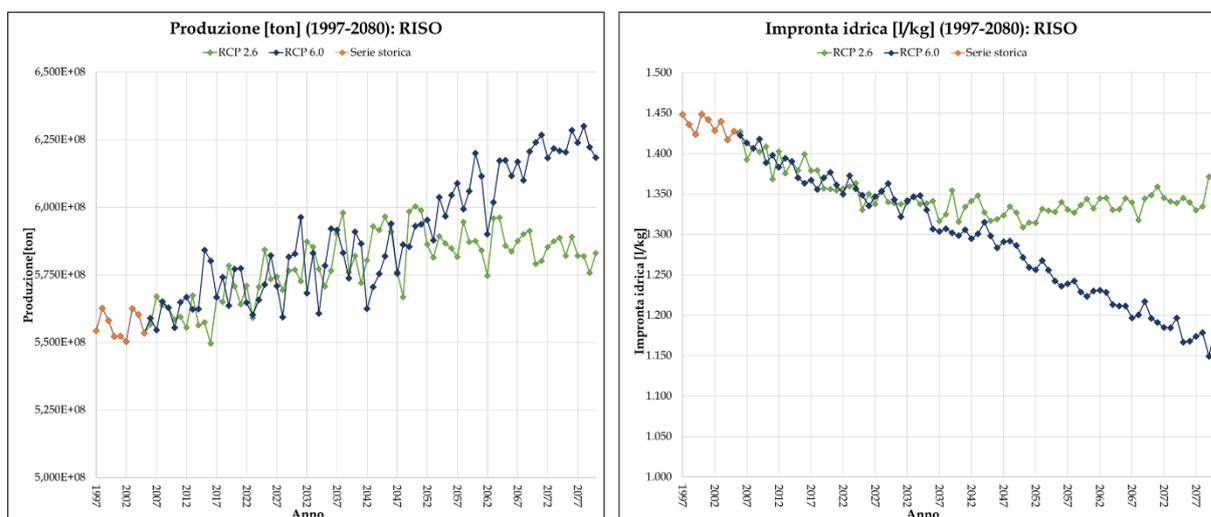


Figura 37 Serie temporale di produzione totale globale [ton], a sinistra, serie temporali di impronta idrica in [l/k] a destra. In verde osserviamo la serie relativa allo scenario RCP 2.6, mentre in blu quella relativa allo scenario 6.0; in rosso la serie storica

Analizzando le serie temporali relative al riso in figura 37, si osserva in questo caso un comportamento molto sensibile nei confronti scenario di cambiamento climatico applicato. In particolare lo scenario RCP 6.0 comporta un incremento costante della produzione, con variazioni, in riferimento all'anno 2020, pari a +1.8% nel 2040, +6.3% nel 2060 e +10% nel 2080. L'impronta idrica passa da 1364 l/kg, nel 2020, a 1160 l/kg nel 2080: tale variazione equivale a di 198 litri in meno per ogni chilogrammo di riso prodotto. In termini percentuali queste variazioni sono pari a pari a -4.6%, tra il 2020 al 2040, -9.7%, tra 2020 e 2060 e -14.5% tra 2020 e 2080.

Analizzando la serie temporale riferita allo scenario RCP 2.6 si osserva invece un iniziale incremento della produzione globale e un decremento dell'impronta idrica

unitaria, che si interrompe, evolvendo verso un plateau, a partire da un intorno dell'anno 2040. In particolare in riferimento all'anno 2020 la produzione subisce variazioni pari a +2.8% nel 2040, +3.2% nel 2060, e +2.1% nel 2080. I valori di impronta idrica subiscono un andamento simile, con un iniziale calo pari a -2.2% tra il 2020 e il 2040, -1.9% tra il 2020 e il 2060 e -0.6% tra 2020 e 2080.

La coltivazione del riso sembra quindi trarre beneficio dalle condizioni caratterizzanti lo scenario di cambiamento climatico più estremo, l'RCP 6.0, mentre si mantiene pressoché costante se si considera lo scenario RCP 2.6.

5.2.1.4 Soia.

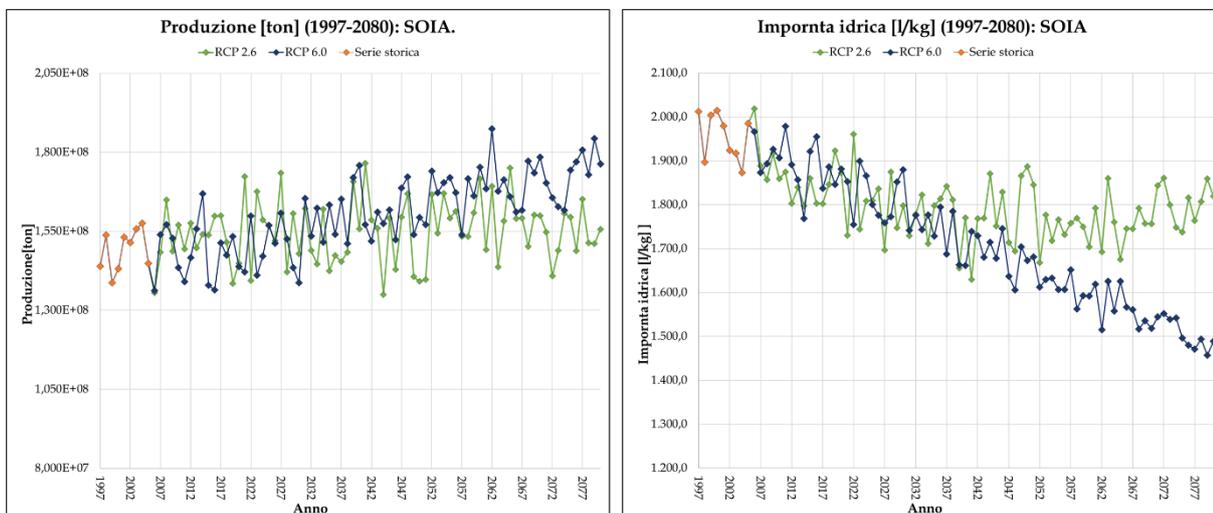


Figura 38 Serie temporale di produzione totale globale [ton], a sinistra, serie temporali di impronta idrica in [l/kg] a destra. In verde osserviamo la serie relativa allo scenario RCP 2.6, mentre in blu quella allo scenario 6.0; in rosso la serie storica

Come si può osservare in figura 38, anche nel caso della soia le proiezioni future di produzione e impronta idrica presentano una forte sensibilità nei confronti dello scenario climatico applicato. La produzione della soia, seppur mantenendo un trend distinto per i due scenari RCP, presenta inoltre delle fluttuazioni inter-annuali simili a quelle osservate per il mais.

Analizzando i dati nello specifico, considerando lo scenario RCP 6.0, la produzione presenta un andamento crescente lungo tutta la serie temporale, con variazioni pari a, +9.2 %, dal 2020 al 2040, +14.6% dal 2020 al 2060 e, infine, +18.9% rispetto al 2080. Un andamento simile si osserva per l'efficienza idrica, con variazioni di impronta idrica unitaria pari a -7.8% tra il 2020 e il 2040, -13.9% in riferimento al 2060 e -20.8% riferendosi al 2080. L'impronta idrica unitaria passa da

1851 a 1467 l/kg, equivalenti ad un risparmio di 384 litri per ogni chilogrammo di soia prodotto.

Lo scenario RCP 2.6 comporta, a partire da un intorno dell'anno 2045, l'interruzione dell'iniziale incremento della produzione, a cui fa seguito un plateau. In particolare, la produzione, subisce un incremento pari a +3.5%, tra il 2020 e il 2040, +2.5% tra il 2020 e il 2060 e +2.5% tra il 2020 e il 2080, contro +18.9% attribuito allo scenario RCP 6.0. L'impronta idrica segue un andamento simile, registrando una variazione pari a -4.9% tra il 2020 e il 2040, -4.3% riferendosi al 2060, e -2.8% rispetto al 2080.

5.3 VARIAZIONI PERCENTUALI A SCALA NAZIONALE.

5.3.1 GRANO

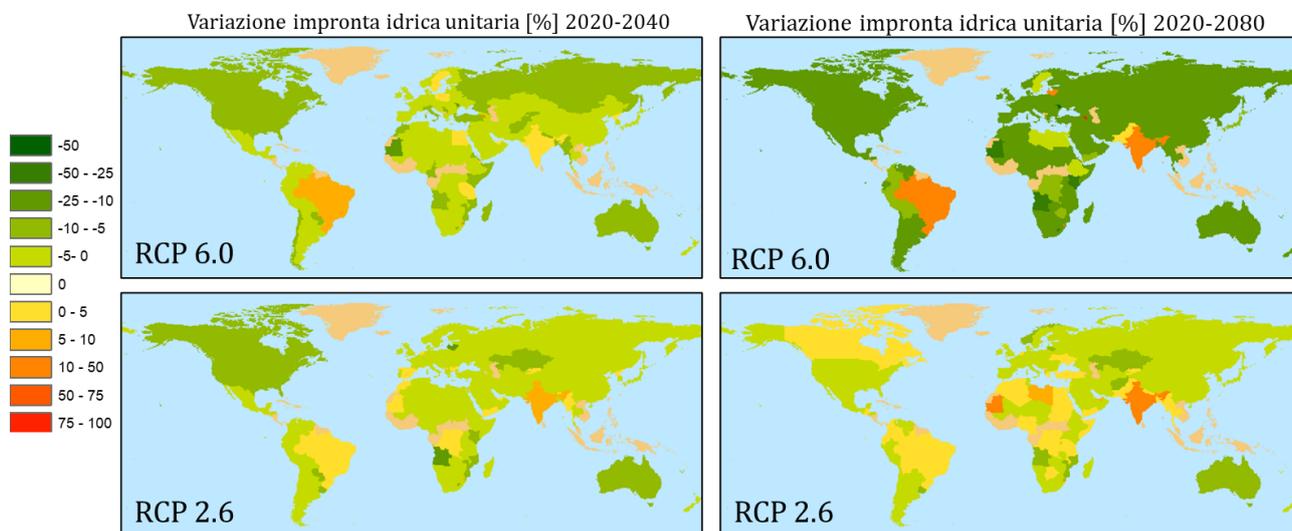


Figura 39 Mappe di variazione [%] di impronta idrica media nazionale: cereale GRANO. La variazione percentuale viene calcolata sempre in riferimento all'anno 2020.

Osservando le mappe di variazione percentuale di impronta idrica in figura 39, appare evidente come lo scenario RCP 6.0 porti, nel 2080 ad un decremento della *WF* esteso quasi tutte le nazioni. In particolare la Cina, principale produttrice attuale [19], subisce un decremento pari a -12.9% tra 2020 al 2080, mentre nello stesso periodo USA e Russia, rispettivamente terzi e quarti per produzione nel 2019 [19], fanno registrare una variazione di *WF* pari a -17.2% e -17.9% rispettivamente. L'India, seconda produttrice nel 2019 mostra invece un trend opposto: per questa nazione si osserva, dal 2020 al 2040, un incremento pari a +3.2%, mentre dal 2020 al 2080 si riscontra un incremento pari a +16%, con valori di *WF* pari 1398 l/kg, nel 2020, e 1621 l/kg nel 2080, equivalenti ad un incremento pari a 223 litri per ogni chilogrammo di grano prodotto. In figura 39, scenario RCP 6.0, osserviamo come anche il Brasile venga interessato da un peggioramento dell'efficienza idrica, facendo registrare una variazione pari a +8.6%, tra il 2020 e il 2040, e +19% tra il 2020 e il 2080, con un'impronta idrica pari a 2605.9 l/kg nel 2020, a 3109 l/kg nel 2080, equivalenti ad un incremento di 307 litri per un chilogrammo di grano.

L'incremento di impronta idrica che interessa India e Brasile può essere attribuito alla parametrizzazione prevista per il grano, secondo la quale il grano viene considerato un "temperate cereal" e la sua coltivazione in climi tropicali viene sfavorita. Brasile e India, attualmente interessate da clima tropicale, potrebbero andare incontro, in conseguenza del cambiamento climatico associato allo scenario

RCP 6.0, ad un inasprimento ad un ulteriore inasprimento delle condizioni climatiche; ne consegue che l'impatto negativo delle condizioni climatiche sul grano, in queste regioni, potrebbe quindi essere superiore all'effetto fertilizzante dell'anidride carbonica facendo quindi registrare un incremento dell'impronta idrica.

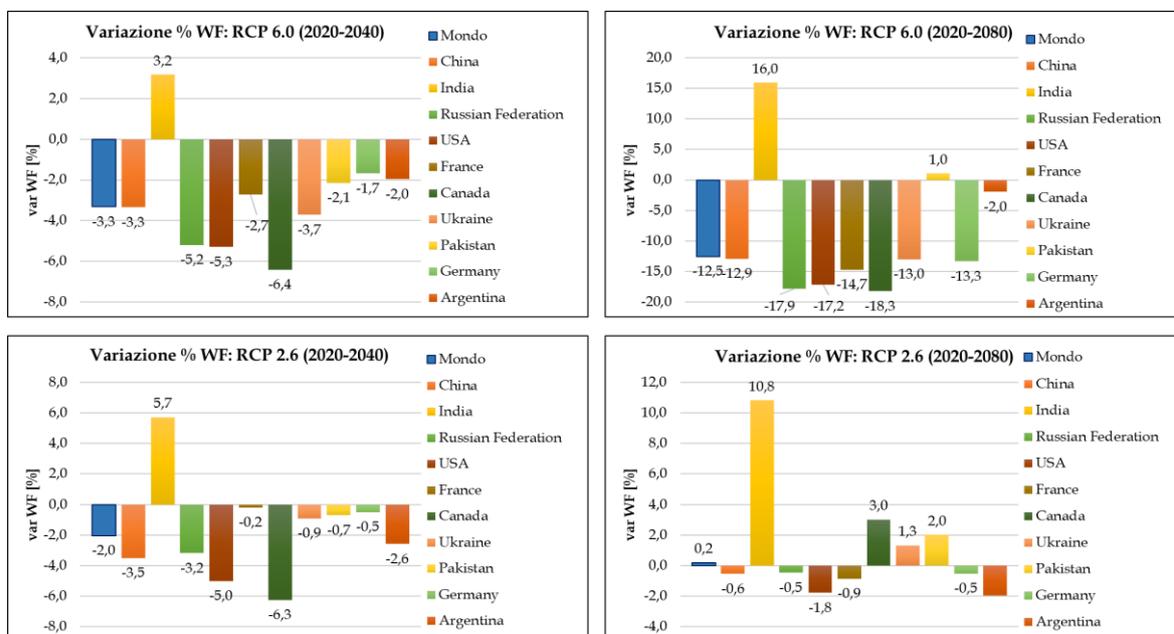


Figura 40 Istogramma riassuntivo di variazione % di impronta idrica per la dieci principali produttrici di grano nel 2019, secondo i database FAO: in alto lo scenario RCP 6.0, in basso lo scenario RCP 2.6. Gli intervalli di variazione sono 2020-2040 (parte sinistra) e 2020-2080 (parte destra).

Analizzando le proiezioni di impronta idrica relative al grano, scenario RCP 2.6, si può notare come, nonostante si verifichi un calo dei valori di WF nella maggioranza delle nazioni coltivatrici del cereale, questo fenomeno sia meno pronunciato rispetto a quanto osservato per lo scenario RCP 6.0. Nello specifico tra il 2020 e il 2040, rispettivamente per Cina, USA e Russia osserviamo variazioni pari a -3.5%, -5.0% e -3.2%, mentre tra il 2020 e il 2080, la WF sembra stabilizzarsi, assumendo spesso valori simili a quelli iniziali, con variazioni pari a -0.6% per la Cina, -1.8% per gli USA e -0.5% per la Russia. Anche secondo lo scenario RCP 2.6, in India, si verifica un incremento di WF, la quale passa da 1379 l/kg nel 2020 a 1529 l/kg nel 2080, equivalenti a +150 l/kg. Un fenomeno simile si osserva anche in Brasile, dove si registra un incremento pari a +4.9% tra il 2020 e il 2080, dove l'impronta idrica passa da 2375 l/kg a 2491 l/kg, nel corso di questo intervallo. L'evoluzione dei valori di impronta idrica, per queste nazioni, conserva quindi la stessa direzione osservata nello scenario RCP 6.0, comportando, tuttavia, variazioni percentuali più lievi. In figura 40 è possibile osservare l'istogramma riassuntivo di

variazione percentuale di impronta idrica, relativo alle dieci principali produttrici mondiali.

Il continente maggiore produttore di grano è l'Asia, da cui proviene il 44.1% della produzione mondiale [19]. Le principali produttrici di questa regione sono Cina, India e Pakistan, a queste seguono Turchia, Iran, Kazakistan, Uzbekistan, Afghanistan e Iraq: l'impronta idrica di queste ultime subisce, secondo lo scenario RCP 2.6 e tra il 2020 e il 2080, una variazione pari a rispettivamente a +2.5% (+29.6 l/kg) in Turchia, -2.2% (-48 l/kg) in Iran, -5.0% (-72 l/kg) in Kazakistan, -4.5% (-39.5 l/kg) in Uzbekistan, -5.8% (-138 l/kg) in Afghanistan e -3.8% (-195.15 l/kg) in Iraq.

Le produttrici minori dell'Asia, sono interessate da un calo di impronta idrica diffuso, come si può osservare nel grafico in figura 41. Alcune di queste nazioni sono tuttavia interessate da un incremento di impronta idrica, tra queste alcune subiscono una variazione significativa in termini di consumi idrici: in Nepal si registra un incremento percentuale pari a +1.4% (+31 l/kg), +4.5% (+53 l/kg) in Bangladesh, +4.5% (+100 l/kg) in Myanmar, +4.6% (+88 l/kg) in Palestina e +7.0% (+180. l/kg) in Bhutan.

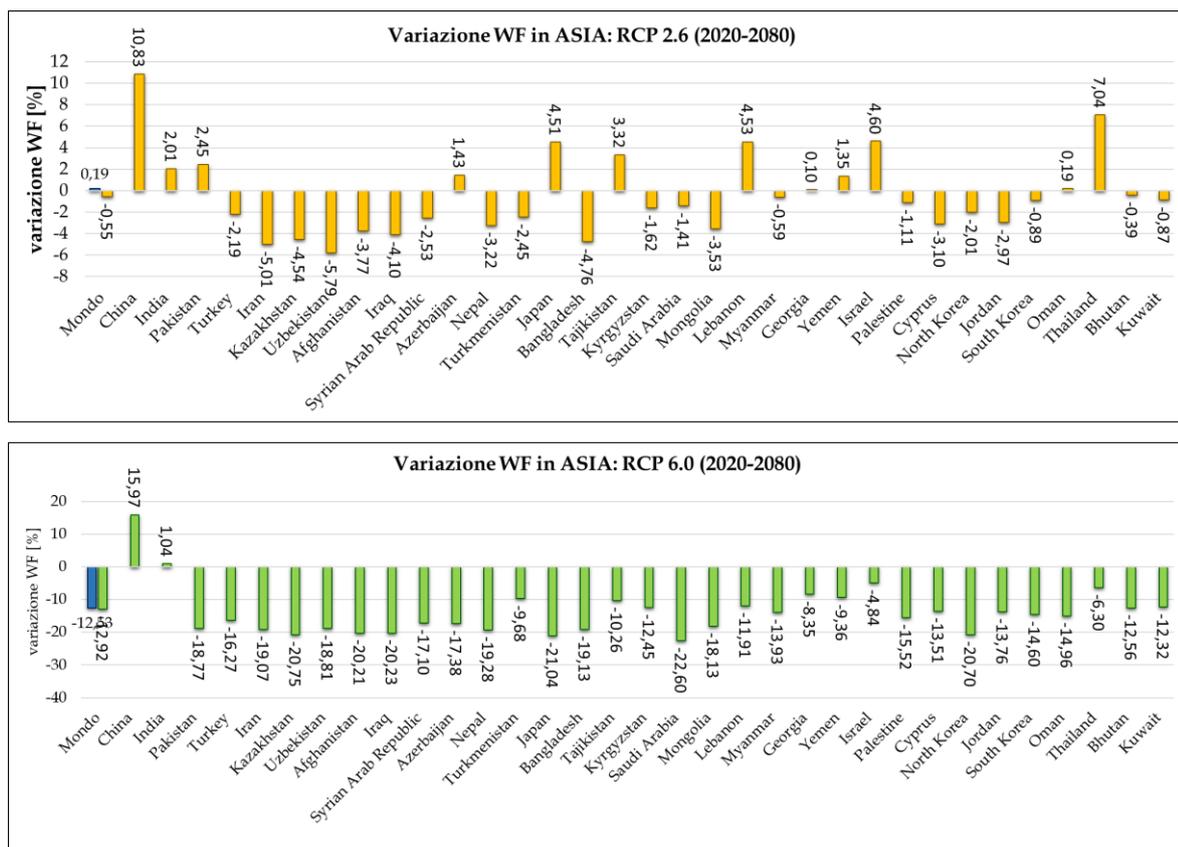


Figura 41 Variazione percentuale di WF in Asia. Intervallo di variazione 2020-2080: in alto è rappresentato lo scenario RCP 2.6, in basso lo scenario RCP 6.0. Da sinistra a destra le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione.

Come evidenziato in figura 41, lo scenario RCP 6.0 conduce ad un quadro molto diverso nel 2080, con un incremento dell'efficienza idrica che interessa tutte le nazioni del continente, con l'esclusione dell'India e del Pakistan, interessati da un incremento di impronta idrica. Sotto le condizioni dello scenario RCP 6.0, le produttrici secondarie, quali Turchia, Iran, Kazakistan, Uzbekistan e Afghanistan, sono interessate da un calo di impronta superiore rispetto a quanto osservato per lo scenario RCP 2.6, pari rispettivamente a -18.8% (-237 l/kg), -16.3% (-357 l/kg), -19% (-267 l/kg), -20.8% (-181 l/kg), -18.8% (-446 l/kg), -20.2% (-1037 l/kg).

L'Europa è il secondo continente per produzione di grano: le principali produttrici europee sono Russia, Francia, Ucraina, Germania, UK, Polonia e Romania. Secondo lo scenario RCP 2.6, tutte queste nazioni sono interessate ad un iniziale decremento della WF, esteso a tutte le nazioni, tra il 2020 e il 2040. In alcuni casi, come in Russia, Francia, Germania, Regno Unito e Romania, l'iniziale riduzione della WF, prosegue per tutta la serie temporale, raggiungendo il minimo nel 2060, per poi subire un leggero incremento, portando nel 2080 a variazioni superiori a quelle registrate tra il 2020 e il 2040, pari rispettivamente a -0.5% (-4.7 l/kg), -0.9% (-5.6 l/kg), -0.5% (-3.4 l/kg), -1.8 (-7.9 l/kg), -1.4 (-24 l/kg).

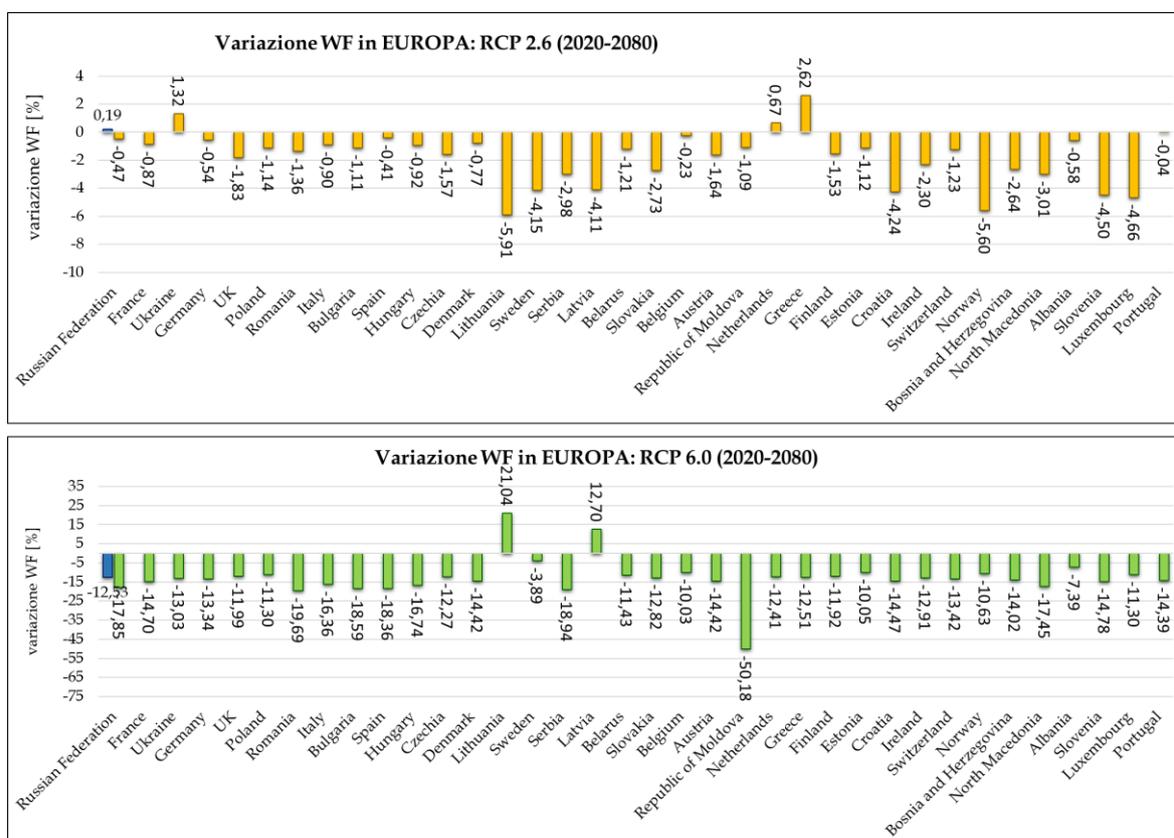


Figura 42 Variazione percentuale di WF in Europa. Intervallo di variazione 2020-2080: in alto è rappresentato lo scenario RCP 2.6, in basso lo scenario RCP 6.0. Da sinistra a destra le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione.

Questo fenomeno può essere associato alla progressiva riduzione delle emissioni di anidride carbonica associata allo scenario RCP 2.6 e quindi dell'effetto fertilizzante sulle colture. A partire da un intorno del 2050, il calo delle concentrazioni sembra ridurre l'effetto fertilizzante della CO₂, portando nel 2080 a valori di impronta idrica leggermente superiori a quelli registrati nel 2040.

Se si osserva l'andamento della WF per queste nazioni, riassunto in figura 42, analizzando lo scenario RCP 6.0 si riscontra un decremento costante dal 2020 al 2080: l'impronta idrica di Russia, Francia, Ucraina, Germania, Regno Unito, Polonia e Romania, subisce variazioni, tra il 2020 e il 2080, rispettivamente pari a -17.9% (-179 l/kg), -14.7% (-94 l/kg), -13.0% (-131 l/kg), -13.3% (-83 l/kg), -12.0% (-51 l/kg), -11.3% (-119 l/kg) e -19.7% (-356.5 l/kg). Come si può osservare in figura 40, anche le produttrici minori sono interessate da una riduzione della WF, con variazioni percentuali simili a quelle evidenziate per le principali produttrici della regione. Fa eccezione la Lituania, dove l'impronta idrica subisce un incremento pari a +21% (+177.4 l/kg): nella fase di validazione è emersa un'erronea attribuzione delle aree coltivate senza irrigazione, per le quali il modello simulava una resa pari a zero. L'anomalia associata alla sola Lituania potrebbe quindi essere attribuita all'incongruenza individuata.

5.3.2 MAIS.

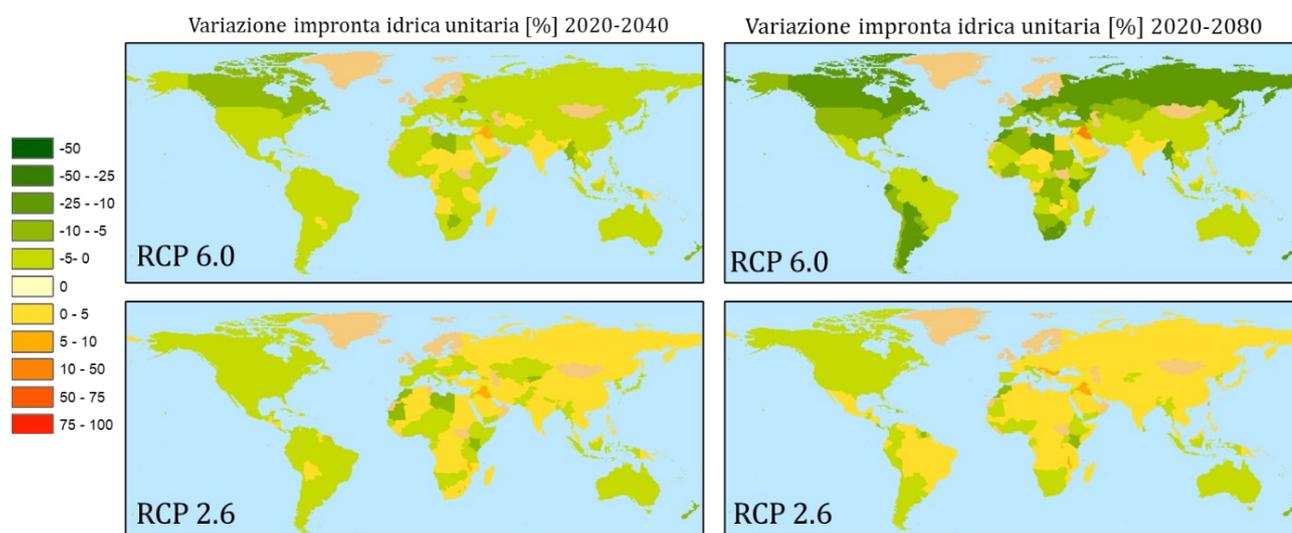


Figura 43 Mappe di variazione [%] di impronta idrica media nazionale: cereale MAIS. La variazione percentuale viene calcolata sempre in riferimento all'anno 2020.

Osservando le mappe di variazione di impronta idrica media nazionale in figura 43, analizzando lo scenario RCP 6.0, si può notare come, sebbene si verifichi un miglioramento diffuso dell'efficienza idrica nel tempo, numerose nazioni dell'emisfero sud sono interessate da un incremento di impronta idrica tra il 2020 e il 2080. Applicando lo scenario RCP 2.6 emerge come il peggioramento dell'efficienza idrica si manifesti diffusamente già a tra il 2020 e il 2040, per poi accentuarsi andando ad interessare la quasi totalità delle nazioni produttrici di mais tra il 2020 e il 2080. L'incremento di WF che caratterizza questo scenario, coinvolge anche numerose nazioni fra le dieci prime produttrici mondiali, come Cina, Ucraina, India, Messico, e Russia, che tra il 2020 e il 2080 subiscono un incremento di WF rispettivamente pari a +3.0%, +1.8%, +1.6%, +1.0% e +0.8%.

Queste variazioni sono moderate ma si traducono in incrementi nei consumi idrici importanti: tra il 2020 e il 2080, si prevede un incremento pari a 24 l/kg in Cina, 19 l/kg in Ucraina, 36.8 l/kg in India e 23.7 l/kg in Messico. Usa, Argentina e Indonesia sono invece interessate da un calo di impronta idrica, rispettivamente pari a -1.7% (-10.0 l/kg), -4.3% (-41.9 l/kg) e -0.8% (-13.3 l/kg).

Analizzando lo scenario RCP 6.0 emerge anche in questo caso una situazione opposta rispetto a quanto osservato nello scenario RCP 2.6: il decremento di impronta idrica, evidente anche tra il 2020 e il 2040, si concretizza nel 2080 interessando la quasi totalità delle dieci produttrici mondiali, i cui dati sono riportati nell'istogramma in figura 44. Nello specifico nell'intervallo 2020-2080,

USA, Cina, Brasile, Argentina, Ucraina, Indonesia, Messico, e Romania fanno registrare, rispettivamente, una variazione di WF pasì a -8.3%, -3.5%, -2.73%, -17.7%, -9%, -3.1%, -4.7% e -16.6%.

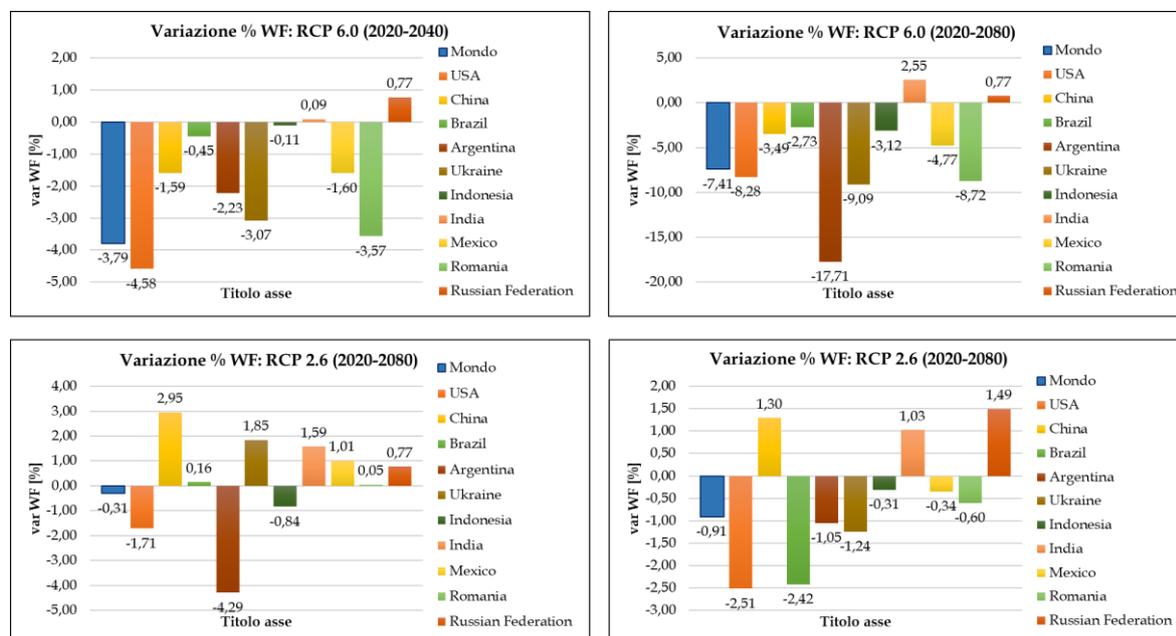


Figura 44 Istogramma riassuntivo di variazione % di impronta idrica per la dieci principali produttrici di mais del 2019, secondo i database FAO: in alto lo scenario RCP 6.0, in basso lo scenario RCP 2.6. Gli intervalli di variazione sono 2020-2040 (parte sinistra della figura) e 2020-2080 (parte destra della figura).

Queste variazioni equivalgono a un calo dei consumi idrici notevole: per ogni chilogrammo di mais prodotto si stima un risparmio pari, rispettivamente, -50 l/kg negli USA, -28 l/kg in Cina, -46 l/kg in Brasile, -176 l/kg in India, -91 l/kg in Ucraina, -501 l/kg in Indonesia, -112 l/kg in Messico, -80 l/kg in Romania e -186 l/kg in Russia.

L'Asia è responsabile del 32.1% della produzione globale di mais [19]. Le variazioni di WF riguardanti lo scenario RCP 2.6, osservate precedentemente per le dieci principali produttrici, si manifestano anche in questa regione; si faccia riferimento all'istogramma in figura 45 per i dati di variazione percentuale specifici di ogni nazione. L'impronta idrica subisce infatti un incremento per la quasi totalità delle nazioni che compongono il continente, in alcuni casi anche significativo: ne è un esempio l'Iraq, dove si registra una variazione di WF pari a +7.3% tra il 2020 e il 2080, che si traduce in un incremento di +195 litri per ogni chilogrammo di mais prodotto. Le nazioni principali produttrici della regione sono Cina, India ed Indonesia, analizzate precedentemente, a cui seguono Filippine, Pakistan, Turchia, Vietnam e Bangladesh. Queste ultime subiscono rispettivamente una variazione percentuale pari a +1.8%, +0.7%, +4.9%, +1.4%, +0.4% e -2.1%. Queste nazioni, con

l'esclusione della Turchia, sono interessate da clima tropicale, che può comportare alti valori di impronta idrica: questo fa sì che piccole variazioni si traducano in importanti modificazioni dei consumi idrici necessari per le coltivazioni.

L'impronta idrica delle Filippine passa da 2568 l/kg a 2615 l/kg nel tra il 2020 e il 2080, con un incremento di 47 l/kg. Considerando lo stesso intervallo di variazione, in Vietnam, una variazione di soli +1.4% porta ad un incremento di 20 litri per la produzione di un solo chilogrammo di mais. In Bangladesh invece, una variazione pari -2,1% porta la WF da 2876 l/kg a 2815 l/kg, equivalenti 61litri in meno per produrre un chilogrammo di mais.

Lo scenario RCP 6.0 comporta un quadro differente in Asia: la regione viene interessata diffusamente da un calo dell'impronta idrica, che in alcuni casi si traduce in variazioni significative: nello specifico si osserva una variazione pari a -16.7% in Myanmar (-146 l/kg), -9.5% in Kirghizistan (-89 l/kg) e -17.8% in Georgia (-255 l/kg). Emergono due casi dove la WF subisce un drastico incremento: in Iraq l'impronta idrica passa da 2586 l/kg a 3650 l/kg tra il 2020 e il 2080, un incremento del 41.1%, mentre in Kuwait si registra una variazione pari al 39.6%, equivalenti a un incremento di 155 litri per ogni chilogrammo di mais prodotto.

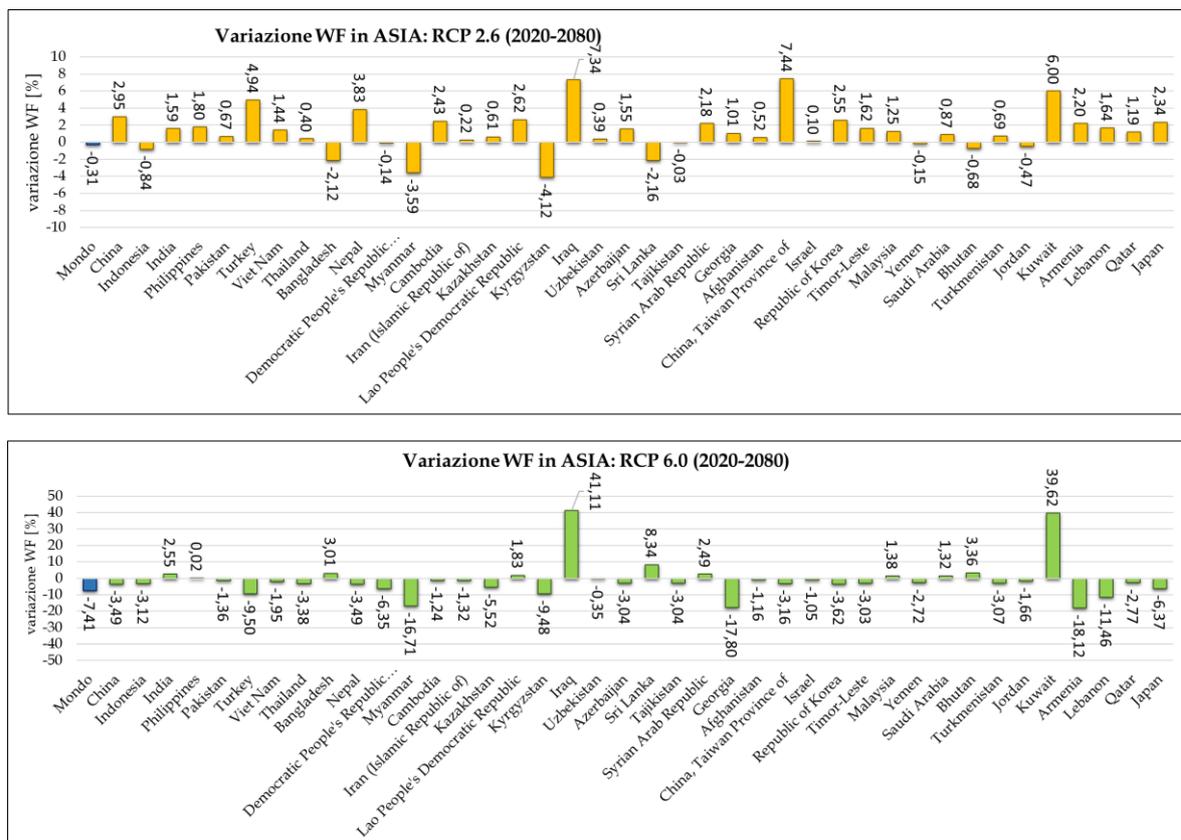


Figura 45 Istogramma riassuntivo di variazione di impronta idrica in ASIA. Da sinistra a destra, numerate da 1 a 39, le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione.

Nello scenario RCP 6.0, l'impronta idrica delle Filippine ritorna, nel 2080, a valori simili a quelli iniziali con una variazione pari a +0.02% rispetto al 2020. Pakistan, Turchia, Vietnam e Thailandia subiscono invece un calo di WF, con variazioni pari rispettivamente a -1.4% (-27 l/kg), -9.5% (-77 l/kg), -2% (27 l/kg) e -3.4% (-37 l/kg) in Thailandia. La WF del Bangladesh, la quale subiva una variazione pari a -2.1% relativamente allo scenario RCP 2.6, viene ora interessata da un incremento pari a +3% con un incremento di 85 l/kg.

Dalle Americhe (Nord, Centro e Sud) proviene il 49,2% della produzione mondiale di mais, mentre Europa e Africa contribuiscono a colmare la restante parte, producendo rispettivamente restante l'11,6% e il 7% [19]. Nelle Americhe si evidenzia un impatto più mite da parte del cambiamento climatico, che spesso comporta un miglioramento dell'efficienza idrica anche nello scenario RCP 2.6, come è possibile riscontrare osservando l'istogramma in figura 46.

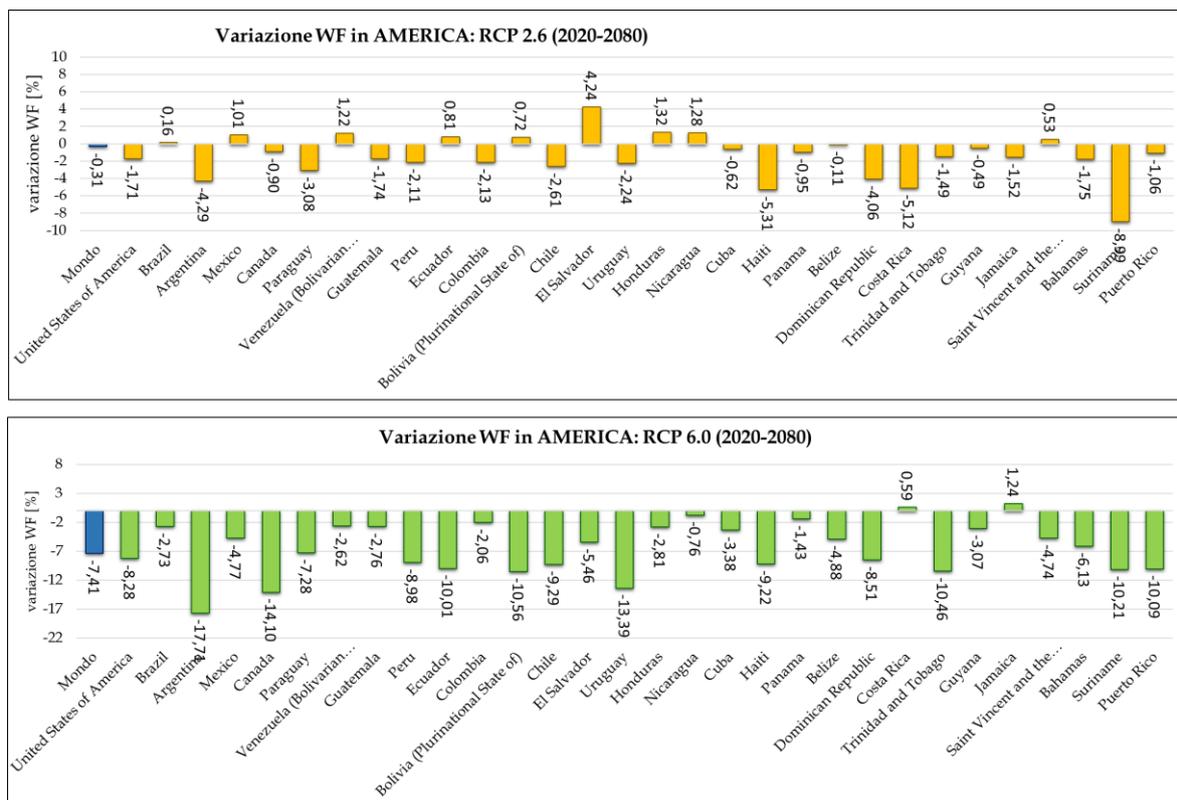


Figura 46 Variazione percentuale di WF nel continente americano. Intervallo di variazione 2020-2080, sinistra è rappresentata lo scenario RCP 2.6, a destra lo scenario RCP 6.0. Da sinistra a destra le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione

Le principali produttrici del continente americano sono gli USA, analizzati precedentemente, a cui fanno seguito il Brasile, l'Argentina, il Messico, il Canada e il Paraguay. Secondo lo scenario RCP 2.6, l'impronta idrica di queste nazioni subisce

una variazione pari a +0.2%, -4.3%, +1.0%, -0.9 e -3.1% rispettivamente. In Argentina questo incremento si traduce in un risparmio di -41 l/kg, mentre in Paraguay, essendo l'impronta idrica molto elevata (2325 l/kg nel 2020, 2253 l/kg nel 2080), si registra un calo pari a -71,5 l/kg. Altre nazioni, piccole produttrici di mais per le quali si osserva un drastico calo della WF anche nello scenario RCP 2.6, sono Guatemala, Colombia, Uruguay, Haiti, Repubblica Dominicana, Costa Rica, Suriname e Puerto Rico. Queste nazioni, interessate da un clima tropicale e accumulate da una WF molto alta, fanno registrare rispettivamente variazioni di -1.7% (-45 l/kg), -2.1% (-58 l/kg), -2.2% (-40 l/kg), -5.3% (-199 l/kg), -4.1% (-98 l/kg), -5.1% (-109 l/kg), -9% (-170.9) e infine, in Puerto Rico, -1% (-56 l/kg), tra il 2020 e il 2080. Sempre riferendosi a questo intervallo di variazione, Venezuela, Ecuador, Bolivia, Honduras e Nicaragua sono invece interessate da incrementi di impronta idrica, pari rispettivamente a +1.2% (+21 l/kg), +0.8% (+21 l/kg), +0.7% (+20 l/kg) e +1.3% (+35 l/kg). Come si può notare, piccole variazioni percentuali, in aree geografiche dove il clima, o bassi valori di resa, inducono alti valori di impronta idrica, si traducono in importanti modificazioni dei consumi di acqua necessari per la coltivazione.

Lo scenario RCP 6.0 nelle Americhe comporta un importante miglioramento dell'efficienza idrica tra il 2020 e il 2080: tutte le nazioni coltivatrici di mais nel continente americano subiscono infatti un decremento di WF, con la sola eccezione di Costa Rica e Jamaica, dove si registra rispettivamente una variazione pari a +0.6% e +1.2% (+65 l/kg).

Analizzando le principali produttrici di questa regione, tralasciando gli USA analizzati precedentemente, osserviamo una variazione pari al -2.7% (-47l/kg) in Brasile, -17.7% (-176 l/kg) in Argentina, -4.8% (-112 l/kg) in Messico, -14.1% (-76 l/kg) in Canada e -7.3% in Paraguay, dove, questa variazione apparentemente piccola porta l'impronta idrica da 2366 l/kg nel 2020 a 2194 l/kg nel 2080, con una riduzione di 172 litri necessari per produrre un chilogrammo di mais. Le piccole produttrici di mais analizzate precedentemente, tra cui Ecuador, Uruguay, Haiti, Repubblica Dominicana, Suriname e Puerto Rico, nello scenario RCP 6.0 vengono interessate da una riduzione di impronta idrica ancora più pronunciata, pari rispettivamente a -10.0% (-268 l/kg), -13.4% (-252 l/kg), -9.2% (-330 l/kg), -8.5% (-195 l/kg), -10.2% (-189 l/kg) and -10.9% (-542 l/kg),

5.3.3 RISO

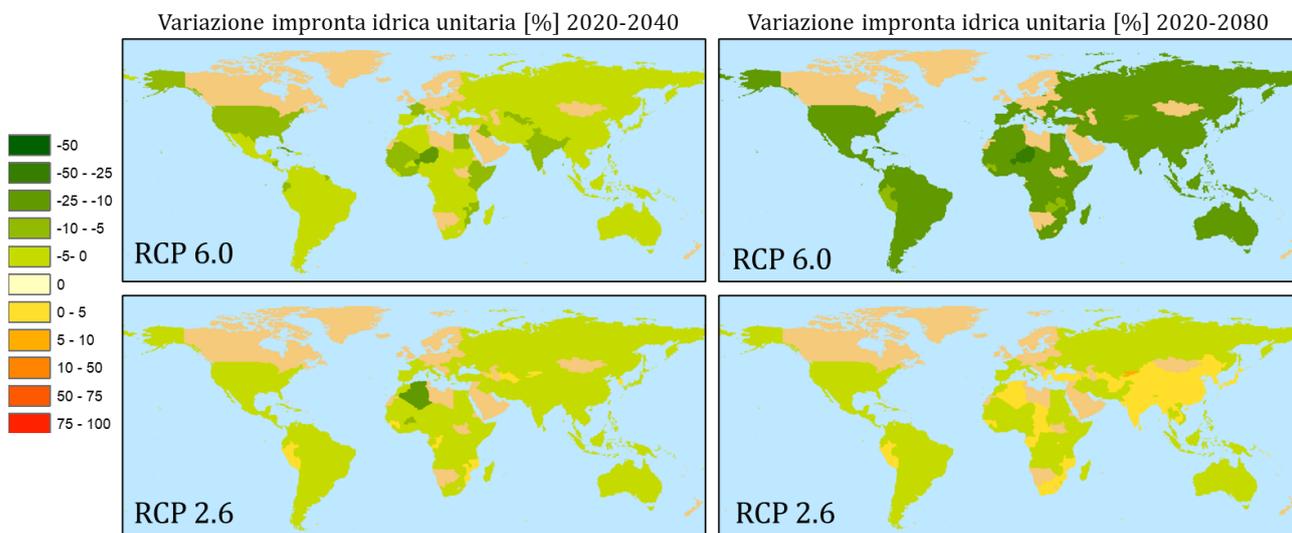


Figura 47 Mappe di variazione [%] di impronta idrica media nazionale: cereale Il RISO. La variazione percentuale viene calcolata sempre in riferimento all'anno 2020.

Analizzando la figura 47, si osserva come lo scenario RCP 6.0 determini un decremento dell'impronta idrica globale nei confronti del riso, lieve nella maggior parte delle nazioni nell'intervallo 2020-2040, che si concretizza nel 2080 con variazioni percentuali rispetto al 2020 ancora più elevate.

La variazione di WF tra 2020 e 2040 porta un miglioramento dell'efficienza idrica ampiamente diffuso anche per lo scenario RCP 2.6: secondo questo scenario, le variazioni tra 2020 e 2080, palesano un peggioramento dell'efficienza idrica in quasi tutta l'Asia e in alcune nazioni di africa e sud America. Emerge quindi, anche nei confronti del riso, una sensibilità al cambiamento climatico molto forte, con un evidente differenziazione fra i due scenari considerati.

Analizzando per primo lo scenario RCP 2.6, si riscontra, tra il 2020 e il 2040, un iniziale riduzione della WF per le principali produttrici, con l'esclusione del Bangladesh per il quale la variazione è nulla. Cina, India, Indonesia, Vietnam, Thailandia, Myanmar, Filippine, Pakistan e Cambogia sono interessate da variazioni che vanno da un massimo di -3.0% per l'Indonesia a un minimo di -1.0% per la Cambogia. Calcolando la variazione percentuale tra il 2020 e il 2080, si delinea invece un quadro differente, con un incremento di impronta idrica esteso a molte nazioni: Cina, India, Bangladesh, Myanmar e Cambogia, che facevano inizialmente registrare un decremento di WF, mostrano, tra il 2020 e il 2080, una variazione di impronta idrica pari rispettivamente a +0.96% (7 l/kg), +0.94% (+16 l/kg), +2.7% (+47 l/kg), +0.5% (+10 l/kg) e +0.7% (+20l/kg). La WF associata alle restanti nazioni, quali Indonesia, Vietnam, Thailandia, Filippine e Pakistan, subisce

variazioni percentuali moderate, comprese tra -1.0% e -0.2%. Per la Thailandi(-0.4%) e le Filippine (-0.4%), le due nazioni con maggiore WF fra quelle sopra discusse, queste variazioni si traduce in un decremento pari a -9.5 l/kg e -11.8 l/kg rispettivamente.

Passando all'analisi dello scenario RCP 6.0, concentrandosi sulle dieci principali produttrici, nell'istogramma in figura 48 è possibile osservare, come anche nel primo intervallo di variazione, 2020-2040, si assista un decremento di WF diffuso a tutte le nazioni considerate. Questo trend, come evidente in figura dall'istogramma riassuntivo in figura 46, si mantiene nel tempo, portando nel 2080 a variazioni percentuali ancora più elevate, confermando quanto evidenziato precedentemente nelle serie temporali a scala globale.

In Cina si registra una variazione di WF pari a -12.8% (-95 l/kg), -16.4% (-278 l/kg) in India, -15.2 (-248 l/kg) in Indonesia, -12.3% (-221 l/kg) in Bangladesh, -14.7% (-191 l/kg) in Vietnam, -12.0% (-293 l/kg) in Myanmar, -14.5% (-406 l/kg) nelle Filippine, -16.9% (-362 l/kg) in Pakistan e -12.2% (-374%) in Cambogia. Queste variazioni portano a importanti riduzioni nei consumi idrici per tutte le nazioni, ed in particolar modo per le nazioni con minore produzione di riso, quali Filippine, Pakistan e Cambogia, a cui si associa una resa minore e quindi una minore efficienza idrica.

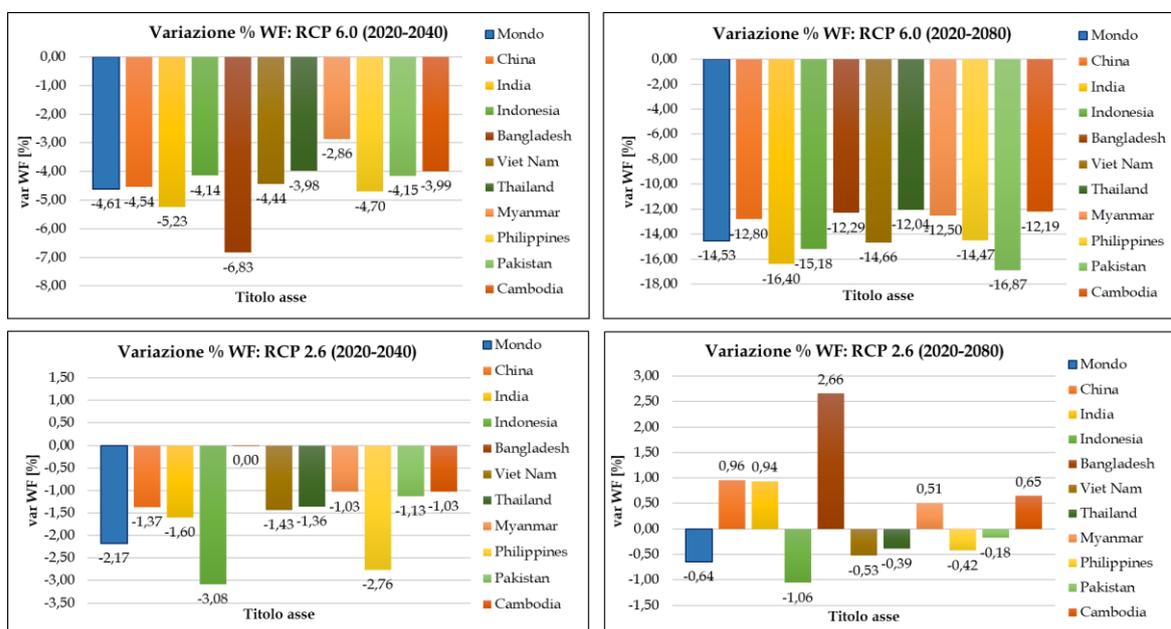


Figura 48 Iistogramma riassuntivo di variazione % di impronta idrica per la dieci principali produttrici di mais del 2019, secondo i database FAO: in alto lo scenario RCP 6.0, in basso lo scenario RCP 2.6. Gli intervalli di variazione sono 2020-2040 (parte sinistra della figura) e 2020-2080 (parte destra della figura).

La produzione di riso avviene quasi completamente in Asia, da cui proviene circa l'89,6% della produzione totale; a questo continente appartengono le dieci produttrici mondiali sopra analizzate. Di seguito analizzeremo le variazioni di impronta idrica per le altre nazioni che compongono questo continente, così da delineare un quadro completo dell'impatto climatico sulla coltivazione del riso nell'area geografica responsabile della quasi totalità della produzione mondiale di questo cereale. I due grafici raffigurati in figura 50, rappresentano la variazione di impronta idrica per tutte le nazioni del continente asiatico coltivatrici di riso per i due scenari considerati.

La situazione evidenziata per le dieci principali produttrici, si presenta analoga anche per le altre nazioni del continente, dove lo scenario RCP 2.6 comporta un peggioramento diffuso, e spesso pronunciato, dell'efficienza idrica, mentre, le condizioni climatiche rappresentate dallo scenario RCP 6.0 comportano un calo WF diffuso all'intero continente, come riassunto nell'istogramma in figura 49.

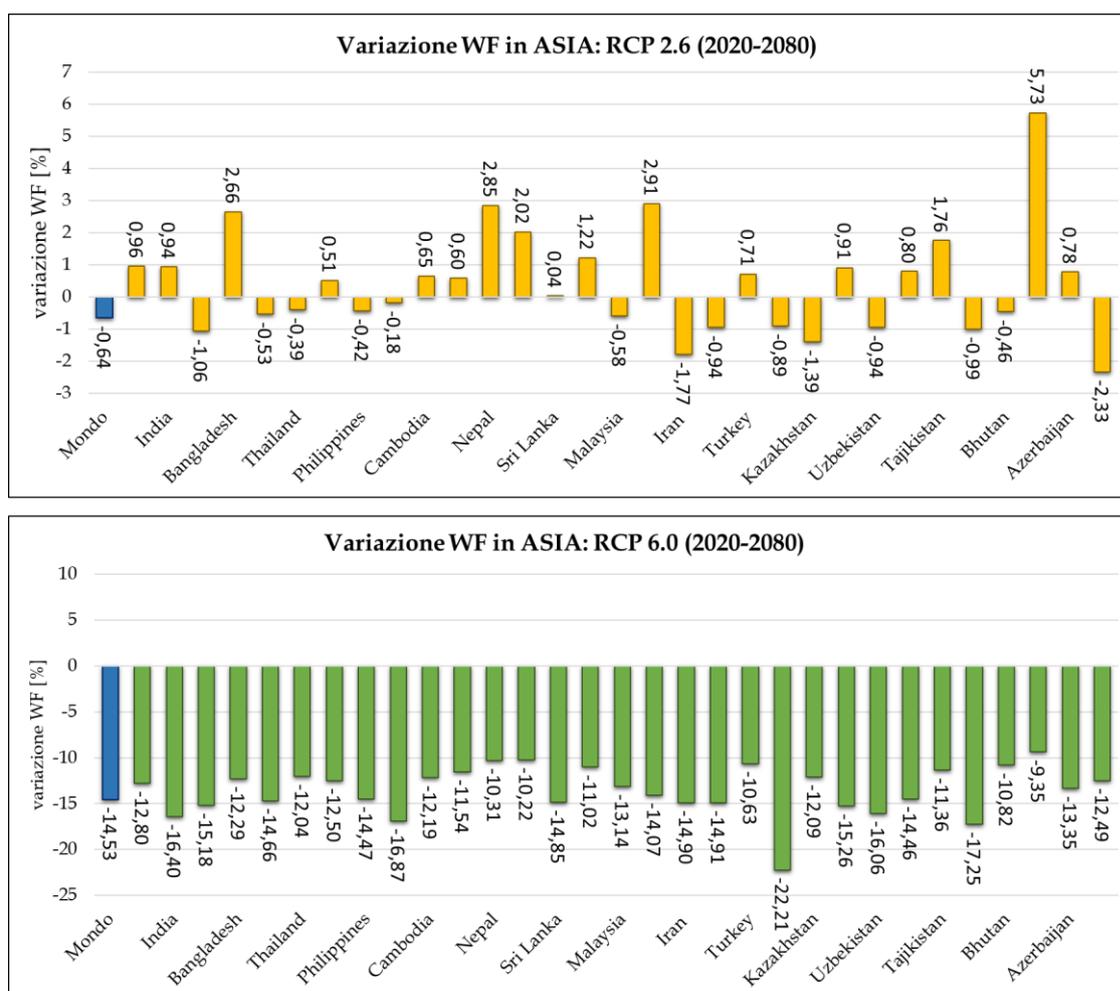


Figura 49 Variazione percentuale di WF nel continente asiatico. Intervallo di variazione 2020-2080, in alto è rappresentato lo scenario RCP 2.6, in basso lo scenario RCP 6.0. Da sinistra a destra le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione.

Considerando lo scenario RCP 2.6 Ancora una volta si osservano variazioni moderate che si traducono in importanti variazioni dei consumi idrici: nello specifico si evidenzia un incremento di impronta idrica pari a +2.9% (+62 l/kg) in Nepal, +1.2% (+26 l/kg) nel Laos, +2.9% (+43 l/kg) nel Nord Korea, +0.9% (+19 l/kg) in Afghanistan, +0.8% (+30 l/kg) in Turkmenistan, +1.8% (+30 l/kg) in Tajikistan, +5.7% (+108l/kg) in Kirghizistan e +0.8 (+10 l/kg) in Azerbaijan.

Lo scenario RCP 6.0, tra il 2020 e il 2080, fa invece registrare un calo drastico di impronta idrica in Nepal, Laos, Malesia, Nord Korea, Iran, Taiwan, Kazakistan, Afghanistan e Uzbekistan, con variazioni comprese tra un minimo -10% e un massimo -16%, che si traducono in cali di impronta idrica compresi fra -194 l/kg e un massimo di -377 l/kg. In Iraq, Afghanistan, Uzbekistan Turkmenistan e Butuan si registrano variazioni comprese tra -14.4% e un massimo, di -22% in Iraq. In queste nazioni la riduzione di impronta idrica raggiunge valori che vanno da un minimo di -329l/kg a un massimo di -866 l/kg.

La restante produzione di riso proviene per il 5.1% dall’Africa e per il 4.7% dalle Americhe, mentre l’Europa provvede al restante 0.5%; analizzeremo di seguito l’impatto del cambiamento climatico sull’impronta idrica nel continente africano.

In Africa, come si può osservare in figura 50, l’impatto del cambiamento climatico associato ai due scenari RCP, conduce a risultati simili a quelli osservati in Asia: lo scenario RCP 2.6 fa registrare una riduzione moderata dell’impronta idrica nella maggior parte delle nazioni, a cui si affiancano alcuni casi in cui si assiste a incrementi lievi, mentre lo scenario RCP 6.0 comporta un miglioramento dell’efficienza idrica esteso all’intero continente. L’impronta idrica delle nazioni africane, tuttavia, risulta essere fra le più elevate a causa delle condizioni climatiche che interessano la regione e della bassa resa di numerose nazioni, di conseguenza anche le variazioni moderate relative allo scenario RCP 2.6 esposte in figura 50, acquistano rilevanza.

Le principali produttrici dell’Africa sono Nigeria, Egitto, Madagascar, Tanzania, Mali, Guinea, Costa d’Avorio, Repubblica democratici del Congo e Senegal. Riferendosi allo scenario RCP 2.6, queste nazioni, con l’esclusione delle Guinea, sono tutte interessate da un calo di impronta idrica che si manifesta anche nel primo intervallo di variazione (2020-2040), come è possibile constatare osservando le mappe di variazione percentuale in figura 47. Successivamente nel 2080 si registrano variazioni percentuali più moderate, a indicare un rallentamento del trend decrescente, in accordo con quanto osservato a scala globale nei capitoli precedenti. Nello specifico le variazioni di impronta idrica sono pari a -1.0% (-39 l/kg) in Nigeria, -0.8% (-8 l/kg) in Egitto, -0.3% (12 l/kg) in Madagascar, -0.2% (-5 l/kg) in Tanzania, -3.5% (-103 l/kg) in Mali, +0.4 (+18.0 l/kg) in Guinea, -1.1 (-44 l/kg) in Costa d’Avorio, -2.0% (-126 l/kg) in Repubblica democratica del Congo

e -1.3% (-33 l/kg) in Senegal. Analizzando l’impatto del cambiamento climatico previsto dallo scenario RCP 6.0, per le stesse nazioni si osservano invece importanti riduzioni della WF: Nigeria, Egitto, Madagascar, Tanzania, Mali, Guinea, Costa d’Avorio, Repubblica democratici del Congo e Senegal, subiscono variazioni rispettivamente pari a -14.6% (-553 l/kg), -15.3% (-152 l/kg), -11.8% (-480 l/kg), -14.0 % (-410 l/kg), -21.5% (-646 l/kg), -9.5% (-414 l/kg), -13.8% (-562 l/kg), -13.5% (-867 l/kg) e -18.3% (-463 l/kg).

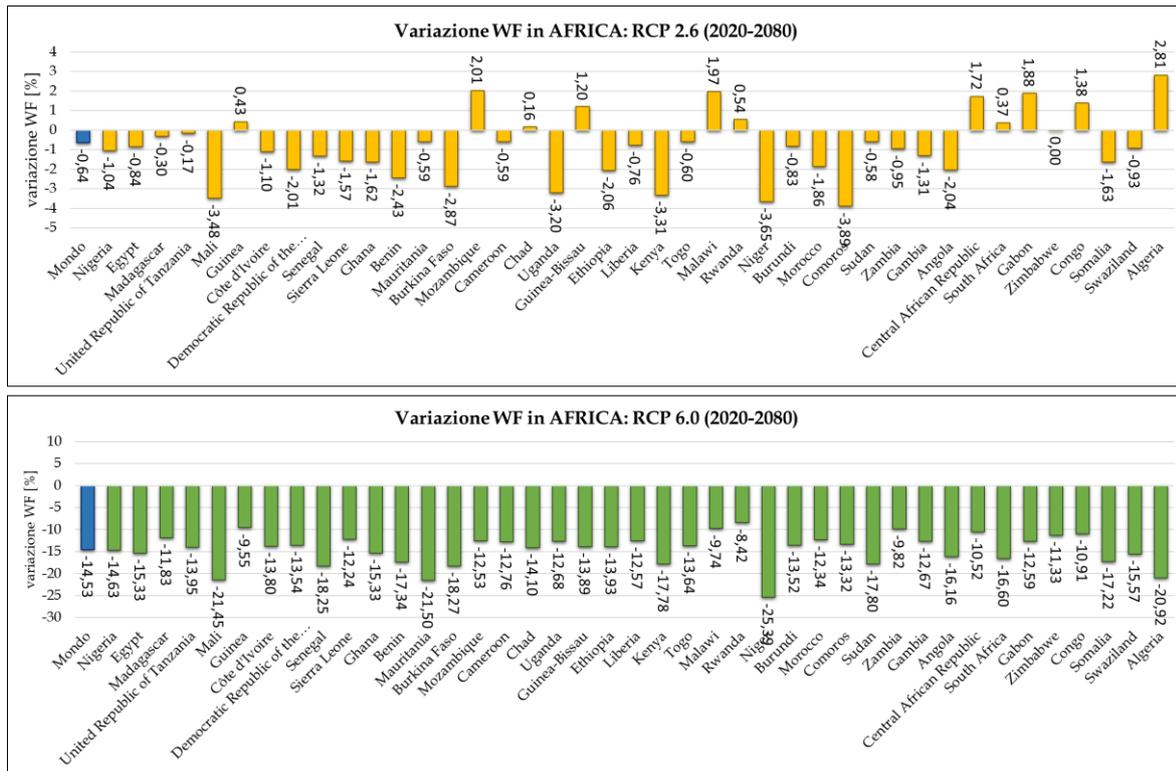


Figura 50 Variazione percentuale di WF nel continente americano. Intervallo di variazione 2020-2080, sinistra è rappresentato lo scenario RCP 2.6, a destra lo scenario RCP 6.0. Da sinistra a destra le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione.

5.3.4 SOIA.

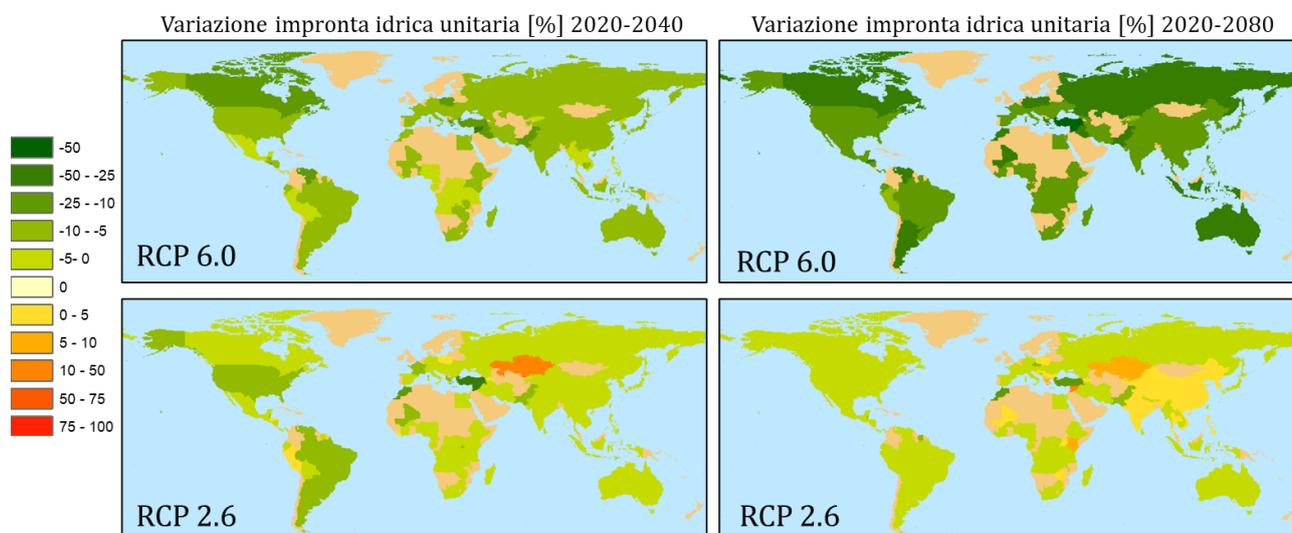


Figura 51 Mappe di variazione [%] di impronta idrica media nazionale: cereale Il SOIA. La variazione percentuale viene calcolata sempre in riferimento all'anno 2020.

La variazione di WF connessa alla soia, subisce un'evoluzione nel tempo simile a quella osservata per il riso: come evidenziato in figura 51, lo scenario rcp 6.0 fa registrare un decremento percentuale in entrambe gli intervalli di variazione, 2020-2040 e 2020-2080, mentre lo scenario RCP 2.6 comporta dei decrementi minori di impronta idrica a cui spesso si affiancano degli incrementi di WF, evidenti nel secondo intervallo di variazione.

Le prima dieci produttrici mondiali di soia sono Brasile, USA, Argentina, Cina, India, Paraguay, Canada, Russia, Ucraina e Bolivia; i dati di variazione percentuale sono riassunti nell'istogramma in figura 52. L'impronta idrica di queste nazioni, riferendosi allo scenario RCP 2.6, fa registrare un iniziale calo, nell'intervallo di variazione 2020-2040, con variazioni comprese tra un minimo di -1.3% in Cina ed un massimo di -6.22% in Paraguay, come si può osservare in figura 52. Successivamente questo trend si interrompe e nel secondo intervallo di variazione osserviamo delle riduzioni di WF minori, a segnalare un'evoluzione della WF verso valori simili a quelli dell'anno 2020, come già osservato a scala globale. Il decremento di WF tra il 2020 e il 2080, è pari a -2.4% (-55 l/kg) in Brasile, -4.5% (-67 l/kg) negli USA, -3.3% (-55 l/kg) in Argentina, -3.2% (-73 l/kg) in Paraguay, -2.4% (-32 l/kg) in Canada, -0.7 (-15 l/kg) in Russia, -1.1% (-22 l/kg) in Ucraina e infine, -0.8% (-25 l/kg) in Bolivia. Cina e India, rispettivamente quarta e quinta nazione per produzione, sono interessate da un incremento di impronta idrica tra il 2020 e 2080, rispettivamente pari a +1.5% (+32 l/kg) e +1.2 (+35 l/kg).

Le dieci nazioni produttrici, Brasile, USA, Argentina, Cina, India, Paraguay, Canada, Russia, Ucraina e Bolivia, riferendosi allo scenario RCP 6.0, sono interessate da variazioni consistenti, comprese tra -13.7% e un massimo di -27.8%. Nello specifico, queste nazioni sono interessate da variazioni pari, rispettivamente, -17.5% (-393 l/kg) in Brasile, -21.7% (-322 l/kg) negli USA, -26.8% (-452 l/kg) in Argentina, -17.5% (-378 l/kg) in Cina, -13.8% (-420 l/kg) in India, -20.2% (-449 l/kg) in Paraguay, -26.5% (-367 l/kg) in Canada, -27.8% (-642 l/kg) in Russia, -21.5% (-424.37 l/kg) in Ucraina e -17.3% (-540.6 l/kg) in Bolivia. Come si può osservare si registrano forti variazioni di impronta idrica anche per le dieci principali produttrici, che si traducono in importanti modificazioni dei consumi idrici, riferendosi allo scenario RCP 6.0.

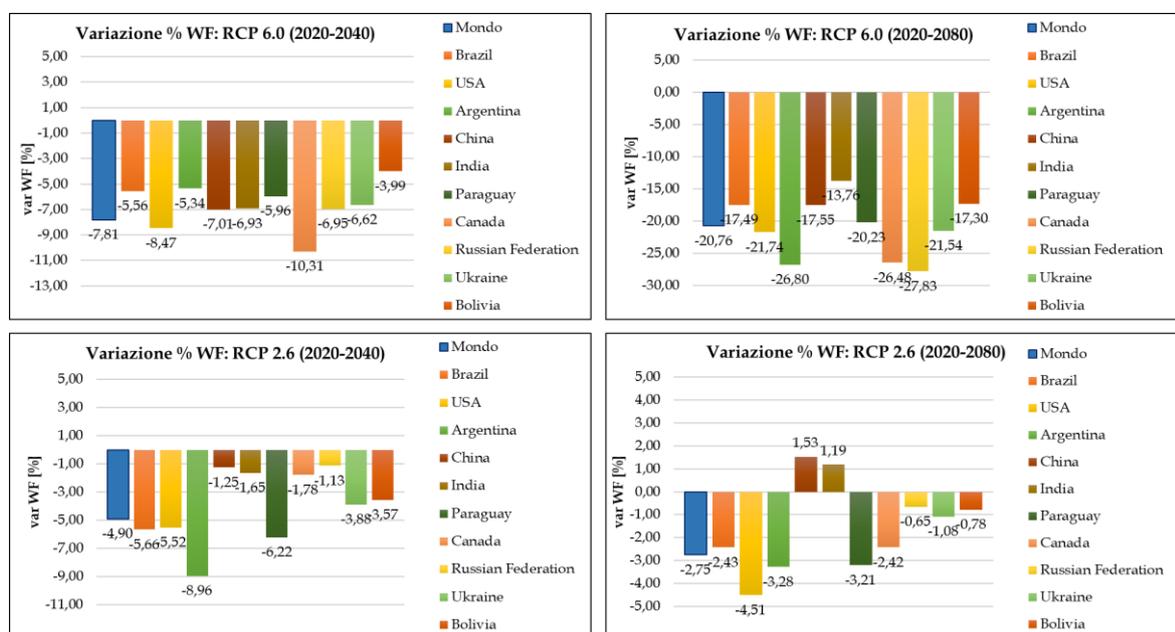


Figura 52 Istogramma riassuntivo di variazione % di impronta idrica per la dieci principali produttrici di soia del 2019, secondo i database FAO: in alto lo scenario RCP 6.0, in basso lo scenario RCP 2.6. Gli intervalli di variazione sono 2020-2040 (parte sinistra)

L'86.1% della produzione totale di soia proviene dal continente americano. Le principali produttrici di questa regione sono Brasile, USA, Argentina, Paraguay, Canada e Bolivia, analizzate sopra, a cui fanno seguito, secondo i database FAO, Uruguay, Messico, Colombia Ecuador e Guatemala, il modello LPJml tuttavia non simula la coltivazione di soia in Colombia. Analizzando quindi la variazione di impronta idrica per Uruguay, Messico, Ecuador e Guatemala, secondo lo scenario RCP 2.6, si riscontra un iniziale variazione, nell'intervallo di variazione 2020-2040, compresa tra -2.9% e un massimo di -7.8%. Anche per queste nazioni l'iniziale trend decrescente subisce un rallentamento in un intorno del 2040, portando il range di

variazione, tra il 2020 e il 2080, a un minimo di -1.4% e un massimo di -3.7%. Nello specifico, in Uruguay si registra una variazione del -3.7% (-86 l/kg), -2.0 % (-80. l/kg) in Messico, -1.8% (-29.3 l/kg) in Ecuador e -1.4% (-16.60 l/kg) in Guatemala.

Lo scenario RCP 6.0 comporta, per queste nazioni, un decremento di impronta idrica più pronunciato, sia nel primo che nel secondo intervallo di variazione. Tra il 2020 e il 2080, l'impronta idrica dell'Uruguay subisce un calo pari a -21.4% (-500 l/kg), -17.3% (-703 l/kg) in Messico, -20.5% (-328 l/kg) in Ecuador e -20.4% (-244 l/kg) in Guatemala. Variazioni di entità simile, sia in termini percentuali che di consumi idrici, si osservano per tutte le restanti nazioni dell'America.

L'efficienza idrica della soia nel continente America, subisce dei miglioramenti in conseguenza del cambiamento climatico sia per lo scenario RCP 2.6 che per il 6.0. Questo scenario porta dal 2020 al 2080 un calo costante dell'impronta idrica sia per le prime dieci produttrici che per tutte le nazioni del continente americano dove il cereale viene coltivata. In figura 53 è possibile sono riassunti, tramite istogramma, i dati relativi alle nazioni del continente americano.

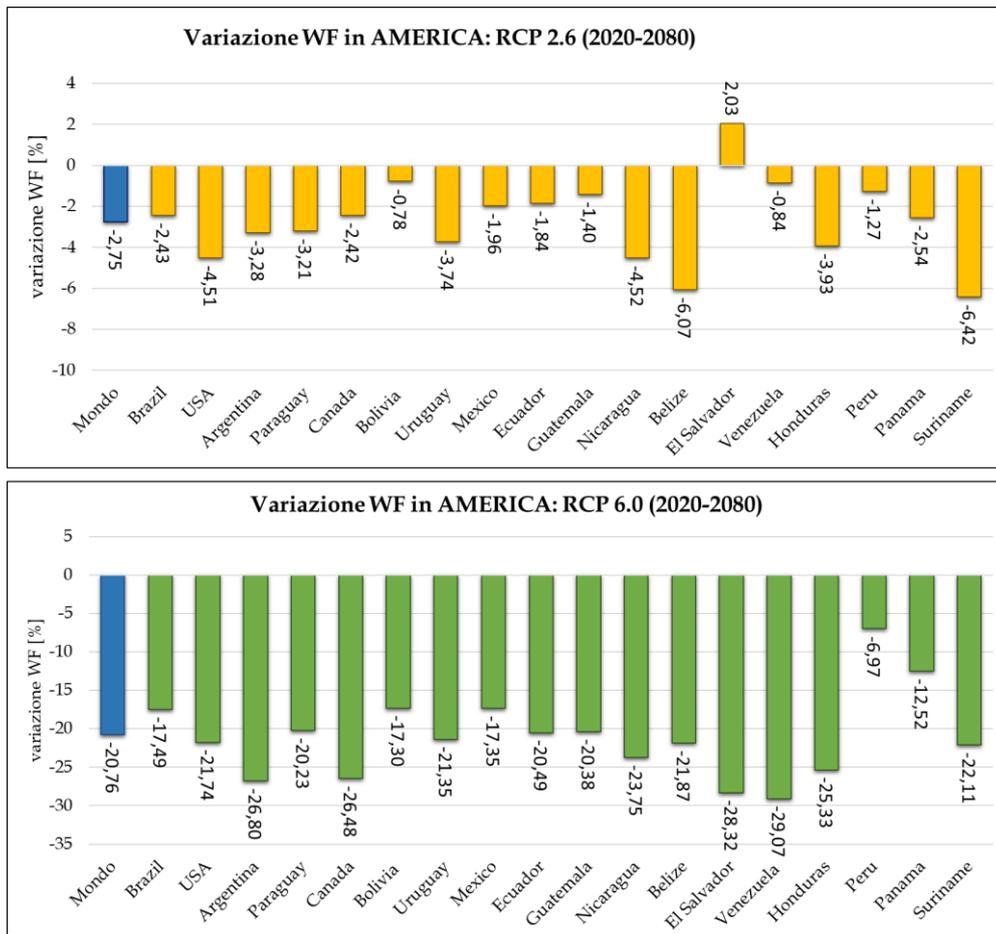


Figura 53 Variazione percentuale di WF nel continente americano. Intervallo di variazione 2020-2080, in alto è rappresentato lo scenario RCP 2.6, in basso lo scenario RCP 6.0. Da sinistra a destra le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione.

La seconda area geografica per produzione di soia è rappresentata dall'Asia, da cui proviene il 9.5% della produzione mondiale di soia. Cina e India sono le principali produttrici, a cui fanno seguito Indonesia, Kazakistan, Nord Korea, Giappone, Cambogia, Iran e Turchia: lo scenario RCP 2.6, fa registrare variazioni pari a -1.8% (-52 l/kg) in Indonesia, -2.9% (-60 l/kg) in Giappone, -1.2% (-30 l/kg) in Cambogia, -0.5% (-10 l/kg) in Iran e -13.8% (144 l/kg) in Turchia. Kazakistan e Nord corea subiscono, invece, un incremento di WF, pari rispettivamente a +6.7% (+68 l/kg) e +0.9 (+26 l/kg).

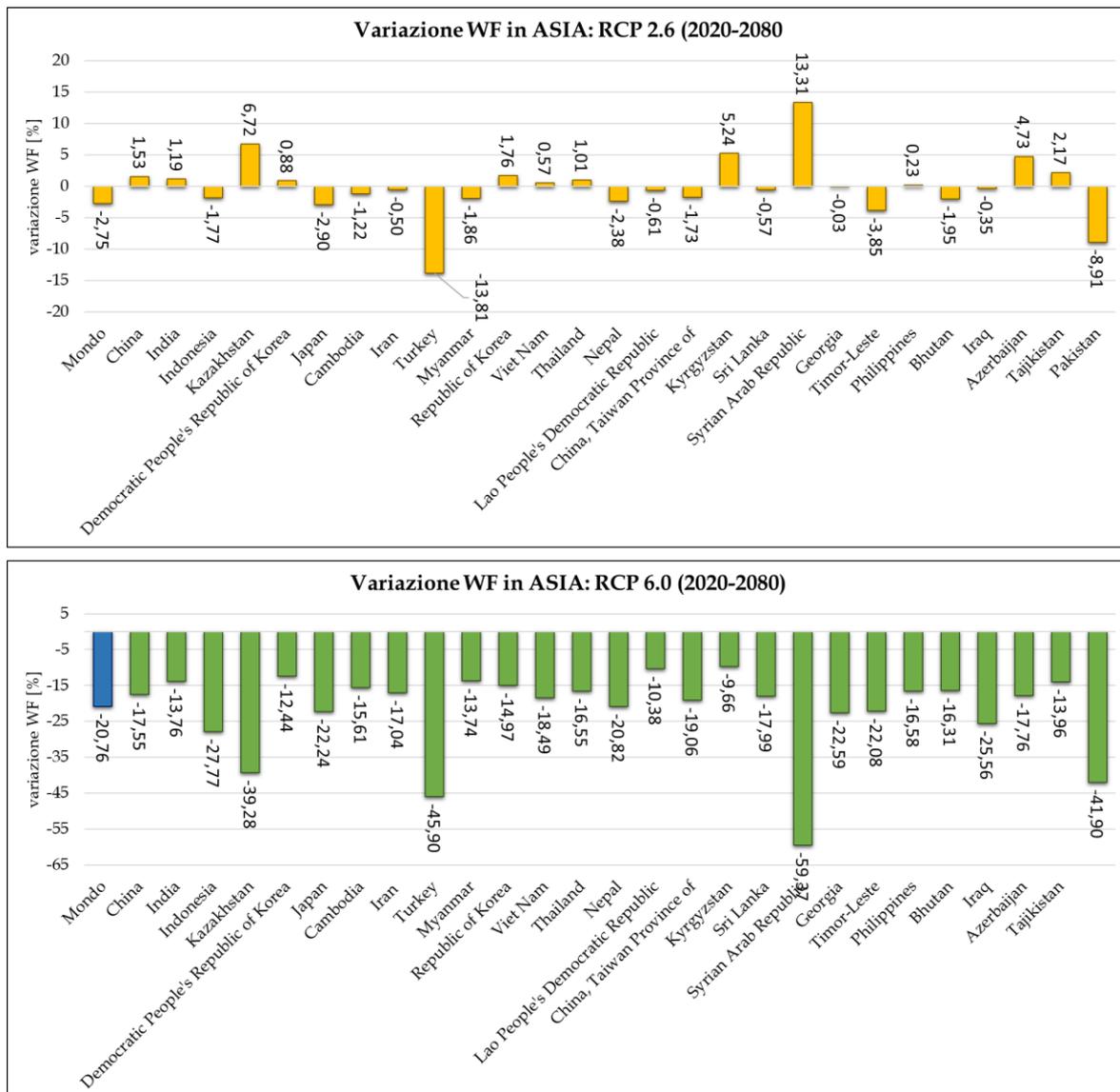


Figura 54 Variazione percentuale di WF nel continente americano. Intervallo di variazione 2020-2080, in alto è rappresentato lo scenario RCP 2.6, in basso lo scenario RCP 6.0. Da sinistra a destra le nazioni che compongono il continente in ordine di produzione.

Lo scenario RCP 6.0 comporta, per tutte queste nazioni, un decremento dell'impronta idrica significativo, dal 2020 al 2080: in Indonesia si registrano variazioni pari a -27.7% (-843 l/kg), -39.3% (-428 l/kg) in Kazakistan, -12.4% (-352 l/kg) in Nord Korea, -22.2% (-469 l/kg) in Giappone, -15.6% (-389 l/kg) in Cambodia, -17% (-355 l/kg) in Iran e -46 % (-409 l/kg) in Turchia.

Le altre nazioni coltivatrici di soia in Asia, posseggono una produzione esigua di soia, caratterizzata da una bassa resa. Tra queste nazioni, secondo lo scenario RCP 2.6, alcune, come Korea del Sud, Kirghizistan, Siria, Azerbaijan e Tajikistan, subiscono un incremento rilevanti in termini di impronta idrica, rispettivamente pari a +1.8% (+56 l/kg), +5.2% (+534 l/kg), +13.3% (+95 l/kg), +4.7% (+181 l/kg) e +2.2% (+216.1 l/kg).

Secondo lo scenario RCP 6.0, invece, tutte le produttrici minori del continente asiatico subiscono, tra il 2020 e il 2080 un decremento dell'impronta idrica, compreso tra un minimo del 10% ad un massimo di 59%. Per le specifiche riguardanti la variazione di impronta idrica in Asia si faccia riferimento all'istogramma riassuntivo in figura 54.

6 CONCLUSIONI

Gli impatti del cambiamento climatico su continenti, oceani, ghiacciai, foreste e gli ecosistemi di tutto il pianeta, è ormai evidente e manifesta le sue conseguenze sin dal 1950 [5]. I più recenti report IPCC confermano la responsabilità dell'uomo nei confronti della manifestazione del surriscaldamento globale oggi sperimentato, con certezza del 95, confermando l'importanza dell'attuazione di politiche mitigatrici nei prossimi anni.

L'attività antropica con maggiore impatto attualmente risulta essere l'emissione di gas serra, in particolar modo di anidride carbonica (CO₂). La limitazione delle emissioni di anidride carbonica, con conseguente riduzione della sua concentrazione atmosferica, rappresenta una delle strategie di maggiore importanza per prevenire il raggiungimento di livelli di surriscaldamento globale critici. La complessità del sistema climatico fa sì che i suoi tempi di reazione nei confronti delle politiche adottate siano molto lunghi, di conseguenza la limitazione delle emissioni oggi potrebbe portare a una stabilizzazione del clima con ritardi anche di decenni, inoltre il raggiungimento di soli +2°C rispetto ai livelli preindustriali potrebbe attuare meccanismi di feedback climatico, oggi ancora poco conosciuti, con conseguenze potenzialmente irreversibili nei confronti del clima e degli ecosistemi [5].

Con l'obiettivo di fornire proiezioni nel futuro delle conseguenze dell'attuazione di specifiche politiche di mitigazione delle emissioni, l'IPCC ha sviluppato gli scenari RCP: come descritto precedentemente l'RCP 2.6 rappresenta lo scenario di forte mitigazione con successiva riduzione delle concentrazioni di CO₂ e un riscaldamento inferiore a +2°C, l'RCP 6.0 rappresenta lo scenario di mitigazione blanda con un riscaldamento globale pari a circa +3°C [5]. Gli impatti relativi al realizzarsi di questi due scenari sono oggetto di sempre maggiore indagine data l'importanza della tempestività nell'attuazione di politiche di mitigazione: i settori di interesse sono molteplici, tra questi il settore agricolo rappresenta uno dei più critici, data la sua importanza in termini di soddisfacimento del fabbisogno calorico mondiale. Un aspetto di fondamentale importanza, connesso con la produzione agricola e in particolar modo cerealicola (grano, mais e riso coprivano, nel 2009, il 50% delle calorie consumate a livello mondiale), è rappresentato dai consumi idrici ad esso connessi, descritti dalla variabile impronta idrica unitari [l/kg]. L'impatto del riscaldamento globale nei confronti del settore agricolo ha quindi diretta ripercussione sui consumi idrici, da cui deriva un'ulteriore criticità connessa con la modificazione del sistema climatico.

L'analisi svolta nel presente lavoro suggerisce una forte sensibilità al cambiamento climatico da parte dei principali cereali coltivati e commerciati, quali grano, mais, riso e soia. I risultati ottenuti evidenziano come la forzante che

maggiormente influenza la crescita dei cereali sia la concentrazione di anidride carbonica atmosferica, la quale sembra avere un effetto fertilizzante sulle colture, compensando l'impatto negativo del surriscaldamento globale e relativa modificazione del clima.

L'impronta idrica unitaria di grano, mais, riso e soia subiscono rispettivamente una variazione pari a -1.8%, -0.6%, -1.9% e -4.3% sotto l'influenza del cambiamento climatico associato allo scenario RCP 2.6, tra il 2020 e il 2060. Lo scenario RCP 6.0, a cui sono associate modificazioni del clima superiori rispetto allo scenario RCP 2.6, mostra invece un decremento più estremo dei valori di impronta idrica, pari a -8.3% per il grano, -5.5% per il mais, -9.7% per il riso e -13.9% per la soia, nello stesso intervallo (2020-2060). Lo scenario RCP 2.6 prevede il raggiungimento delle concentrazioni di CO₂ atmosferica nel 2050, con successivo decremento. I risultati evidenziano, per questo scenario, un peggioramento/stabilizzazione dell'efficienza idrica (quindi un incremento/stabilizzazione dei livelli di impronta idrica unitaria [l/kg]) successivamente al 2050: nell'intervallo di variazione 2020-2080, i livelli di impronta idrica di grano, mais, riso e soia, fanno registrare variazioni pari a +0.2%, -0.3%, -0.6% e -2.8% rispettivamente. Questi dati suggeriscono una riduzione/interruzione del trend decrescente osservato in precedenza, che sembra seguire i livelli di anidride carbonica che caratterizzano lo scenario RCP 2.6. I dati relativi allo scenario RCP 6.0 portano invece a un'ulteriore riduzione dei valori di impronta idrica, parallelamente alla concentrazione di CO₂ atmosferica prevista per questo scenario.

Il miglioramento dell'efficienza idrica e della resa conseguente all'esposizione a concentrazioni elevate di anidride carbonica, emerso in numerosi studi in situazioni controllate [7;8], sembra quindi manifestarsi anche a scala globale secondo i risultati ottenuti. L'effetto fertilizzante della CO₂ risulta inoltre essere più marcato se si applica lo scenario RCP 6.0, a cui si associano modificazioni climatiche superiori. Questo aspetto suggerisce un'azione fertilizzante da parte dell'anidride carbonica capace di tamponare gli eventuali effetti negativi del cambiamento climatico. Analizzando lo scenario RCP 2.6 si è invece osservato in numerosi casi un incremento dei valori di impronta idrica, in riferimento all'intervallo di variazione 2020-2080: l'impronta idrica connessa al grano fa registrare incremento di impronta idrica in Asia del Sud, in Africa e in Sud America; per quanto concerne il mais, Africa, America del Sud, Russia e Asia sono interessate da incrementi di impronta idrica; riso e soia fanno invece registrare un peggioramento dell'efficienza idrica principalmente nell'Asia meridionale.

L'analisi svolta ha inoltre evidenziato come variazioni percentuali moderate di impronta idrica si traducono in importanti modificazioni dei consumi idrici per le nazioni in via di sviluppo e le nazioni interessate da climi particolarmente aridi, come il continente africano. Queste nazioni presentano una bassa resa a cui è

associata un'impronta idrica molto elevata: ne sono un esempio il Bangladesh, dove una modificazione pari a 2.1% dell'impronta idrica connessa al mais si traduce, tra il 2020 e il 2080, in una riduzione dei consumi idrici pari a 61 litri per chilogrammo in riferimento allo scenario RCP 6.0; in Nigeria lo scenario RCP 2.6 comporta a una modificazione dell'impronta idrica connessa al riso pari a -1% tra il 2020 e il 2080, equivalenti a -39 litri per ogni chilogrammo di cereale prodotto; infine, come ulteriore esempio, l'impronta idrica della soia, scenario RCP 2.6, fa registrare una variazione pari a -2.4% tra il 2020 e il 2080, con un risparmio di -55 l/kg. Lo scenario RCP 2.6 fa inoltre registrare un incremento di impronta idrica tra il 2080 e il 2020 in numerose nazioni. Un altro esempio è rappresentato dal Vietnam, dove un incremento pari a +1.4% dell'impronta idrica connessa al mais (RCP 2.6, intervallo di variazione 2020-2080) si traduce in +20 litri ogni chilogrammo di mais prodotto.

Il presente studio ha quindi evidenziato la rilevanza dell'effetto fertilizzante dell'anidride carbonica, che spesso sembra essere la variabile che maggiormente influenza l'evoluzione dell'impronta idrica nel tempo. L'analisi svolta, tuttavia, esclude completamente l'effetto di interventi antropici in termini di utilizzo di fertilizzanti, espansione o abbandono della superficie coltivata e implementazione di tecniche agricole particolari. Questo fa emergere interessanti interrogativi e possibilità per studi futuri: l'effetto fertilizzante dell'anidride carbonica potrebbe infatti essere sfruttato maggiormente sviluppando opportune varietà cerealicole capaci di trarre maggiore beneficio, sviluppando una maggiore resa e riducendo ulteriormente i consumi idrici; questo aspetto potrebbe inoltre essere sfruttato per incrementare la resa soprattutto nelle nazioni in via di sviluppo, così da aumentare la produzione cerealicola globale senza ulteriore espansione della superficie coltivata, come suggerito nello studio di Tilman D. et al (2011) [3].

Sono inoltre possibili ulteriori interessanti analisi a partire dalle stesse simulazioni fornite dal modello LPJml, come:

- indagini con maggiore dettaglio, a scala subnazionale, con l'obiettivo di valutare la porzione di area coltivata interessata da una variazione di impronta idrica;
- analisi sul diverso impatto del cambiamento climatico sulla coltivazione con o senza irrigazione;
- analisi sull'impatto del cambiamento climatico considerando la modificazione dell'utilizzo del suolo e l'espansione delle superfici coltivate nel tempo.

7 BIBLIOGRAFIA:

- [1] U.N. World Population Prospects (2019).
- [2] D'Odorico, P., Carr, J. A., Laio, F., Ridolfi, L., & Vandoni, S. (2014). Feeding humanity through global food trade. *Earth's Future*, 2(9), 458-469.
- [3] Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(50), 20260-20264.
- [4] Tuninetti, M., Ridolfi, L., & Laio, F. (2020). Charting out the future agricultural trade and its impact on water resources. *Science of The Total Environment*, 714, 136626.
- [5] IPCC AR5.
- [6] Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., ... & Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the national academy of sciences*, 111(9), 3268-3273.
- [7] Lee, T. D., Tjoelker, M. G., Ellsworth, D. S., & Reich, P. B. (2001). Leaf gas exchange responses of 13 prairie grassland species to elevated CO₂ and increased nitrogen supply. *New Phytologist*, 150(2), 405-418.
- [8] Zheng, Y., Li, F., Hao, L., Yu, J., Guo, L., Zhou, H., ... & Xu, M. (2019). Elevated CO₂ concentration induces photosynthetic down-regulation with changes in leaf structure, non-structural carbohydrates and nitrogen content of soybean. *BMC plant biology*, 19(1), 1-18.
- [9] Bondeau, A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., ... & Smith, B. (2007). Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13(3), 679-706.

- [10] Fader, M., Rost, S., Müller, C., Bondeau, A., & Gerten, D. (2010). Virtual water content of temperate cereals and maize: Present and potential future patterns. *Journal of Hydrology*, 384(3-4), 218-231.
- [11] Gerten, D., Schaphoff, S., & Lucht, W. (2007). Potential future changes in water limitations of the terrestrial biosphere. *Climatic Change*, 80(3), 277-299.
- [12] Dietrich, J. P., Schmitz, C., Müller, C., Fader, M., Lotze-Campen, H., & Popp, A. (2012). Measuring agricultural land-use intensity—A global analysis using a model-assisted approach. *Ecological Modelling*, 232, 109-118.
- [13] Müller, C., Elliott, J., Chryssanthacopoulos, J., Arneth, A., Balkovic, J., Ciais, P., ... & Yang, H. (2017). Global gridded crop model evaluation: benchmarking, skills, deficiencies and implications. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1403-1422.
- [14] MIRCA 2000
- [15] ISIMIP2b *simulation protocol*.
- [16] ISIMIP homepage [<https://esg.pik-potsdam.de/projects/isimip/>]
- [17] Frieler, K., Lange, S., Piontek, F., Reyer, C. P., Schewe, J., Warszawski, L., ... & Yamagata, Y. (2017). Assessing the impacts of 1.5 C global warming—simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geoscientific Model Development*, 10(12), 4321-4345.
- [18] MIRCA2000 [https://www.unifrankfurt.de/45218031/Data_download_center_for_MIRCA2000]
- [19] FAOstat [<http://www.fao.org/faostat/en/>];
- [20] Tamea, S., Tuninetti, M., Soligno, I., & Laio, F. (2021). Virtual water trade and water footprint of agricultural goods: the 1961–2016 CWASI database. *Earth System Science Data*, 13(5), 2025-2051.
- [21] Tuninetti, M., Tamea, S., Laio, F., & Ridolfi, L. (2017). A Fast Track approach to deal with the temporal dimension of crop water footprint. *Environmental Research Letters*, 12(7), 074010.