

Progetto RISWAGEST “Gestione innovativa dell’acqua in risaia”

Attività 1 - Verifica della applicabilità e ottimizzazione agronomica delle gestioni irrigue AWD nell’areale risicolo lombardo

Sotto-attività 1a - *Analisi della bibliografia disponibile inerente le tecniche AWD*

1. Indice

1.	Indice	1
2.	Sistemi colturali di gestione del riso nel mondo	2
2.1	Trapianto e semina diretta	4
3.	La tecnica dell’Alternate Wetting and Drying (AWD).....	4
3.1	Alternate Wetting and Drying nelle aree tropicali.....	6
3.1.1	Aspetti agronomici, di qualità della granella e di influenza varietale.....	7
3.1.2	Utilizzo delle risorse idriche.....	9
3.1.3	Efficienza di uso dell’azoto	15
3.1.4	Emissioni di gas ad effetto serra	18
3.2	Alternate Wetting and Drying nelle aree temperate.....	21
3.2.1	Aspetti agronomici, di qualità della granella e di influenza varietale.....	21
3.2.2	Aspetti legati al bilancio idrico	26
3.2.3	Aspetti legati all’efficienza della fertilizzazione azotata	27
3.2.4	Aspetti legati alle emissioni di gas serra	28
3.3	Alternate wetting and drying in Italia	31
3.3.1	Aspetti agronomici, di qualità della granella e di influenza varietale.....	31
3.3.2	Aspetti connessi all’utilizzo irriguo in Italia.....	32
3.3.3	Aspetti legati all’efficienza della fertilizzazione azotata	33
3.3.4	Aspetti legati alle emissioni di gas serra	33
4.	Osservazioni generali.....	35
5.	Progetti correlati a RISWAGEST: sintesi dei risultati	36
5.1	Progetto MEDWATERICE (2019-in corso).....	36
5.2	Progetto RISTEC (2018-2019).....	37
5.3	Progetto BABYRICE (2017-2018).....	39
5.4	Progetto WATPAD (2015-2017).....	40
5.5	Progetto GREENRICE (2014-2017).....	41
5.6	Progetto POLORISO (2012-2013)	41
5.7	Progetto BIOGESTECA (2011-2012).....	42
6.	Bibliografia	45

2. Sistemi colturali di gestione del riso nel mondo

Oggi l'agricoltura sta affrontando la complicata sfida di fornire cibo sufficiente ad una popolazione mondiale in netta crescita e in condizioni di scarsità di risorse idriche (Hamoud *et al.*, 2019). Inoltre, è responsabile di circa un quarto delle emissioni di gas ad effetto serra di origine antropogenica, determinate principalmente dalle emissioni di protossido di azoto (N₂O) originate dalle fertilizzazioni azotate e dalle emissioni di metano (CH₄) derivante dagli allevamenti e dalla coltivazione del riso (LaHue *et al.*, 2016). Per tre miliardi di abitanti, il riso contribuisce per circa il 35-60% del proprio fabbisogno calorico (Fageria, 2007 e Norton *et al.*, 2017). L'area coltivata a riso interessa l'11% dell'intera superficie arabile mondiale ed è distribuita in 122 paesi di tutti i continenti, seppure circa il 90% della produzione risicola mondiale sia concentrata in Asia¹. I sistemi di coltivazione del riso e le pratiche di gestione del suolo e della coltura che sono state sviluppate per ogni sistema sono molto complesse. I sistemi si sono adattati alle specifiche condizioni ambientali e socio-economiche in cui si collocano le realtà risicole rendendo estremamente complicata la possibilità di classificarle tenendo in considerazione tutti questi molteplici fattori (De Datta, 1981).

Con particolare riferimento alla disponibilità idrica e ai rapporti che si possono stabilire tra suolo e acqua durante il ciclo colturale, la risicoltura mondiale è schematicamente classificabile in 4 principali ecosistemi: sistema pluviale, sistema inondato, sistema dell'acqua profonda e sistema irrigato.

Nel sistema pluviale (*upland rice system*), i terreni sono asciutti e drenanti e raramente la sommersione ha una durata superiore a due giorni durante tutto il ciclo colturale poiché le precipitazioni costituiscono la principale fonte di acqua per la coltura. Il riso viene coltivato su terreno asciutto e seminato poco prima dell'inizio della stagione delle piogge. La produzione media unitaria è bassa (1-4 t/ha) in quanto i principali limiti riguardano la scarsa fertilità dei suoli, le malattie e le piante infestanti. Le principali zone di diffusione sono l'India e il Bangladesh, le aree collinari umide dell'Africa occidentale, le regioni lievemente collinari del Brasile. Circa il 13% delle terre destinate a riso sono coltivate con questo metodo, mentre l'incidenza sulla produzione mondiale è pari al 4%¹.

Il sistema inondato (*rainfed lowland rice system*) sfrutta l'acqua della pioggia o quella derivata dai piccoli corsi d'acqua e dalle esondazioni dei fiumi. In queste condizioni, non è possibile alcun controllo del livello dell'acqua esponendo il riso al rischio di carenza idrica o sommersioni con molta acqua, con l'alternanza nel suolo di stati di aerobiosi e anaerobiosi. Proprio per questi motivi, la resa media unitaria è molto bassa (1-3 t/ha). È diffuso in ambienti caratterizzati da clima sfavorevole e substrati poveri, in cui non ci sono le condizioni per l'applicazione di moderne e costose tecnologie. Il livello di acqua di sommersione è compreso tra 0 e 50 cm. Circa il 25% della superficie viene coltivata con questo metodo, mentre l'incidenza sulla produzione mondiale è pari al 17%. Le principali zone di diffusione sono il delta dei fiumi, le aree paludose, le pianure soggette a sommersione di Asia e Africa sub-sahariana¹.

¹ <https://www.waterandfoodsecurity.org/scheda.php?id=146>

Il “sistema dell’acqua profonda” (*deepwater rice system*), è un’espressione generale legata alla coltivazione del riso in cui il livello dell’acqua rimane al di sopra di 50 cm (fino a 6 m) per un periodo della crescita della coltura (De Datta, 1981). È tipico degli ambienti in cui le risaie sono soggette a una sommersione incontrollata per gran parte del ciclo colturale. L’impianto della coltura avviene principalmente prima della stagione delle piogge; solo raramente si realizza mediante il trapianto. Le produzioni sono le più basse (1-1,5 t/ha) a causa delle forti variazioni dovute alle imprevedibili alternanze di allagamenti con periodi di siccità. L’incidenza sulla produzione mondiale è minima (1%) date le scarse rese produttive e la scarsa adozione di questa tecnica (6% superficie totale). I regimi idrici incontrollati e i sistemi dell’acqua profonda si trovano a ridosso dei delta, degli estuari e delle valli dei fiumi in India, Bangladesh, Burma, Thailandia, Vietnam, Kampuchea, Indonesia e nell’Africa subsahariana, in cui l’acqua rimane stagnante durante una parte della crescita del riso (De Datta, 1981).

Il sistema irrigato (*irrigated lowland rice system*) viene adottato su terreni in piano, adeguatamente preparati, che possono disporre di un uniforme strato di acqua regolabile in altezza a seconda delle esigenze della coltura. In relazione alla disponibilità di piogge, il sistema irrigato può venire praticato:

- nella stagione umida (*irrigated wet season*), l’irrigazione serve per integrare l’acqua fornita dalle piogge;
- nella stagione asciutta (*irrigated dry season*): tipica degli ambienti in cui le precipitazioni sono solitamente di scarsa entità e l’acqua è assicurata, quasi totalmente, dall’irrigazione.

La diffusione di questo sistema è legata alla realizzazione di sbarramenti sui fiumi, per accumulare l’acqua di superficie e di una fitta rete di canali, per alimentare con continuità i campi coltivati. La gestione dell’acqua è regolata e il livello idrico nella risaia oscilla tra 5 e 15 cm. I livelli produttivi più elevati con un solo ciclo colturale all’anno vengono registrati in Egitto, America, Australia ed Europa (4-10 t/ha), incidendo per il 78% sulla produzione mondiale. Nelle regioni a clima tropicale il ricorso all’irrigazione, unitamente alla coltivazione di varietà a ciclo breve permette di realizzare da due a tre coltivazioni all’anno sullo stesso terreno. Le principali problematiche incontrate nel sistema irrigato di coltivazione sono le avversità biotiche (piante infestanti, insetti e malattie), la corretta gestione dell’acqua e il degrado ambientale legato a un elevato apporto dei mezzi di produzione.

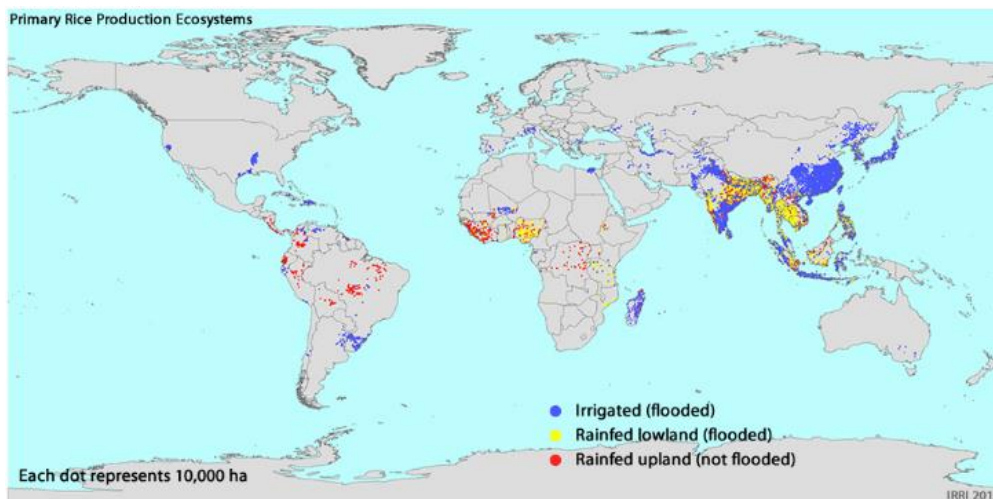


Figura 1. Distribuzione nel mondo dei sistemi di coltivazione del riso².

2.1 Trapianto e semina diretta

L'impianto della coltura del riso può essere realizzato con semina diretta o con il trapianto. La semina diretta avviene su terreno asciutto o sommerso. L'operazione è rapida e richiede poca manodopera. La semina su terreno asciutto è diffusa nel sistema irrigato (Europa e USA) e nel sistema pluviale e delle acque profonde, mentre la semina su terreno saturo è praticata nei sistemi irrigati più produttivi (USA, Europa, America Latina e Australia) e recentemente nei sistemi irrigati e inondati dell'Asia. Il trapianto può essere eseguito manualmente (nei paesi poco sviluppati) o con mezzi meccanici (Corea del Sud e Giappone). Durante il trapianto le piantine vengono disposte a ciuffi di 2-4 piante ciascuno. Questa tecnica è particolarmente adatta agli ambienti dove le pratiche agronomiche, soprattutto la preparazione del terreno e la gestione dell'acqua, non sono ottimali e dove, per ragioni economiche o organizzative, non vi è la possibilità di ricorrere ai diserbanti perché assicura un vantaggio competitivo della coltura nei confronti delle piante infestanti, limitando sensibilmente il danno causato dalla loro presenza. Generalmente è molto diffuso nei sistemi irrigati e inondati in Asia e Africa³.

3. La tecnica dell'Alternate Wetting and Drying (AWD)

Negli ultimi 20-30 anni, molti progetti di ricerca e sviluppo si sono focalizzati sullo sviluppo di strategie alternative di gestione dell'acqua che riducono l'utilizzo della risorsa idrica e le emissioni di CH₄ (Verhoeven *et al.*, 2018). Per fronteggiare queste sfide di sostenibilità della risicoltura, è necessario identificare tecniche colturali che permettano la razionalizzazione dell'utilizzo dell'acqua, l'incremento dell'efficienza di utilizzazione della fertilizzazione azotata, la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e il controllo delle fisiopatie, preservando, al tempo stesso, i livelli quali-quantitativi delle produzioni raggiunte. Una possibile soluzione è l'applicazione di tecniche che prevedono l'alternanza di periodi di

² <https://www.waterandfoodsecurity.org/scheda.php?id=146>

³ <https://www.waterandfoodsecurity.org/scheda.php?id=146>

asciutta a periodi di sommersione in risaia (*Alternate Wetting and Drying, AWD*), già sperimentate nella risicoltura di altri continenti.

L'irrigazione AWD del riso è una pratica in cui, durante il ciclo colturale del riso, si alternano periodi di sommersione a periodi di asciutta. Le tecniche AWD prevedono irrigazioni intermittenti delle risaie con una continua alternanza di condizioni aerobiche ed anaerobiche del suolo: nel momento in cui il livello dell'acqua all'interno della camera o la tensione matriciale del terreno raggiungono una soglia prestabilita, si interviene con una sommersione. Mentre le tecniche che impiegano il sistema di sommersione a intermittenza sono applicate da diversi decenni, le linee guida sull'attuazione di AWD sono state delineate solo nel 2002 dall'*International Rice Research Institute* (Lampayan *et al.*, 2015 e Norton *et al.*, 2017).

Nella gestione dell'AWD è necessario monitorare il livello dell'acqua al di sotto del piano di campagna, per il quale può essere impiegato il *field water tube*, un tubo perforato che può essere fabbricato con materiali come il polivinilcloruro (PVC), il bambù, le bottiglie d'acqua in plastica o persino barattoli di latta (Lampayan *et al.*, 2015). Il tubo consente di misurare la disponibilità d'acqua "nascosta" al di sotto della superficie del suolo. La prassi abituale è quella di utilizzare un tubo di 10-20 cm di diametro e 30 cm di lunghezza, con perforazioni nella parte inferiore di 15 cm. Il *field water tube* è installato in modo tale che i 15 cm inferiori della parte perforata rimangano al di sotto della superficie del suolo e i 15 cm non perforati sopra la superficie. Le fenestrate consentono all'acqua di entrare all'interno del tubo garantendo all'operatore di misurarne il livello anche al di sotto della superficie del suolo. La dinamica della tensione matriciale nel suolo dei trattamenti AWD è connessa al livello dell'acqua sotto il piano campagna rilevato dai *water tubes*. In un lavoro condotto da Lampayan *et al.* (2015), in cui sono stati confrontate tre tipologie di AWD più o meno estreme, è illustrato come, all'approfondirsi del livello dell'acqua sotto il piano campagna, la tensione matriciale del suolo a 15 cm vada aumentando (i.e. diventi più negativa e lontana dallo 0, che rappresenta la condizione di saturazione). In entrambi gli anni di sperimentazione, la tensione dell'acqua nel suolo incrementava da AWD15 a AWD30: i valori di picco della tensione matriciale nel suolo alla profondità di 15 cm erano 12-13 kPa in AWD15, 16-20 kPa in AWD25 e 21-25 kPa in AWD30.

L'intervallo di giorni intercorsi e la tempistica delle applicazioni irrigue dipendono dalle precipitazioni, dall'andamento dell'umidità del suolo, dal tipo di suolo e dallo stadio di crescita del riso. Studi in letteratura hanno dimostrato che l'AWD può aumentare l'efficienza dell'uso dell'acqua, riducendo le infiltrazioni e la percolazione durante la produzione e sfruttando le precipitazioni durante la stagione di crescita del riso (Linguist *et al.*, 2015). Rispetto alla sommersione continua, la portata idrica in entrata nella camera è interrotta quando si raggiunge il livello d'acqua desiderato, l'acqua viene lasciata infiltrare nel suolo e la successiva irrigazione viene effettuata al raggiungimento di un determinato potenziale matriciale del suolo fissato sulla base di considerazioni agronomiche e misurato con tecniche più o meno empiriche, facilmente implementabili in azienda.

In relazione alle emissioni di gas a effetto serra, numerosi studi hanno dimostrato una minore emissione di metano (CH₄) applicando le tecniche AWD. Molti fattori possono influenzare le condizioni di sommersione e quindi le emissioni di CH₄: la tessitura del suolo,

il grado di stabilizzazione della sostanza organica del suolo, il trasporto di CH₄ dal suolo all'atmosfera, la profondità dello strato di suolo ossidato ospitante i metanotrofi, la disponibilità di accettori di elettroni alternativi (NO₃⁻, Fe³⁺, SO₄²⁻), le tecniche agronomiche (rotazioni con colture aerobiche, tecnica di semina, gestione della paglia e delle fertilizzazioni, ecc.), le colture precedenti (Lagomarsino A. *et al.*, 2016). Tuttavia, le tecniche AWD, pur riducendo le emissioni di CH₄, potrebbero incrementare quelle di N₂O. Minori informazioni sono disponibili sull'influenza delle tecniche AWD nei riguardi delle emissioni di protossido d'azoto. L'N₂O è un sottoprodotto della nitrificazione e un prodotto intermedio della denitrificazione (Peyron *et al.*, 2016). L'alternanza di condizioni ossidanti e riducenti promuove rispettivamente la nitrificazione con la produzione di nitrato e la denitrificazione parziale con la produzione di N₂O o totale con la produzione di N molecolare, N₂ (Miniotti *et al.*, 2016).

L'AWD o tecniche simili che prevedono periodi di asciutta singoli o multipli sono stati largamente adottati in Cina e in molti paesi del Sud-Est asiatico: circa il 40% dei risicoltori in Cina e per oltre l'80% degli agricoltori di riso nell'India nord-occidentale e in Giappone adottano tecniche come l'AWD o che comunque prevedono l'alternanza di periodi di sommersione e asciutta (Richards e Sander, 2014). Tuttavia, al giorno d'oggi, la maggior parte degli agricoltori seguono un AWD "safe" (bassa severità) in cui mantengono, quindi, la soglia del livello idrico al di sotto del piano di campagna a 15 cm prima di sommergere. Questo metodo è diventato una pratica raccomandata nelle aree di riso irrigate con scarsità d'acqua nel sud e sud-est asiatico. L'AWD ha riscosso successo non solo nei paesi tropicali, ma anche nei paesi temperati, quali la California, l'Arkansas: in questi anni i primi passi si stanno muovendo anche in Italia e nel bacino del Mediterraneo.

3.1 Alternate Wetting and Drying nelle aree tropicali

In questi areali si eseguono due cicli colturali di riso in condizioni di irrigazione: sebbene vi siano abbondanti precipitazioni nel sud-est dell'Asia, la carenza idrica rappresenta ancora un grave problema nella produzione di riso a causa della distribuzione disomogenea delle precipitazioni tra stagioni e regioni (Liang *et al.*, 2016). Il sistema dominante di produzione di riso in Asia è il trapianto o la semina diretta in un campo continuamente sommerso con 5-10 cm durante la stagione di crescita. La preparazione del terreno consiste in una bagnatura, aratura e un'epicatura, fino a quando si forma uno strato fangoso morbido di 10-15 cm in condizioni sature. Il fabbisogno idrico per la preparazione del terreno è teoricamente di 150-200 mm, ma può raggiungere i 650-900 mm nel momento in cui la sua preparazione richieda più tempo, ovvero 24-48 giorni. L'input di acqua in campo durante la crescita delle colture può variare da 500 a 800 mm a oltre 3000 mm (Bouman e Tuong, 2001).

A partire dal momento in cui è stato approfondito dall'IRRI negli anni '90, l'AWD è stato adottato da molti paesi in Asia, a tal punto che, ad oggi, l'AWD-safe è diventato una delle più diffuse tecnologie volte alla riduzione di utilizzo d'acqua praticate nell'intero continente (Tuong *et al.*, 2005, Lampayan *et al.*, 2015, Liang *et al.*, 2016, Pan *et al.*, 2017). Una volta che le piantine trapiantate si sono insediate in maniera ottimale a circa 2-3 settimane dal

trapianto, l'acqua viene lasciata infiltrare fino a una certa profondità-soglia al di sotto della superficie del suolo prima di apportare una successiva irrigazione. Nonostante già da diversi anni l'AWD sia raccomandato ai risicoltori di numerosi paesi del sud-est dell'Asia, tra cui Vietnam, India, Bangladesh e le Isole Filippine, solo negli ultimi anni, sono stati intrapresi diversi studi in Cina al fine di valutare gli effetti agronomici e ambientali della tecnica dell'AWD.

3.1.1 Aspetti agronomici, di qualità della granella e di influenza varietale

Liao et al. (2020). L'esperimento, condotto nell'università di Wuhan (Cina) condotto tra giugno e settembre 2018, ha valutato due differenti gestioni irrigue, sommersione continua (CF) e AWD di media severità con sommersione quando l'umidità volumetrica nel suolo raggiungeva il 45% (-20 kPa), e della presenza (D1) o meno (D0) di drenaggio a metà stagione irrigua. Le due tecniche irrigue sono state messe in relazione ai dati produttivi, alle componenti della produzione e alle emissioni di metano e protossido di azoto al variare della concimazione azotata, 90 kgN/ha e 180 kgN/ha. La concimazione azotata è stata suddivisa in tre momenti: concimazione di fondo, al momento della ripresa vegetativa e al momento della differenziazione della pannocchia. Gli effetti sulla resa produttiva sono dovuti alle concimazioni azotate, con un aumento di resa all'aumentare della concimazione, mentre i metodi irrigui non hanno determinato differenze significative. Durante la stessa sperimentazione, i numeri dei culmi alla raccolta sono risultati statisticamente uguali, mentre le piante di riso coltivate in sommersione continua (111,4 cm) sono apparse statisticamente più alte rispetto alle piante in AWD (107,7 cm), segno che l'AWD potrebbe aver messo in condizioni di stress il riso durante la levata.

Song et al. (2019). A Huayang (Cina) tra il 2015 e il 2016 è stato condotto uno studio, in cui, per due varietà differenti (var. *Zhiongjiaozao17* e var. *Lvhan1*), è stata confrontata la strategia di un AWD di media severità (con sommersione quando il potenziale idrico nel suolo raggiungeva -15 kPa a 15-20 cm di profondità) con la tecnica della sommersione continua (CF) a diversi livelli di fosforo (0 kg P/ha, 45 kg P/ha e 90 kg P/ha). La resa produttiva è stata influenzata dai due trattamenti irrigui, in quanto è stata statisticamente riscontrata una maggiore produzione nelle tesi AWD. L'AWD ha presentato una maggiore resa con quantitativi di fosforo inferiori per entrambe le cultivar, mentre con 90 kg P/ha sono state riscontrate delle differenze varietali. Gli autori hanno riscontrato che, nonostante un numero di pannocchie m⁻² inferiore, la minor incidenza di sterilità e il numero di spiglette per pannocchia significativamente superiori del riso gestito in AWD rispetto al riso CF giustificano la maggior produzione. La resa globale e la resa grani interi non sono state influenzate significativamente dalle due strategie di gestione dell'acqua.

Wang et al. (2018). È stato condotto un esperimento a Jangsu (Cina) per verificare la resa alla raccolta di due diverse cultivar di riso, YY-2640 e HD-5, tra il giugno e l'ottobre 2015 e 2016, in relazione a tre diverse gestioni irrigue: sommersione continua (CF), AWD, in cui i campi sono stati sommersi solo quando il potenziale idrico nel suolo raggiungeva -15 kPa a 15-20 cm di profondità e "irrigazione a solco" (FI), in cui l'acqua è stata immessa quando il potenziale idrico del suolo a 15-20 cm arrivava a -5kPa. Per entrambe le varietà, la produzione di risone è risultata statisticamente maggiore in FI, intermedia in AWD e inferiore

nel CF. La presenza di un maggior numero di pannocchie al m², la maggior percentuale di granella non sterile e il peso maggiore dei 1000 semi ha contribuito positivamente sulla produzione delle tesi FI e AWD. Escludendo la tesi in irrigazione turnata, è emerso che, per entrambe le varietà, tutte le componenti produttive hanno restituito indicazioni a favore della tesi in regime di AWD, ad eccezione del numero di spiglette per pannocchia in cui non sono emerse differenze per la varietà HD-5.

Pan et al. (2017). In Guangzhou (Cina) tra l'agosto e il novembre 2014 e 2015, si è investigata la relazione tra 4 diverse dosi di azoto (0 kgN/ha, 90 kgN/ha, 180 kgN/ha e 270 kgN/ha) e due diverse gestioni irrigue: AWD safe, in cui l'irrigazione ha avuto luogo quando il livello dell'acqua scende al di sotto di -15 cm, e FP, in cui la sommersione è stata interrotta per 10 giorni in corrispondenza della differenziazione pannocchia. In entrambi gli anni, non sono emerse differenze significative né per quanto riguarda la produzione né per le componenti produttive, come il numero di culmi/m², il numero di spiglette per pannocchia, la sterilità e il peso dei 1000 semi.

Liang et al. (2016). L'esperimento si è svolto in pieno campo nell'anno 2014 a Guangzhou (Cina) in due periodi dell'anno diversi: il primo tra aprile e luglio e il secondo tra agosto e novembre. Sono state indagate due varietà, TY3618 e HFZ, e tre gestioni irrigue: la sommersione continua (CF), AWD15, in cui l'irrigazione è avvenuta quando il livello dell'acqua è sceso al di sotto di 15 cm e AWD30, in cui l'irrigazione ha avuto luogo quando il livello dell'acqua è sceso al di sotto di 30 cm. Nel caso del trapianto ad agosto è stata aggiunta una quarta tesi data dalla tecnica tradizionale adottata nell'areale (FP). Per entrambi i periodi, sono state verificate le produzioni e le emissioni di metano. Per entrambe le stagioni di coltivazione, non sono state determinate differenze significative nelle produzioni tra le gestioni irrigue; al contrario sono emerse differenze considerando le due varietà in quanto TY3618 ha prodotto più granella di HFZ, specialmente con la conduzione in AWD15 (10,3% in più di AWD30 e 7,3% in più di FP). Il numero di pannocchie/m² è risultato maggiore nella gestione AWD15 e AWD30 rispetto alle altre gestioni irrigue, ma l'entità dell'aumento è stato influenzato dalla cultivar: nella tesi AWD15, la var. HFZ ha mostrato un aumento rispetto a CF e FP rispettivamente del 8,7% e 12,2%, mentre in quella AWD30 è risultata del 7,8% e 11,3%. La var. TY3618 ha presentato una differenza nel numero di spiglette/pannocchia con un numero maggiore in AWD15, mentre AWD30 è stato caratterizzato da una diminuzione di spiglette dell'ordine di 13,9% rispetto a FP e 10,8% rispetto a CF. All'interno della var. HFZ, non sono emerse differenze significative sul numero delle spiglette per pannocchia tra i diversi trattamenti irrigui. Il peso dei 1000 semi e la sterilità non sono state influenzate dalla gestione dell'acqua.

Norton et al. (2017). L'esperimento biennale (2013-2014), condotto nel Mymensingh (Bangladesh), ha valutato la produzione di campo, la qualità della granella, le concentrazioni di metalli pesanti come arsenico e cadmio in relazione alle conduzioni irrigue sommersione continua (CF) e AWD-safe. È stato realizzato in campi non comunicanti tra loro in una zona del Bangladesh in cui non è stato coltivato riso per 15 anni; la concimazione azotata è stata suddivisa in tre momenti: 40 kg/ha il giorno prima del trapianto, 40 kg/ha al momento dell'accestimento e 40 kg/ha in fioritura. Per quanto riguarda la produzione, l'AWD ha ottenuto una produzione maggiore (7,7 t/ha e 9,1 t/ha) rispetto al CF (7,0 t/ha e 8,3 t/ha) grazie a un numero maggiore di culmi fertili che hanno prodotto una pannocchia. Tuttavia,

nonostante la significatività individuata durante le prime fasi di sviluppo delle piante, non sono state determinate differenze statistiche sul numero finale di culmi tra le due gestioni irrigue. L'accumulo di metalli pesanti nella granella è variato in base al metallo pesante preso in considerazione in quanto le concentrazioni di arsenico nel riso in AWD misurate per i due anni dell'esperimento sono apparse ridotte del 13,7% e del 25,7% rispetto al CF. Per quanto riguarda il cadmio, il discorso è risultato opposto visto che nel presente esperimento, si è avuta una concentrazione maggiore in AWD rispetto a CF del 27,8% nel 2013 e del 67,3% nel 2014. Anche se l'aumento percentuale è molto alto, l'effettiva concentrazione di cadmio nei granelli non è risultata molto alta (0,019 mg/kg) e non ha superato la soglia di sicurezza dettata dal Governo del Bangladesh di 0,099 mg/kg.

3.1.2 Utilizzo delle risorse idriche

Song et al. (2019). La sperimentazione è stata condotta presso Huayang (28° 32' 29" N, 115° 09' 32" E), Cina, nel 2016 e nel 2017. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue, tre applicazioni di fosforo e di due varietà di riso. L'impianto della coltura è avvenuto tramite trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate quando il potenziale dell'acqua nel suolo misurato ad una profondità di 15-20 cm raggiungeva i -15 kPa. Se comparata alla gestione CF, la gestione AWD ha portato ad una riduzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 24%. Le differenze esistenti in termini di raccolto tra le due varietà analizzate sono rimaste simili in entrambe le gestioni. Secondo gli autori questo dimostrerebbe che anche le varietà di riso sviluppate per le gestioni CF possono mantenere un raccolto simile anche nelle gestioni AWD di tipo "safe".

Pan et al. (2017). Le prove sono state condotte presso la *Baiyun Experimental Farm of Guangdong Academy of Agricultural Sciences* in Guangzhou (23° 17' N, 113° 23' E), Cina, nel 2014 e nel 2015. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue e di quattro tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto per trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (FP) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD15). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui l'altezza dell'acqua nel campo, monitorata attraverso l'utilizzo di *field water tubes*, raggiungeva i -15 cm e riportando l'altezza dell'acqua sul campo a 5 cm. Gli autori riportano come la gestione AWD rispetto alla FP abbia consentito una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 24% nel 2014 e del 71% nel 2015. Il raccolto tra le due gestioni irrigue testate è rimasto simile e la *Water Productivity* (kg m⁻³) è risultata significativamente maggiore per le gestioni AWD rispetto alla FP, essendo il 15,6% più alta nel 2014 ed il 40,9% più alta nel 2015.

Liang et al. (2016). Le sperimentazioni sono state condotte presso la *Dafeng Experimental Station of Guangdong Academy of Agricultural Sciences* (23° 08' N, 113° 20' E), Cina, nel 2014. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). L'impianto della coltura è avvenuto tramite trapianto.

Nella prima parte della stagione (*early season*) il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di tre gestioni irrigue, mentre nella seconda parte della stagione (*late season*) il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di quattro gestioni irrigue e di due varietà di riso. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF e FP) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD15 e AWD30). Nelle gestioni AWD le irrigazioni sono state effettuate sulla base del livello raggiunto dall'acqua rispetto al piano campagna all'interno dei *field water tube* installati: a -15 cm per la gestione AWD15 e a -30 cm per la gestione AWD30. Le irrigazioni nelle gestioni AWD sono state effettuate riportando l'acqua sul campo ad un'altezza massima di 5 cm. Relativamente alle prove della prima parte della stagione, le gestioni AWD15 e AWD30 hanno consentito una riduzione nell'utilizzo della risorsa idrica rispetto alla CF del 40,6% e del 44,5%, rispettivamente, e le produzioni più alte, benché le differenze non siano risultate significative, sono state osservate per la gestione AWD15. Rispetto alla seconda parte della stagione, la gestione AWD15 ha fatto registrare una riduzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 19,4% e la gestione AWD30 del 29,7%, entrambe rispetto alla gestione FP. Per le stesse prove e rispetto alla gestione CF, invece, la riduzione è stata del 44,6% e del 51,7% per la gestione AWD15 e AWD30, rispettivamente. In entrambe le varietà i raccolti più elevati sono stati osservati per la gestione AWD15 e la *Water Productivity* (kg m^{-3}) di entrambe le gestioni "alternate" è risultata sempre maggiore delle gestioni CF e FP.

Wang et al. (2016). Le prove sono state condotte presso la Yangzhou University (32° 30' N, 119° 25' E), Cina, nel 2013 e nel 2014. La zona climatica secondo la classificazione di Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è franco sabbiosa (*sandy loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di tre gestioni irrigue e di tre tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto per trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWMD e AWSD). Nelle gestioni AWMD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui il potenziale dell'acqua nel suolo raggiungeva i -15 kPa a 15-20 cm di profondità, mentre nelle gestioni AWSD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui il potenziale dell'acqua nel suolo raggiungeva i -30 kPa a 15-20 cm di profondità. Il singolo intervento irriguo è stato di 2-2,5 cm. Gli autori riportano diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 19,9-26,9% per le gestioni AWMD e del 40-40,5% per le gestioni AWSD rispetto alla CF. Mantenendo lo stesso livello di fertilizzazione azotata, tra le gestioni è stata la AWMD a produrre di più e a far registrare i valori di *Water Productivity* (kg m^{-3}) più elevati.

Chu et al. (2015). La sperimentazione è stata effettuata presso la Yangzhou University (32° 30' N, 119° 25' E), Cina, nel 2012 e nel 2013. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è franco sabbiosa (*sandy loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di quattro gestioni irrigue e di due tipologie di gestione dei residui colturali. L'impianto della coltura è avvenuto tramite trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWMD). Nelle gestioni AWMD le irrigazioni sono state effettuate al raggiungimento di un potenziale dell'acqua nel suolo di

-15 kPa misurato a 15-20 cm di profondità. Il singolo intervento irriguo è stato di 2-3 cm. Gli autori riportano un aumento del raccolto nelle gestioni AWMMD rispetto alle CF tra il 2,7% ed il 18,0%, con una riduzione di utilizzo della risorsa idrica tra il 37,7% ed il 38,2% ed un incremento di WP (kg m^{-3}).

Howell et al. (2015). La sperimentazione è stata effettuata presso l'*Agyauli Village Development Committee* (VDC), Nepal. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue e di due varietà di riso. L'impianto della coltura è avvenuto tramite trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate quando il livello dell'acqua, monitorato attraverso l'utilizzo di *soil water tubes*, scendeva al di sotto 15 cm dal piano campagna e riportando ad un'altezza massima di 78 mm il livello idrico in campo. Gli autori riportano una riduzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 50% per le gestioni AWD rispetto alle CF. La produzione si è mantenuta simili tra AWD e CF, con conseguente significativo aumento della Water Productivity (kg m^{-3}) per le gestioni AWD rispetto le CF (fino al 133%).

Xu et al. (2014). La sperimentazione è stata effettuata presso la Huazhong Agricultural University (30° 01' N, 115° 74' E), Cina. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è franco argilloso limosa (*silty clay loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di tre gestioni irrigue e di due varietà di riso. L'impianto della coltura è avvenuto per semina diretta su terreno saturo (no-tillage with a bed-furrow). Le gestioni irrigue testate sono: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (FWI e FWDI). Gli autori riportano come, in media, le gestioni FWI ed FDI abbiano registrato una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 38 e del 41% rispetto alla CF. Non si riscontrano differenze di produzione tra CF e FWI o tra FWI e FDI.

Ye et al. (2013). Le sperimentazioni sono state condotte nel 2010 nel 2011 presso il Qianxi village (30° 21' N, 119° 53' E), Cina. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue e di quattro tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto per trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate monitorando l'altezza dell'acqua attraverso un field water tube di 40 cm di lunghezza e 20 cm di diametro (15 cm sopra il terreno e 25 cm al di sotto del piano campagna). Gli autori riportano un utilizzo totale di 1023.0 mm e di 1078.8 mm di risorsa idrica per la gestione CF contro un valore di 837.2 mm (circa il 18% in meno) e di 962.7 mm (circa l'11% in meno) per la gestione AWD. Rispetto alla gestione CF, la produzione della gestione AWD è aumentato del 5.7% nel 2010 e del 6.6% nel 2011. Anche gli indici calcolati per definire la Water Productivity (IWUE e TWUE) sono aumentati in maniera significativa per la gestione AWD rispetto alla CF.

Yao et al. (2012). Le prove sono state condotte nel 2009 e nel 2010 presso il Zhangbang Village (29° 51' N, 115° 33' E), Cina. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue e di tre tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto per trapianto. Le gestioni irrigue testate sono: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui l'altezza dell'acqua all'interno dei field water tubes scendeva al di sotto di 15 cm, riportando l'acqua sul campo ad un'altezza massima di 5 cm. Gli autori riportano una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 24% nel 2009 e del 38% nel 2010 per le gestioni AWD rispetto alla CF. Non si riporta una diminuzione di raccolto della gestione AWD rispetto alla CF, mentre si riscontra un aumento consistente del valore di Water Productivity (kg m^{-3}) per la gestione AWD rispetto alla CF.

Zhang et al. (2009). Le prove sono state condotte presso la Yangzhou University (32° 30' N, 119° 25' E), Cina, nel 2005 e nel 2006. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è franco sabbiosa (*sandy loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di tre gestioni irrigue e di due varietà di riso. L'impianto della coltura è avvenuto per trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CI) e *Alternate Wetting and Drying* (WMD e WSD). Nella gestione WSD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui il potenziale dell'acqua nel suolo raggiungeva i -15 kPa a 15-20 cm di profondità e nella gestione WMD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui il potenziale dell'acqua nel suolo raggiungeva i -30 kPa a 15-20 cm di profondità. Il singolo intervento irriguo è stato di 2.0 - 2.5 cm. Gli autori riportano un incremento medio dei raccolti di più del 10% per la gestione WMD rispetto alla CI e un decremento medio di più del 30% del raccolto per la gestione WSD rispetto alla CI. Viene registrata una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 28% per la gestione WMD rispetto alla CI ed una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 49% per la gestione WSD rispetto alla CI. La Water Productivity (kg m^{-3}) è aumentata del 55% per le gestioni WMD rispetto alla CI e del 36% e per la gestione WSD rispetto alla CI.

Belder et al. (2004). Le sperimentazioni sono state condotte presso Tuanlin (30° 52' N, 112° 11' E), Cina, nel 1999 e nel 2000 e presso il Philippine Rice Research Institute (PhilRice) (15° 40' N, 120° 54' E), Filippine, nel 2001. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). In entrambi i siti la tessitura dei suoli è franco argillo-limoso (*silty clay loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di tre gestioni irrigue e di quattro tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto tramite trapianto. Le gestioni irrigue testate sono: sommersione continua (CS) e alternat *Alternate Wetting and Drying* e wetting and drying (ASNS e ASNSv). Nelle gestioni "alternate" le irrigazioni sono state effettuate in condizione di assenza d'acqua sul campo per 3-5 giorni, riportando ad un'altezza massima di 100 mm l'altezza dell'acqua sul campo. Gli autori riportano dei valori di produzione simili per le gestioni CS e ASNS ed un risparmio idrico per le gestioni ASNS

rispetto alle CS del 6-14%, considerando la somma di irrigazioni e piogge cadute nella stagione, e del 15-18%, considerando le sole irrigazioni.

Cabangon et al. (2004). Le prove sono state condotte presso Jinhua (29° 5' N, 119° 47' E) e Tuanlin (30° 52' N, 112° 11' E), Cina, nel 1999 e nel 2000. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura dei suoli è franco limosa (*silty loam*) per Jinhua e franco argilloso limosa (*silty clay loam*) per Tuanlin. Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue e di quattro tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto tramite trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: continuous flooding (CF) e alternate wetting and drying (AWD). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate in condizione di assenza d'acqua sul campo per 3-5 giorni, riportando ad un'altezza massima di 100 mm l'altezza dell'acqua sul campo. Gli autori riportano produzioni per le gestioni AWD leggermente più basse rispetto alle CF e, considerando le sole irrigazioni, un massimo risparmio idrico a Jinhua ottenuto per le gestioni AWD rispetto alla CF di 92 mm (circa il 31% in meno), mentre a Taunlin di 76 mm (circa il 18% in meno) rispetto alla gestione CF.

Lampayan et al. (2014). La prova è stata condotta presso il Philippine Rice Research Institute (PhilRice) (15° 40' N, 120° 53' E) nel 2010. La zona climatica secondo la classificazione di Köppen-Geiger è l'Equatoriale (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è argillosa (*clay*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di quattro gestioni irrigue e di tre tipologie di trapianto del riso. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD15, AWD25 e AWD30). Nelle gestioni AWD le irrigazioni sono state effettuate sulla base del livello raggiunto dall'acqua rispetto al piano campagna all'interno dei *field water tube* installati: a -15 cm per la gestione AWD15, a -25 cm per la gestione AWD25 e a -30 cm per la gestione AWD30. Le irrigazioni nelle gestioni AWD sono state effettuate riportando l'acqua sul campo ad un'altezza massima di 5 cm. Gli autori riportano come la produzione sia rimasta simile tra le gestioni AWD e CF, con le prime che hanno portato ad una riduzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 42,8-48,0%, del 52,0-53,0% e del 53,6-53,7% (AWD15, AWD25 e AWD30, rispettivamente). La *Water Productivity* (kg m⁻³) è risultata significativamente più alta nelle gestioni AWD rispetto alla CF.

Cabangon et al. (2011). La prova è stata condotta presso l'*International Rice Research Institute* (IRRI) (14° 30' N, 121° 01' E), Filippine, nel 2004 e nel 2005. La zona climatica secondo la classificazione di Köppen-Geiger è l'Equatoriale (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo del sito è franco argillosa (*clay loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di tre gestioni irrigue e di cinque tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto tramite trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CF) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD-20, AWD-80, AWD-10 e AWD-50). Durante il 2004, nelle gestioni AWD-20 le irrigazioni sono state effettuate al raggiungimento di un potenziale dell'acqua nel suolo di -20 kPa misurato ad una profondità di 15 cm, mentre nelle gestioni AWD-80 le irrigazioni sono state effettuate al raggiungimento di un potenziale dell'acqua nel suolo (SWP) di -80 kPa misurato ad una profondità di 15 cm. Nel 2005, le gestioni AWD-20 ed AWD-80 sono

cambiate, rispettivamente, in AWD-10 (-10 kPa a -15 cm) ed AWD-50 (-50 kPa a -15 cm). Le irrigazioni nelle gestioni AWD sono state effettuate riportando l'acqua sul campo ad un'altezza massima di 3 cm. Gli autori riportano una riduzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 20% per le gestioni AWD-10, senza compromettere la produzione ed aumentando la *Water Productivity* (kg m^{-3}). L'incremento della soglia critica provoca un ulteriore risparmio in termini di risorsa idrica ma un'eccessiva perdita di produzione e, conseguentemente, nessun guadagno in termini *Water Productivity*.

Shaibu et al. (2014). La sperimentazione è stata effettuata presso il Domasi Irrigation Scheme (15° 21' S, 35° 30' E), Malawi, nel 2011. La zona climatica secondo la classificazione di Köppen-Geiger è l'Equatoriale (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è franco argilloso sabbiosa (*sandy clay loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di quattro gestioni irrigue e di due varietà di riso. L'impianto della coltura è avvenuto per trapianto. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CFI) e *Alternate Wetting and Drying* ("AWD1" – AWD fino a fioritura -, "AWD2" – AWD fino a inizio del riempimento granello - e "AWD3" – AWD per tutto il ciclo). Nelle gestioni AWD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui il contenuto d'acqua nel suolo tra i 10 ed i 20 cm di profondità raggiungeva il 20% della capacità di campo. Le irrigazioni nelle gestioni AWD sono state effettuate riportando l'acqua sul campo ad un'altezza massima di 5 cm. Gli autori riportano una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 32, del 40 e del 58% per le gestioni AWD1, AWD2 e AWD3, rispettivamente, nei confronti della CFI. Le gestioni AWD1 e AWD2 sono da preferirsi perché hanno registrato una riduzione complessiva della produzione rispetto alla CFI di meno del 5%.

Devkota (2011). La sperimentazione è stata condotta nel 2008 e nel 2009 presso il *Cotton Research Institute* (41°32'12" N, 60°40'44" E), Uzbekistan. La zona climatica secondo la classificazione di Köppen-Geiger è l'Arida (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è tra franco sabbiosa e sabbioso franca (*sandy loam / loamy sand*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue, di tre metodi di lavorazione ed impianto della coltura e di tre gestioni dei residui colturali. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (CT-FI) e *Alternate Wetting and Drying* (AWD). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate al raggiungimento di contenuto volumetrico d'acqua nel suolo misurato a 20 cm di profondità del 5-10% al di sotto della capacità di campo. L'autore ha riportato una perdita di produzione significativa delle gestioni AWD rispetto alle CT-FI che in media si è attestata attorno al 30% nel 2008 e al 56% nel 2009. Le gestioni AWD hanno fatto registrare una riduzione di utilizzo della risorsa idrica del 68-73% rispetto alle CT-F. La *Water Productivity* (g m^{-3}) delle gestioni AWD è stata sempre più alta che nelle gestioni CT-FI, tranne che in un singolo trattamento.

de Vries et al. (2010). Le prove sono state condotte nel 2005 e nel 2006 presso Ndiaye (16° 11' N, 16° 15' O) e Fanaye (16° 32' N, 15° 11' O), Senegal. La zona climatica secondo la classificazione di Köppen-Geiger è l'Arida (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). Per il suolo del sito di Ndiaye è indicata un percentuale di argilla del 40-45%, mentre per Fanaye del 45-65%. Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di quattro gestioni irrigue, tre tipologie di gestione delle infestanti e tre tipologie di fertilizzazione azotata. L'impianto della coltura è avvenuto per semina su terreno saturo. Le gestioni irrigue testate sono state: sommersione continua (I4) e *Alternate Wetting and Drying* (I1, I2, I3 e I4). Gli

autori hanno riportato una riduzione nell'utilizzo della risorsa idrica di circa il 28% in media per le gestioni "alternate" rispetto alla gestione I4, con una perdita di produzione di circa l'8% in media.

3.1.3 Efficienza di uso dell'azoto

Cao et al. (2020) hanno condotto un esperimento di campo di 2 anni (2017-2018) con tre regimi idrici: (1) sommersione continua, CF; (2) AWD a basso grado di severità (AWD *safe*); e (3) AWD ad elevato grado di severità (AWD *severe*), con quattro tassi di applicazione di N: 0 (N0), 90 (N1), 180 (N2) e 270 (N3) kg N/ha, per determinare gli effetti dei regimi idrici e della concimazione azotata su produzioni, *Water Productivity* totale (produttività totale dell'acqua + precipitazioni, WP_{i+r}) ed efficienza di recupero dell'azoto (NRE). I risultati hanno dimostrato che regime idrico, dose di N e la loro interazione mostrano effetti significativi sulla produzione, WP_{i+r} e NRE. La resa e WP_{i+r} sono aumentati in modo significativo da N0 a N2, con variazioni minime tra N2 e N3. La resa produttiva in AWD *safe* è risultata essere più alta rispetto ad AWD *severe*, mentre i loro valori WP_{i+r} hanno mostrato tendenze opposte. L'NRE di riso più alto si è verificato con la combinazione delle condizioni di N2 con CF e AWD *safe*, ed era significativamente superiore a quella in AWD *severe*. Gli autori hanno dimostrato che mantenere la quantità di acqua e dose di N rispettivamente a 11.000 m³/ha e 160 kg N/ha possa servire come strategia adeguata per ottenere i massimi benefici globali per la resa, WP_{i+r} e NRE. Il modello di ottimizzazione potrebbe risparmiare approssimativamente 17,0% di acqua in ingresso e 11,1% di N apportato, rispetto alla sommersione continua.

Chen et al. (2019) hanno combinato un esperimento di campo con uno *in-situ micro-zone test* impostando sei trattamenti: due regimi di irrigazione (irrigazione controllata e *flooded irrigation*) e tre tassi di N (85, 110 e 135 kg ha⁻¹). In questi trattamenti sono stati studiati il recupero e la perdita di fertilizzante azotato nel sistema riso-suolo, in particolare l'assorbimento da parte della pianta ed il tasso residuo di urea nel suolo. Il tasso di recupero totale dell'N nella pianta del riso è stato del 32,05-38,83%, il recupero il tasso del fertilizzante in pre-semina era dell'11,78–16,44%. L'utilizzo dell'irrigazione controllata si è rivelato efficace nel ridurre le perdite di fertilizzanti azotati e aumentare l'accumulo di sostanza secca delle piante, che è risultato essere del 13,27–27,52% in più rispetto al regime convenzionale di irrigazione. Il regime di irrigazione controllata non solo soddisfa i requisiti attuali per la resa in granella, ma svolge anche un ruolo nel risparmio idrico, aumenta la produzione e riduce l'inquinamento ambientale.

Hameed et al. (2019). Nel presente studio è stato utilizzato un modello di simulazione della crescita del riso utilizzando dati storici negli ultimi 45 anni per valutare il modello in condizioni di sommersione continua (CF) e regimi AWD con differenti percentuali di fertilizzante azotato. Il modello ha simulato in modo soddisfacente la biomassa delle colture e l'assorbimento di N in entrambi i regimi irrigui. La risposta delle curve N è risultata diversa per i due regimi irrigui. Senza alcuna concimazione, la pendenza per l'efficienza agronomica (AE) è apparsa alta, mentre è diminuita con l'aumento degli apporti di N. Con uno split nell'applicazione basale di N, è stata riscontrata una più bassa resa con elevate efficienze fisiologiche (PE), più bassi recuperi di fertilizzanti (RE) e un'inferiore efficienza agronomica (AE). La *Water Productivity* (irrigazione + precipitazioni) WP_{i+r} utilizzando 150 kg N/ha è

risultata pari a 1,19 kg/m³ per AWD e 0,82 kg/m³ per CF, mentre con l'apporto di 225 kg N/ha WP_{I+R} è stata pari a 1,50 kg/m³ per AWD e 1,14 kg/m³ per CF. In generale, l'AWD ha mostrato un WP_{I+R} elevato senza penalizzare la resa rispetto a CF.

De Borja Reis et al. (2018). Un esperimento di campo della durata di tre anni è stato condotto in Brasile su suoli molti evoluti (Plinthaquults) per studiare le prestazioni delle colture, la *Water Productivity* in ingresso (WP_{in}) e il recupero di N in cinque regimi di irrigazione: sommersione continua (CF); AWD con ciclo breve (AWDS); AWD con ciclo lungo (AWDL); suolo saturo senza acqua stagnante (SS); e aerobico (AR). Gli eventi di asciutta in AWDS si sono verificati più frequentemente che in AWDL. Il disegno sperimentale prevedeva regimi di irrigazione nel lotto principale e dosi di concimazione N di 0 o 150 kg N/ha. Sono state create micro-parcelle fertilizzate con ¹⁵N per seguire il destino del fertilizzante azotato. Nei trattamenti 150N e 0N, con regime di irrigazione AR, le produzioni sono state le più elevate con una media di 9,1 e 6,5 t/ha, rispettivamente. Le rese produttive negli altri regimi di irrigazione sono variate di anno in anno, ma la media è risultata essere 8,5 e 5,4 t/ha rispettivamente nei trattamenti 150N e 0N. Le produzioni più elevate sono state attribuite ad un maggiore assorbimento di N e un maggiore recupero di N nel trattamento AR. Il recupero apparente di N è stato in media del 58% nel trattamento AR rispetto al 34% negli altri trattamenti. Allo stesso modo, il recupero totale (pianta e suolo) di ¹⁵N nel trattamento AR è stato dell'82%, rispetto al 62, 61, 56, 56% rispettivamente in SS, AWDS, AWDL, CF. Un recupero di N maggiore nell'AR è stato probabilmente il risultato di minori perdite di N. Gli input di irrigazione variavano da 15 mm in AR a 1337 mm nel trattamento CF. È stato osservato un WP_{in} (kg/m³) in media di 0,8, 0,5, 0,4, 0,5 e 0,4 rispettivamente in AR, SS, CF, AWDS, AWDL e CF. Quindi, in questo ambiente, la produttività del riso, la *Water Productivity* e l'efficienza d'uso dell'N sono stati tutti migliorati nei sistemi aerobici rispetto alle sommersioni continue o a qualsiasi regime di irrigazione alternativo.

Wang et al. (2018) hanno studiato due cultivar di riso, nel 2015 e nel 2016, coltivate in suolo con aggiunta di paglia di frumento. Sono stati adottati tre regimi di irrigazione: sommersione continua (CF), AWD e irrigazione del solco (FI). Rispetto al CF, sia AWD che FI hanno aumentato significativamente la resa di granella, WP e NUE, con maggiori aumenti in regime FI. Sia AWD che FI hanno aumentato notevolmente il potenziale redox del suolo e la NUE, con una diminuzione del potenziale di riscaldamento globale a causa di un sostanziale riduzione delle emissioni stagionali di CH₄. Entrambi AWD e FI hanno aumentato significativamente l'efficienza di uso dell'N rispetto a CF. Potenziali idrici di circa -15 kPa in AWD e -5 kPa in FI potrebbero essere utilizzati per la soglia per la reidratazione.

Liang et al. (2017) hanno condotto esperimenti di campo per esaminare la resa produttiva, il *Nutrient Use Efficiency*, le emissioni di gas serra, le perdite di N valutando differenti scenari di fertilizzazione azotata e di gestione dell'acqua. Hanno condotto quattro trattamenti: zero N con gestione dell'acqua convenzionale (N0), N tipicamente distribuito dagli agricoltori e gestione dell'acqua convenzionale (FP), gestione ottimizzata di N con gestione dell'acqua convenzionale (OPTN) e gestione ottimizzata di N con irrigazione alternata con bagnature e asciutte (OPTN + AWD). La resa produttiva nei trattamenti OPTN e OPTN + AWD è aumentata del 13,0–17,3% rispetto a FP. La volatilizzazione dell'ammoniaca (AV) è stata la via principale per la perdita di N in tutti i trattamenti rappresentando oltre il 50% delle perdite

totali. Le perdite di N si sono verificate principalmente prima della lavorazione intermedia. Perdite di N per AV, lisciviazione e deflusso superficiale in OPTN sono stati ridotti del 18,9–51,6% rispetto a FP. OPTN + AWD perdite di N ulteriormente ridotte dal deflusso superficiale e lisciviazione del 39,1% e del 6,2% all'inizio della stagione colturale e del 46,7% e del 23,5% nella tarda stagione, rispettivamente, rispetto con OPTN. Le emissioni di CH₄ in OPTN + AWD sono risultate inferiori del 20,4–45,4% rispetto a OPTN e FP. Il confronto in azienda ha confermato che le perdite di N per deflusso in OPTN + AWD è stata ridotta di oltre il 40% rispetto al FP. I trattamenti OPTN e OPTN + AWD hanno portato ad un aumento significativo della resa in granella del 6,7–13,9%.

Pan et al. (2017). Il confronto tra AWD-safe (AWD15) e sommersione continua (FP) intervallata da un'asciutta intermedia non ha evidenziato differenze significative per quanto riguarda l'efficienza d'uso dell'azoto. In entrambi gli anni di sperimentazione, l'assorbimento di N totale è aumentato in modo significativo con l'incremento della dose di N. In generale, il *N use efficiency* (PE), l'*Apparent Recovery Efficiency* (ARE), l'*Agronomic N Use Efficiency* (AE), e il *Partial Factor Productivity* dell'N applicato (PFP) sono diminuiti in entrambi gli anni all'aumentare del tasso di applicazione di N. Non sono state osservate differenze significative tra AWD15 e FP in entrambi gli anni in tutti gli altri parametri per l'assorbimento di N totale e N efficienze di utilizzo (PE, ARE, AE e PFP).

Ahmed et al. (2016). Il fabbisogno di fertilizzante azotato del riso seminato in asciutta (DSR) coltivato con gestione dell'acqua AWD può differire da quello del tradizionale riso trapiantato (PTR) coltivato in condizioni di sommersione continua. Gli effetti del cambiamento del metodo di insediamento colturale e della gestione dell'acqua sul fabbisogno di fertilizzanti azotati possono anche variare tra le colture coltivate nelle stagioni secche e piovose. Pertanto, sono stati condotti esperimenti di campo per due anni in entrambe le stagioni, secca e umida in Bangladesh. Quattro concentrazioni di N sono state utilizzate nella stagione secca (0, 100, 140 e 180 kg/ha) e umida (0, 80, 120 e 160 kg/ha) e cinque quantità di seme (20, 40, 60, 80 e 100 kg/ha). La resa produttiva massima di tutte le colture è stata raggiunta al tasso di N più elevato con un tasso di semina di almeno 40-60 kg/ha suggerendo che DSR ha un fabbisogno d'azoto più elevato rispetto al tasso raccomandato per PTR. L'efficienza di uso di N agronomico (15-20 kg di risone/kg) e il recupero apparente di N (35-40%) sono paragonabili ai valori riportati in Asia per PTR, indicando la necessità di metodi per migliorare l'efficienza di utilizzo dei fertilizzanti DSR.

Wang et al. (2016). Questo studio ha esaminato se e come i regimi di irrigazione possano interagire sinergicamente con le dosi di N per aumentare la resa in granella, l'efficienza dell'uso dell'acqua (WUE) e l'efficienza dell'uso dell'N (NUE) nel riso. Un esperimento di campo è stato condotto con tre dosi di N, 100 (quantità bassa, LN), 200 (quantità normale, NN) e 300 kg/ha (quantità elevata, HN) e tre regimi di irrigazione, sommersione alternata e asciutta moderata (AWMD), sommersione alternata e asciutta severa (AWSD) e sommersione continua (CF). Tra le tesi di N, sia la resa in granella che la WUE si sono dimostrate le più basse per LN in tutti i regimi di irrigazione, e le più alte per NN nel regime CF e per HN nel regime AWSD, senza differenze significative tra NN e HN nel regime AWMD. L'efficienza d'uso dell'N o la produttività del fattore parziale N (PFPN) sono diminuiti con l'aumento delle dosi di N. Per lo stesso apporto di N minerale, il regime AWMD ha mostrato la più alta resa, WUE e PFPN. Coltivazioni improduttive ridotte, crescita delle radici

migliorata e *Harvest Index* aumentato hanno contribuito a una maggiore resa in granella e una maggiore efficienza nell'uso delle risorse nel regime AWMD, specialmente in NN. I risultati indicano che l'adozione di un regime AWMD con una dose di N appropriato può garantire rese, WUE e NUE più elevati, e un aumento dell'apporto di N può ridurre la perdita di resa in un regime AWSD.

3.1.4 Emissioni di gas ad effetto serra

Liao et al. (2020). La misura dei flussi di CH₄ ha mostrato come sotto AWD non abbia indotto grandi variazioni nell'arco della stagione irrigua mantenendo la quantità di CH₄ emesso mantenuto su valori prossimi a 0 kg CH₄/ha. L'adozione di un AWD di media severità ha portato a una riduzione delle emissioni di CH₄ pari all'87,1% rispetto alle camere in sommersione continua. Inoltre, il quantitativo di azoto distribuito ha determinato una differente emissione di CH₄: le emissioni nelle parcelle concimate con 180 kg N/ha sono incrementate del 40-70% rispetto a una concimazione di 90 kgN/ha. Per quanto riguarda il N₂O, è stato osservato che nell'AWD sono aumentate le emissioni di 2,6 volte rispetto a CF, specialmente nel periodo che succede alle concimazioni azotate: il picco rilevato a seguito della concimazione in fase vegetativa è stato di 5,6 volte quello in CF. In generale, le emissioni di N₂O derivanti da un campo gestito ad AWD sono incrementate di 2,8 volte rispetto al testimone gestito in sommersione continua. Il *Global Warming Potential* (GWP) ha indicato che l'AWD ha avuto un effetto complessivo di mitigazione delle emissioni, nonostante sia incrementata l'emissione di N₂O.

Faiz-ul Islam et al. (2020). Questo studio ha testato l'effetto dell'AWD precoce (e-AWD) rispetto alle pratiche di gestione dell'acqua che prevedono sommersioni continue (CF) sulla resa in granella, le emissioni di gas serra e la concentrazione di As nella granella in un esperimento di campo randomizzato con l'utilizzo di fertilizzanti organici in regime biologico. I trattamenti hanno previsto l'utilizzo di: i) letame ii) compost e iii) digestato da biogas, da solo o in combinazione con fertilizzante minerale. La resa è aumentata del 5-16% nei trattamenti combinati. La biomassa e la lunghezza delle radici sono aumentate nei trattamenti e-AWD del 72 e al 41% rispettivamente. Il regime idrico e-AWD ha ridotto le emissioni stagionali di CH₄ del 71-85% per trattamenti biologici e del 51-76% per i trattamenti combinati; questo è stato collegato a una riduzione del 15-47% in DOC, riducendo così la metanogenesi. Le emissioni di N₂O sono invece aumentate del 23-305%, rappresentando <20% del potenziale di riscaldamento globale (GWP). Il regime e-AWD ha alterato i potenziali redox del suolo, con conseguente riduzione dell'As nella granella e delle concentrazioni di Pb fino al 66% e al 73% rispettivamente. Anche i livelli di Cd nella granella sono stati ridotti fino al 33% nel biologico. La modellazione dell'equazione strutturale ha mostrato che DOC, redox, ammonio e biomassa delle radici rappresentano i punti chiave che regolano le emissioni, mantenendo la resa. Questi risultati suggeriscono che nei sistemi di coltivazione che ricevono ammendanti organici in gestione biologica, il regime idrico e-AWD può avere molteplici effetti ambientali e sostenere obiettivi di sicurezza alimentare senza comprometterne la resa.

Malumpong et al. (2020). In questo studio condotto in Thailandia, i trattamenti AWD sono stati applicati a 10 cm di profondità, permettendo ai livelli di acqua di diminuire sotto una

profondità di -10, -15 e -20 cm (10/-10, 10/-15, e 10/-20) e CF sono stati studiati in sette stazioni di ricerca nelle stagioni secche del 2014 e 2015. I risultati hanno mostrato che la tecnica AWD ha ridotto le rese in granella rispetto a quelle di CF. Inoltre, le emissioni totali di CH₄ nei trattamenti AWD sono apparse inferiori rispetto a quelle in CF, ma la percentuale di riduzione di CH₄ nei trattamenti AWD è risultata diversa nelle sette stazioni. Le emissioni di N₂O non sono apparse significativamente differenti per i trattamenti CF e AWD. La tecnica AWD10/-10 è stata consigliata nei sistemi di trasmissione del riso in Thailandia

Jiang et al. (2019) hanno recentemente svolto una meta-analisi usando 201 osservazioni da 52 studi per analizzare gli effetti di pratiche di gestione dell'acqua sulle emissioni di gas serra. Una valutazione globale ha evidenziato che la tecnica AWD, rispetto alla sommersione continua, riduce del 53% le emissioni di CH₄, aumenta le emissioni di N₂O del 105%, riducendo la resa produttiva del 3,6%. Tuttavia, le emissioni di N₂O rappresentano solo il 12% del *Global Warming Potential* (GWP). La sommersione continua ha ridotto sia il GWP (-44%) sia lo *yield-scaled GWP* (-42%). Inoltre, le pratiche di sommersione continua hanno stimolato le emissioni di N₂O in modo particolare in suoli molto ricchi in SOC o fertilizzati con letame. La riduzione delle emissioni di CH₄ è aumentata in relazione al numero di asciutte, della loro severità delle asciutte e del numero di giorni di asciutta.

Hoang et al. (2019). Questo studio ha valutato gli effetti dell'utilizzo della paglia di riso e dei regimi idrici sulle emissioni di CH₄ e N₂O in risaia in due stagioni di coltivazione (estate 2014 e primavera 2015). Sono stati valutati i seguenti regimi idrici: AWD mantenuto a tre livelli (-5 cm, -10 cm e -15 cm) rispetto a CF. La paglia (5 t/ha) è stata incorporata nel terreno superficiale (0-15 cm), distribuita e bruciata *in situ*. I risultati hanno mostrato che, usando paglia di riso bruciata *in situ*, viene ridotta l'emissione cumulativa stagionale di CH₄ (24-34% in estate; 18-28% in primavera), le emissioni di N₂O (21-32% in estate; 22-29% in primavera), ottenendo una produzione inferiore (8-9%) rispetto all'incorporazione della paglia nel topsoil. I metodi AWD hanno ridotto la quantità di produzione di CH₄ (22,6-41,5%) e aumentato le emissioni di N₂O (25-26%) senza alcuna diminuzione in resa. L'incorporazione della paglia di riso nel *topsoil* con AWD è stata caratterizzata da una maggiore produttività dell'acqua (23-37%) rispetto alla paglia di riso bruciata in situ in regime di CF. I risultati concludono che la gestione dell'AWD e della paglia può essere impiegata come strategia di mitigazione per le emissioni di CH₄ e N₂O nelle risaie del Vietnam centrale.

Samoy-Pascual et al. (2019). La combinazione di una condizione di terreno umido pre-stagione e l'incorporazione di paglia di riso appena prima del trapianto, che è tipica di un doppio raccolto di riso tropicale, può indurre un picco di emissione di CH₄ subito dopo il trapianto. La tradizionale gestione AWD, che inizia 21 giorni dopo il trapianto (DAT) difficilmente può ridurre questa emissione perché il terreno risulta fortemente riducente prima dell'inizio del trattamento AWD. Esperimenti di campo sono stati condotti nel Luzon centrale, Filippine, durante le stagioni colturali 2014-2017 per esaminare gli effetti dei tempi di incorporazione di paglia di riso/stoppie sull'efficacia dell'AWD nel ridurre l'emissione di CH₄. Due diversi trattamenti sulla tempistica dell'incorporazione delle stoppie hanno previsto l'incorporazione delle stoppie durante l'inizio della preparazione del terreno umido (S1) e durante la lavorazione a maggese a secco (S2). Per la gestione dell'acqua sono stati confrontati due trattamenti: sommersione continua (CF) e AWD con soglia di -15 cm per

l'irrigazione. L'AWD in S2 è stato implementato in precedenza a 10 DAT. Gli autori hanno osservato una significativa interazione tra gli effetti della AWD e della gestione della paglia sulle emissioni di CH₄; l'emissione totale stagionale di CH₄ è stata ridotta in AWD rispetto a CF del 73% sotto S2, mentre la riduzione è risultata essere <20% in S1. L'AWD ha aumentato significativamente le emissioni di N₂O del 47 e del 48% rispetto a CF in S1 e S2, rispettivamente. Il potenziale di riscaldamento globale (GWP, CH₄ + N₂O) e lo *yield-scaled* erano ancora sostanzialmente inferiori del 62 e 59%, rispettivamente, in AWD rispetto a CF in S2, ma la riduzione non si è verificata in S1 a causa della riduzione di CH₄ accompagnata da una maggiore emissione di N₂O. I risultati confermano che la decomposizione delle stoppie aerobiche pre-stagionali e l'implementazione precoce dell'AWD hanno migliorato il potenziale di mitigazione dell'AWD riducendo sostanzialmente l'emissione di CH₄.

Dong et al. (2018) hanno condotto un esperimento di campo di due anni per studiare gli impatti di regime idrico e della fertilizzazione azotata sui raccolti di riso e sulle emissioni di gas serra ad Harbin, in Cina. I risultati hanno mostrato che l'irrigazione intermittente ha significativamente diminuito le emissioni di CH₄ rispetto alle sommersioni continue. Tuttavia, il decremento è stato di gran lunga inferiore al livello medio globale. I trattamenti con fertilizzanti a bassa dose (75 kg N/ha) hanno aumentato le emissioni di CH₄. Le emissioni di CH₄ e di N₂O non hanno mostrato differenze tra livelli di 150 kg N/ha e 225 kg N/ha. La resa è aumentata con l'irrigazione intermittente ed è stata massima al livello di 150 kg N/ha. Gli autori hanno dimostrato che l'irrigazione intermittente accoppiata a livelli di fertilizzazione azotata pari a 150 kg N/ha rappresentano l'ideale regime di irrigazione/fertilizzazione per quest'area per ottenere basse emissioni di gas serra senza influire sulla produzione. Questo studio ha dimostrato che l'irrigazione intermittente potrebbe essere efficace nel diminuire le emissioni di CH₄ dalla risaia, tuttavia, il decremento (1,6% –10,8%) è stato di gran lunga inferiore alla media globale livello (49,5%).

Sibayan et al. (2018). Per indagare la fattibilità dell'AWD in termini di mitigazione delle emissioni di GHG sia nella stagione secca (DS) che nella stagione umida (WS), esperimenti triennali di campo sono stati condotti a Luzon Centrale, Filippine. Tre trattamenti di gestione dell'acqua hanno previsto: sommersioni continue (CF), sommersione quando il livello dell'acqua superficiale scende naturalmente a 15 cm al di sotto della superficie del suolo (AWD) e AWD *site-specific* (AWDS). In accordo con i risultati precedenti, l'emissione totale stagionale di CH₄ è risultata significativamente maggiore in WS che in DS. L'effetto del trattamento è stato significativo, ma il tasso di riduzione con AWD rispetto a CF è stato solo dell'1,7% rispetto a CF. L'emissione stagionale di N₂O è stata significativamente influenzata dal trattamento. L'AWD ha aumentato le emissioni di N₂O del 97%, soprattutto in DS. Il risultante GWP non differiva in modo significativo tra i tre trattamenti. I risultati hanno indicato che AWD e AWDS sono stati insufficienti per ridurre le emissioni annuali di GHG. Una precedente incorporazione di residui mantenendo il suolo asciutto nella precedente stagione di maggese potrebbe essere efficace nel ridurre le emissioni di CH₄ in combinazione con un'implementazione precedente di AWD. Questo studio ha rilevato che l'implementazione di AWD è fattibile nella DS, mentre il concetto originale di AWD non si applica nella WS. Condizioni riducenti del suolo sono sfavorevoli per una sana crescita del riso così come la produzione microbica di CH₄, il drenaggio superficiale potrebbe essere una opzione plausibile in WS.

Wang et al. (2018) hanno mostrato che la tecnica AWD, rispetto alla sommersione continua, riduce le emissioni di CH₄ della varietà HD-5 da 534 kg CH₄-C/ha a 193 kg CH₄-C/ha, una riduzione pari al 74%. Sia le gestioni AWD e *furrow irrigation* (FI) hanno ridotto significativamente le emissioni di CH₄ (rispettivamente -64% e -78%), ma incrementato al tempo stesso significativamente le emissioni di N₂O (rispettivamente +208% e 300%). Rispetto a quello dei regimi CF, il GWP è diminuito in media del 62,3% nel AWD e del 74,9% nel regime FI.

Liang et al. (2016). Lo studio ha riportato che le emissioni di CH₄ hanno subito una netta contrazione confrontando l'AWD15 (63 kg CH₄ /ha) e l'AWD30 (63,5 kg CH₄ /ha) rispetto alla tesi di controllo gestita in sommersione continua (153,5 kg CH₄ /ha). I diversi livelli di severità dell'AWD non hanno influito sulle emissioni di CH₄. L'entità della riduzione è dipesa dalla varietà in quanto per la var. YT3618 è stata riscontrata una riduzione delle emissioni rispetto a CF del 57,1% in AWD15 e del 84,3% in AWD30, mentre per la var. HFZ le emissioni rispetto a CF si sono ridotte del 68,6% per AWD15 e del 77,5% per AWD30.

3.2 Alternate Wetting and Drying nelle aree temperate

Le gestioni AWD nelle aree temperate hanno la necessità di essere testate per verificare l'effetto sulle rese produttive, sull'efficienza d'uso dell'acqua (WUE, *Water Use Efficiency*), sulle emissioni di CH₄ e N₂O sull'efficienza della fertilizzazione azotata (NUE, *Nutrient Use Efficiency*). In questa sezione verranno esaminati in dettaglio le metodiche seguite dagli autori per l'implementazione delle tecniche AWD in aree temperate e i principali risultati conseguiti dagli stessi.

3.2.1 Aspetti agronomici, di qualità della granello e di influenza varietale

Carijo et al. (2017). Lo studio ha condotto una meta-analisi con i seguenti obiettivi: (i) quantificare l'effetto dell'AWD sulle produzioni di riso e i consumi di acqua a confronto con la sommersione continua; (ii) identificare le caratteristiche del suolo e le pratiche gestionali più favorevoli all'implementazione dell'AWD. Gli autori hanno specificato che le soglie di ri-sommersione sono state misurate in differenti modi: contenuto idrico volumetrico, contenuto idrico gravimetrico, giorni dopo i quali l'acqua sul campo scompariva (*ponded water*), il potenziale idrico del suolo vicino all'apparato radicale (SWP), il livello dell'acqua in campo (SWL). Dato che la misura del potenziale idrico e del livello dell'acqua in campo sono stati i parametri più frequentemente utilizzati, gli autori hanno categorizzato le AWD in:

- AWD severa: SWP nella zona radicale al di sotto dei -20 kPa;
- AWD media: SWP nella zona radicale mai al di sotto dei -20 kPa o FWL sempre al di sopra dei 15 cm dalla superficie del suolo, detta anche "Safe AWD".

Più dell'80% degli studi analizzati sono stati di origine asiatica e il 31% dalla Cina. La maggior parte degli studi ha usato il trapianto ricorrendo a varietà naturali e ha condotto AWD durante tutta la stagione. In generale, le gestioni AWD hanno portato ad una diminuzione della resa produttiva pari al 5,4% e dell'uso dell'acqua pari al 25,7%, rispetto

alla sommersione continua. Con riferimento alla soglia di ri-sommersione, non ci sono state riduzioni di resa con l'AWD quando il livello dell'acqua è stato mantenuto > -15 cm o il SWP ≥ -20 kPa. Tuttavia, quando la soglia è stata più severa, SWP < -20 kPa, la resa ha subito una riduzione del 22,6%. La modalità di semina (trapianto o semina diretta), il numero di asciutte condotte ($>$ o ≤ 5) e il tipo di varietà (ibrido o in bred) non hanno influenzato i rendimenti relativi di AWD. Con riferimento alle caratteristiche dei suoli, le gestioni AWD hanno conseguito migliori risultati se eseguiti in suoli con pH < 7 , con SOC $> 1\%$. L'influenza del pH potrebbe essere dovuta al fatto che i suoli alcalini hanno una percentuale di sodio scambiabile maggiore che causa la dispersione delle particelle di terreno e la formazione di strati impermeabili. Infine, suoli alcalini possono provocare maggiori perdite per la volatilizzazione della ammoniaca, prevalente in condizioni di non sommersione, determinando quindi una minore disponibilità di azoto per le piante.

Chlapecka et al. (2020). Tra le numerose strategie sostenibili e innovative, volte all'ottimizzazione della gestione dell'acqua, nel presente studio biennale (2018-2019) condotto in Arkansas, è stato investigato l'AWD. Nei due siti dell'Arkansas, Pine Tree Research Station (PTRS) e Northeast Research and Extension Center (NEREC), è stato confrontato l'AWD a diverse severità (AWD15, AWD30 e AWD45) con la tecnica della sommersione continua (CF). Tra i numerosi parametri considerati, sono state analizzate le produzioni e la resa della granella. Nel sito PTRS le rese produttive e il peso dei 1000 semi non hanno presentato differenze statistiche tra le varie gestioni irrigue. Sono state evidenziate differenze significative a favore dell'AWD45 per quanto riguarda la resa dei grani interi. Al contrario, in NEREC le produzioni hanno mostrato una differenza significativa tra AWD15 e AWD30 rispetto ad AWD45 e CF. In questo sito sperimentale la resa grani interi è apparsa statisticamente significativa nelle tesi AWD15 e AWD30.

Graham Acquah et al. (2019). Sono stati analizzati 12 campi di 16 ha in un comprensorio risicolo di Burdette, Arkansas (USA), con campi contigui caratterizzati da suoli sabbioso-limosi e con una unica cultivar analizzata, XL 753. Sono state poste a confronto due modalità di gestione dell'acqua, la sommersione continua (CF) e l'AWD, in entrambi i casi con riso seminato a file. L'obiettivo dello studio è valutare come CF e AWD influiscano sulla qualità della granella. Le prove sono state valutate a umidità della granella costante (14%). Dallo studio è emerso che la strategia di gestione dell'acqua abbia prodotto un effetto sulla gessosità: la gestione in AWD ha aumentato la gessosità in quanto è incrementata l'evapotraspirazione della coltura diminuendo quindi la temperatura della pannocchia. A differenza della gessosità, la resa totale e la resa dei grani interi non sono state statisticamente influenzate dalla gestione dell'acqua.

Frizzell et al. (2018). Nel 2018 sono state condotte prove su appezzamenti con terreno limo-argilloso presso l'*University of Arkansas System Division of Agriculture's Rice Research and Extension Center* per valutare le pratiche di gestione dell'acqua del riso coltivato in AWD. Sono stati messi a confronto 3 regimi di AWD differenti (AWD15, AWD30, AWD45) e confrontati con la tecnica tradizionale della sommersione continua (CF): il riso è stato seminato a file in condizioni di terreno asciutto. Nei momenti in cui la tensione matriciale raggiungeva 15, 30 o 45 kPa, a seconda dell'AWD considerato, si interveniva con l'irrigazione. La prova ha previsto l'impiego di 4 varietà differenti, RT Gemini 214 CL, CL153, RT XP753 e Diamond. L'AWD15 ha restituito produzioni significativamente più elevate

rispetto ai trattamenti AWD30 e CF. Tuttavia, il trattamento CF ha portato rese alla lavorazione dei grani interi più elevate rispetto a AWD15 e AWD30.

Humphreys et al. (2018). L'obiettivo dello studio è stato quello di valutare l'effetto della gestione idrica (full season flood vs. mid-season drain) e della varietà (convenzionale vs. ibrido) sull'emissione di metano in una risaia caratterizzata da terreno franco limoso impiegando la tecnica della semina interrata. Lo studio è stato svolto nel 2015 presso l'Università della Arkansas, l'area di studio è stata gestita con rotazione soia-riso. Né la biomassa aerea secca né le rese produttive hanno mostrato differenze tra i due sistemi idrici e tra le varietà considerate. La biomassa aerea secca è variata da 27,8 t/ha in full-season flood/hybrid treatment a 37,8 t/ha in full-season flood/pure-line treatment. Allo stesso modo le produzioni sono variate da 10 t/ha per le mid-season-drain/pure-line a 12,6 t/ha full-season-flood/hybrid.

Runkle (2017). In una prova sperimentale condotta in un'azienda risicola dell'Arkansas, sono state messe a confronto la tecnica tradizionale del riso seminato in asciutta seguito da una sommersione continua (CF) con l'AWD. La varietà CLXL 745 è stata impiegata su un suolo lavorato argilloso e poco drenante. L'obiettivo dello studio è stato valutare l'impatto della gestione irrigua sulla produzione e sull'emissione di metano. Nonostante l'AWD impiegato sia stato piuttosto severo, sotto l'aspetto produttivo non sono state individuate differenze significative.

Linguist et al. (2015) hanno svolto una sperimentazione in Arkansas in cui hanno confrontato 3 gestioni idriche AWD con la sommersione continua adottando la tecnica della semina interrata. È stata analizzata anche l'incidenza della soia messa in rotazione con il riso. Le gestioni AWD sono state modulate in base al contenuto volumetrico del suolo misurato a 5 cm di profondità e una volta oltrepassata la soglia, è stato riportato il livello della camera a 10 cm. Le tecniche di gestione dell'acqua indagate sono state:

- Sommersione continua (contenuto d'acqua volumetrico del suolo a saturazione $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$);
- AWD/40F, risommersione al 40% del contenuto d'acqua volumetrico a saturazione in cui nello stadio riproduttivo il campo è stato mantenuto sommerso;
- AWD/60, risommersione al 60% del contenuto d'acqua volumetrico a saturazione ($0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$);
- AWD/40, risommersione al 40% del contenuto d'acqua volumetrico a saturazione ($0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

In generale, i risultati produttivi hanno mostrato una resa simile al controllo delle gestioni AWD/40F, AWD/60. Incrementando lo stress idrico, si è ridotta la produzione; infatti, il trattamento AWD/40 ha determinato una contrazione del 13%. I livelli di arsenico più elevati sono stati riscontrati nelle gestioni in sommersione continua e in AWD40/F. Le condizioni di sommersione, infatti, portano alla riduzione dell'arsenato ad arsenito, quest'ultimo più fitodisponibile e assorbibile dal riso. In media, la concentrazione di arsenico totale è stata inferiore del 56% nelle gestioni AWD/60 e AWD/40, rispetto alla sommersione continua. I livelli di arsenico in granella sono risultati in media del 20% più alti nella rotazione riso-riso rispetto a quella riso-soia. I motivi di questo incremento potrebbero essere dovuti a una

maggiore quantità di residui incorporati nel suolo e con maggiore concentrazione di As rispetto ai residui di soia. Tale aggiunta di sostanza organica potrebbe incrementare l'attività microbica, il rilascio di arsenico nella soluzione circolante e il suo conseguente assorbimento da parte della pianta di riso.

Carijo et al. (2019) hanno condotto uno studio annuale in California per valutare l'influenza della severità e del timing delle pratiche AWD sull'accumulo di arsenico nella granella. Gli autori hanno indagato 10 trattamenti di irrigazione ricorrendo alla tecnica della semina in acqua: sommersione continua (CF, controllo) e 9 trattamenti nei quali è stato pianificato un singolo periodo di drenaggio e che ha rappresentato la combinazione di 3 timing (differenziazione pannocchia, botticella e 50% spigatura) e 3 severità delle asciutte:

- AWD leggero, sommersione a -15 cm;
- AWD medio, sommersione quando il contenuto idrico volumetrico a 0-15 cm aveva raggiunto il 35%;
- AWD severo, sommersione 4 giorni dopo la severità media.

L'umidità del suolo a 0-15 cm è stata monitorata per mezzo del contenuto volumetrico del suolo (VWC) e del potenziale idrico (WP). Inoltre è stato misurato il livello di acqua nel campo. Nel riso bianco, i trattamenti con severità basse hanno determinato concentrazioni di arsenico simili alla sommersione continua. Nei trattamenti a severità media e alta, indipendentemente del timing, la concentrazione di arsenico è diminuita del 42-61% rispetto al controllo. Delle quattro specie di arsenico, solo As^{3+} e DMA sono state rilevate nel riso bianco. Nel riso semigreggio il trattamento a bassa severità ha determinato concentrazioni di arsenico totale simili alla sommersione continua. La concentrazione di arsenico è diminuita nei trattamenti a severità media e alta, anche se è stato individuato un legame con il timing del periodo di drenaggio. Periodi di drenaggio con severità alte alla botticella hanno ridotto l'arsenico totale del 59%, mentre asciutte dei suoli a severità media alla differenziazione pannocchia o spigatura hanno ridotto l'arsenico totale del 41-42%. I risultati hanno mostrato come la severità del drenaggio influenzi l'accumulo dell'arsenico nella granella. Il safe-AWD non ha determinato effetti sulla concentrazione di arsenico totale o sulla speciazione, indipendentemente dal timing.

Tanner et al. (2018), in uno studio di 4 anni condotto in California, hanno valutato l'effetto dell'adozione di pratiche AWD sulla dinamica del mercurio in risaia, ottenendo anche dati di resa produttiva. Il riso è stato seminato su terreno bagnato sommerso subito dopo la semina. La CF è stata confrontata con una gestione AWD in cui la risommersione è avvenuta al raggiungimento del 35% del contenuto idrico volumetrico (AWD-35). In tutti e quattro gli anni, la produzione in AWD35 non è stata significativamente differente da quella ottenuta dalla sommersione continua.

Carijo et al. (2018) hanno condotto uno studio biennale di campo in California con l'obiettivo di definire una gamma di trattamenti diversi per severità della AWD per quantificare gli impatti sulla produzione e sue componenti, l'idrologia del suolo per tutta la profondità delle radici e la concentrazione di arsenico in granella. I campi sperimentali sono stati seminati a spaglio su suolo asciutto. Nel 2015, due trattamenti AWD (AWD35 e AWD25) sono stati confrontati con la sommersione continua (CF). Nel 2016, è stato

aggiunto un trattamento addizionale “AWD safe”. I campi sono stati seminati in condizione di terreno asciutto, ma la sommersione è avvenuta due giorni dopo la semina. Nei trattamenti AWD, due periodi di interruzione della irrigazione sono stati imposti e la ri-sommersione è avvenuta quando l’umidità del suolo a 0-15 cm di profondità ha raggiunto il 35% e il 25% del contenuto di acqua volumetrico, rispettivamente nella AWD35 e in quella AWD25. Nell’AWD safe, il campo è stato ri-sommerso quando il livello dell’acqua ha raggiunto i 15 cm al di sotto del livello del suolo. Il primo periodo di asciutta è iniziato in tutti i trattamenti AWD quando la copertura del suolo aveva raggiunto il 60% (in media 45 giorni dopo la semina). Le gestioni idriche AWD non hanno influenzato la resa produttiva e le sue componenti in entrambi gli anni rispetto alla sommersione continua. In entrambi gli anni, la AWD35 e la AWD25 hanno ottenuto simili riduzioni di As in granella (rispettivamente 61% e 68% nel 2015, 56% e 58% nel 2016) rispetto alla sommersione continua. Al contrario, l’AWD safe ha presentato una concentrazione di arsenico in granella simile alla sommersione continua. L’AWD safe ha mantenuto l’umidità del suolo nello strato 0-15 cm vicino alla saturazione (SWP vicino a 0) e ha richiesto un periodo di drenaggio di 3 giorni. Nell’AWD35 il SWP a 0-15 cm ha raggiunto -34 kPa e ha richiesto un periodo di drenaggio di 7 giorni. Nell’AWD più severo, AWD25, il SWP a 0-15 cm ha raggiunto i -71 kPa e ha richiesto un periodo di drenaggio di 11 giorni. L’accumulo di As nella granella di riso è favorito nelle condizioni di sommersione perché le condizioni anaerobiche incrementano la biodisponibilità di arsenico nel suolo per: riduzione di As^{5+} ad As^{3+} , il quale è più mobile nel suolo; riduzione da Fe^{3+} a Fe^{2+} per dissolvimento delle placche di ferro presenti sulle radici e rilascio dell’As in esso contenuto nel suolo. La AWD safe non ha determinato una riduzione delle concentrazioni di As nelle radici a confronto con la sommersione continua dato che lo strato di suolo 0-15 cm è rimasto vicino a saturazione. Infine, gli autori sottolineano che i risultati di questo studio non sono necessariamente universali e le soglie idriche del suolo osservate possono essere differenti in funzione del tipo e della tessitura del suolo.

LaHue et al. (2016), in uno studio triennale condotto in California, hanno valutato l’impatto di 3 gestioni dell’acqua con la varietà M206 sulla resa e qualità della granella, sulla concimazione, sulla concentrazione di As e sulla emissione di GHG. Le tre gestioni studiate sono la semina interrata con AWD (DS-AWD), la semina in acqua con AWD (WS-AWD) e la semina in acqua con sommersione continua (WS-C). Il contenuto d’acqua volumetrico è stato misurato durante la stagione nelle gestioni AWD utilizzando un sensore di umidità posto a una profondità di 10 cm. La gestione WS-AWD è stata identica alla semina in acqua fino al raggiungimento di una buona copertura del suolo (in media, 51 gg dopo la semina) per ottenere un migliore controllo delle infestanti e un completo assorbimento dell’azoto. Da tale stadio, sono stati instaurati i cicli AWD con risommersione al raggiungimento di un contenuto idrico volumetrico di $0,35 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$. La sommersione è stata mantenuta anche durante l’antesi e il riempimento del granello, con il risultato di ottenere solo due eventi AWD. Nella semina interrata, la sommersione del campo è stata instaurata a circa un mese dalla semina per permettere il completo assorbimento dell’azoto. Da tale fase è stata instaurata la gestione AWD come già specificato per la semina in acqua anche se, il DS-AWD è stato asciugato una settimana dopo a causa del ritardo nella maturazione. Alla prova di gestione idrica è stata abbinata una prova di concimazione con i seguenti livelli di N: 0, 60, 120, 180 e 240 kg N ha⁻¹. La resa produttiva a 180 kg N/ha, nei primi due anni, è stata simile in tutte

le gestioni idriche. Nel terzo anno, la semina interrata abbinata all'AWD ha prodotto statisticamente di più rispetto alla sommersione continua. La gestione DS-AWD ha ridotto l'arsenico totale in granella del 57% nel riso semigreggio e del 59% nel riso bianco rispetto alla sommersione continua. La gestione WS-AWD ha ridotto la concentrazione di arsenico totale in granella del 63% e del 65% rispettivamente nel riso semigreggio e bianco rispetto alla sommersione continua. Lo studio ha evidenziato come asciutte nella seconda parte della stagione hanno un maggiore impatto nel diminuire le concentrazioni di arsenico rispetto a quelle condotte nella prima parte della stagione.

Matsuo e Mochizuki, 2009. In Giappone è stato valutato l'andamento di 4 strategie di gestione dell'acqua tra cui la sommersione continua (CF) e l'AWD safe con sommersione una volta raggiunto un potenziale di tensione matriciale pari a -5 kPa. Sono state indagate 6 cultivar, 4 japonica e 2 indica. La gestione idrica in regime di AWD safe ha portato a una riduzione del volume di irrigazione rispetto al CF pari al 39,3%. Inoltre, non ha influenzato il numero di giorni per il raggiungimento della fioritura e della maturità, ad eccezione della varietà *Nipponbare*, in cui il ciclo colturale si è allungato di 2 giorni. Nelle tesi in AWD la produzione di riso è risultata più elevata del 13% rispetto al CF, e al tempo stesso ha ridotto l'utilizzo irriguo del 40% ottenendo una maggiore *water productivity*. Il numero di culmi/m² e la sterilità sono risultati simili confrontando le due strategie irrigue. Infine gli autori hanno concluso che le cultivar selezionate per la gestione irrigua tradizionale sono riuscite ad adattarsi bene anche alla gestione in AWD.

3.2.2 Aspetti legati al bilancio idrico

Carrijo et al. (2017). Lo studio ha condotto una meta-analisi riguardante le potenzialità delle gestioni AWD, analizzando 56 studi provenienti da tutto il mondo e per l'80% dei casi dall'Asia (30% dei quali dalla sola Cina). L'analisi ha suddiviso le gestioni AWD in due categorie: i) "safe" o "mild", se il potenziale dell'acqua nel suolo (SWP) misurato nella zona radicale viene mantenuto entro i -20 kPa oppure, alternativamente, se l'altezza dell'acqua nel campo (FWL) non viene fatta scendere sotto i -15 cm; ii) "severe", se l'SWP misurato nella zona radicale viene fatto scendere oltre i -20 kPa. In media, rispetto alle CF, le gestioni AWD hanno consentito una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 25.7%, registrando, di contro, una diminuzione del raccolto del 5.4%. Questo ha, perciò, provocato un aumento della Water Productivity (kg m⁻³) del 24.2%. Il consumo idrico non è risultato affetto dalla tessitura dei terreni, ma principalmente dalla severità della soglia utilizzata nella gestione. Le gestioni "safe" (FWL ≤ 15 cm o SWP ≥ -20 kPa) hanno, infatti, fatto registrare un decremento nell'utilizzo di questa del 23.4%, mentre quelle "severe" (SWP < -20 kPa) del 33.4%. Tessitura del suolo e differenti tipologie di impianto (trapianto e semina diretta) non sembrerebbero mostrare un contributo significativo rispetto alla produzione che, anche in questo caso, è maggiormente influenzata dalla severità della soglia utilizzata. Confrontando le gestioni "safe" e quelle "severe" alle CF, infatti, si è registrata una diminuzione della produzione del 1.9-3.4% (FWL ≤ 15 cm e SWP ≥ -20 kPa, rispettivamente) per le prime e del 22.6% per le seconde. Come riportano gli autori, se l'obbiettivo è quello di preservare la produzione, le gestioni preferibili sono da considerarsi quelle "safe" che hanno registrato una Water Productivity del 25.9% più alta delle CF.

Linquist et al., 2015. Le prove sono state effettuate presso l'University of Arkansas Rice Research and Extension Center (34° 27' N, 091° 24' W), USA, nel 2012 e nel 2013. La zona climatica secondo la classificazione Köppen-Geiger è la Temperata calda (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura del suolo è franco limosa (*silty loam*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di quattro gestioni irrigue. L'impianto della coltura è avvenuto per semina diretta (drill-seeding). Le gestioni irrigue testate sono: continuous flooding (Flood) e alternate wetting and drying (AWD/40F, AWD/60 e AWD/40). Nelle gestioni AWD le irrigazioni sono state effettuate nel momento in cui il contenuto d'acqua nel suolo a 5 cm di profondità raggiungeva la soglia del 60 e del 40% del contenuto volumetrico d'acqua a saturazione del terreno. Le irrigazioni nelle gestioni AWD sono state effettuate riportando l'acqua sul campo ad un'altezza massima di 10 cm. Gli autori riportano una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica del 18, del 31 e del 44% per le gestioni AWD/40F, AWD/60 e AWD/40, rispettivamente, nei confronti della CF. Benché accompagnato da una riduzione di raccolto rispetto alla gestione CF, l'incremento della Water Productivity (kg m⁻³) è stato del 22, del 43 e del 63% per le gestioni AWD/40F, AWD/60 e AWD/40, rispettivamente.

3.2.3 Aspetti legati all'efficienza della fertilizzazione azotata

Atwill et al. (2018) hanno determinato l'impatto di quattro tecniche di irrigazione (irrigazione continua, irrigazione *straighthead*, AWD e aerobica) su maturità, altezza della pianta matura, NUE e resa in granella per sei cultivar comunemente coltivate in Louisiana e Mississippi. Questo esperimento è stato condotto nel 2013 e 2014 presso l'AgCenter della Louisiana State University (LSU) Louisiana e presso il Delta Research and Extension Center di Stoneville, Mississippi. L'efficienza nell'uso dell'azoto e la resa in granella per il riso coltivato in ambiente aerobico sono state ridotte di almeno il 20% rispetto alle sommersioni continue, alla gestione dell'irrigazione *straighthead* e all'AWD. Per l'irrigazione *straighthead* e l'AWD sono stati ottenuti risultati simili al sistema di produzione continuamente sommerso per i parametri NUE e resa in granella. Questi dati indicano che, se gestito correttamente, l'uso di una strategia di irrigazione alternativa, come l'irrigazione AWD, non riduce NUE, altezza della pianta o resa in granella rispetto a un sistema continuamente sommerso.

Rose et al. (2016), per verificare se i regimi di fertilizzanti azotati utilizzati nei sistemi *delayed permanent water* (DPW) comportano un maggiore recupero di fertilizzante azotato rispetto ai tradizionali sistemi a sommersione continua (CF), hanno condotto un esperimento di campo utilizzando urea marcata con ¹⁵N. Semi pregerminati sono stati trapiantati in acqua. Circa il 27% del fertilizzante marcato è stato recuperato nella biomassa alla maturità, indipendentemente dal regime idrico o dalla percentuale di fertilizzante azotato, e circa il 20% è stato recuperato nel suolo fino a una profondità di 30 cm. Le piante nel sistema CF hanno accumulato più N totale relativamente ad ogni dose di fertilizzante N applicato, rispetto al sistema DPW. Nella stagione successiva nello stesso sito, un singolo studio effettuato con una dose di N pari a 150 kg di N ha⁻¹ non ha riscontrato differenze significative nell'assorbimento di N dalle colture, nella resa della biomassa, nella resa di risone o nel recupero dell'urea marcata in DPW e CF. La perdita del 40-50% dell'N applicato in entrambe

le stagioni indipendentemente dai regimi di irrigazione suggerisce che sono necessarie nuove strategie di gestione dell'N del fertilizzante oltre all'ottimizzazione della velocità e dei tempi di applicazione dell'urea, in particolare alla luce dell'aumento dei prezzi dei fertilizzanti azotati.

LaHue et al. (2016), in un esperimento triennale hanno misurato le emissioni di CH₄ e N₂O, le concentrazioni di As nella granella, la risposta della resa alla fertilizzazione azotata e la resa in granella in due trattamenti: AWD (*drill-seeded* e *water-seeded*) e un trattamento CF con semina in acqua. Nel primo anno di sperimentazione hanno ottenuto curve di risposta alla concimazione azotata simili in tutti i trattamenti considerati con incrementi di resa fino a 180 kg N/ha ma non con dosi superiori. Nell'anno successivo, tuttavia, le tesi con semina in acqua hanno ottenuto incrementi di resa fino a 240 kg N/ha, mentre con la DS-AWD hanno ottenuto la resa massima a 180 kg N/ha. Tale risposta della concimazione alla semina in acqua potrebbe essere dovuta a maggiori perdite per denitrificazione o lisciviazione. La denitrificazione può essere una significativa via di perdita in condizioni di sommersione se è presente una significativa concentrazione di nitrati prima della sommersione. La lisciviazione dei nitrati può essere una importante via di perdita nel caso siano presenti alti tassi di percolazione profonda delle acque, anche se studi svolti in California hanno dimostrato come la perdita di nitrati per lisciviazione nei sistemi risicoli sia minima. L'introduzione di cicli aerobici con la AWD ha il potenziale di incrementare le perdite di N a causa della nitrificazione e successiva denitrificazione.

3.2.4 Aspetti legati alle emissioni di gas serra

Balaine et al. (2019). In questo studio di due anni (California Rice Experimental Station, Biggs, CA) sono state comparate tre severità di asciutta alla sommersione continua. I trattamenti AWD sono stati effettuati secondo i seguenti criteri: AWD *safe* (AWDs), in cui le parcelle sono state allagate quando il livello dell'acqua è sceso di 15 cm sotto la superficie del suolo (contenuto volumetrico di acqua dal 41 al 44%); e AWD₃₅ e AWD₂₅ dove le parcelle sono state allagate quando il contenuto volumetrico di acqua del suolo ha raggiunto rispettivamente il 35 e il 25% circa. Ciascuno di questi trattamenti ha ricevuto due periodi di asciutta (tutti avvenuti tra 45 giorni dopo la semina e la testa). La resa di granella e le emissioni cumulative di N₂O (vicine allo zero) non sono variate in modo significativo tra i trattamenti. L'AWDs ha ridotto le emissioni di CH₄ del 41% e l'AWD₃₅ e l'AWD₂₅ del 56-73% e del 60-67%, rispettivamente. L'aumento della severità dell'asciutta ha ridotto le emissioni di CH₄ e GWP fino a un certo punto (AWD₃₅), ma l'AWD₂₅ non ha ulteriormente ridotto le emissioni di CH₄.

Humphreys et al. (2018). L'obiettivo dello studio è stato di valutare l'effetto della gestione idrica (sommersione continua vs. *mid-season drain*) e della varietà (convenzionale vs. ibrido) sulle emissioni di metano in un riso coltivato su terreno franco limoso con semina interrata. Lo studio è stato svolto nel 2015 presso l'Università dell'Arkansas e l'area di studio è stata gestita con rotazione soia-riso. Le emissioni di CH₄ all'inizio sono state basse e successivamente incrementate fino a un picco variabile dai 100 ai 230 mg CH₄-C m⁻² d⁻¹ per *mid-season drain/hybrid* e *full-season flood/hybrid* combinazione di trattamenti, rispettivamente, tra 47 e 54 giorni dalla sommersione. La combinazione *mid-season-*

drain/hybrid ha determinato le minori emissioni di metano ($2.52 \text{ kg CH}_4\text{-C t grain}^{-1}$) rispetto alle altre tre combinazioni che non differivano e hanno emesso in media $6,45 \text{ kg CH}_4\text{-C t grain}^{-1}$.

Fangueiro et al. (2017) hanno valutato l'impatto sulle emissioni di GHG di due parametri principali della produzione di riso: la produzione di riso aerobica è stata confrontata con la tradizionale produzione di riso in sommersione e la lavorazione convenzionale (CT) è stata confrontata con la gestione della non lavorazione a breve e lungo termine (NT). L'esperimento di campo è stato eseguito in tre anni e le emissioni di gas serra sono state misurate durante ogni anno. Sono stati considerati cinque trattamenti (3 repliche): NTS7: non lavorazione del terreno per sette anni e irrigazione per aspersione; NTS: non lavorazione del terreno e irrigazione per aspersione; CTS: lavorazione convenzionale e irrigazione per aspersione; NTF: non lavorazione del terreno e sommersione; CTF: lavorazione convenzionale e sommersione. L'uso dell'irrigazione a pioggia piuttosto che della sommersione ha portato a una riduzione delle emissioni di N_2O e CH_4 di circa il 40% e oltre il 99%, rispettivamente, nel corso dei 3 anni dell'esperimento. L'uso dell'irrigazione a pioggia rispetto alla sommersione ha ridotto il potenziale di riscaldamento globale (GWP) di circa il 40% e il 36% rispettivamente nei trattamenti di aratura, senza aratura e convenzionali. Il trattamento NTF ha ridotto le emissioni di CH_4 , rispetto a CTF, di ~ 60% in tre anni, ma l'effetto di NT sulle emissioni di N_2O non era chiaro: una diminuzione o nessun effetto è stato osservato principalmente nei trattamenti NT, rispetto a CT. Nei trattamenti NT, rispetto al CT, è stata osservata una diminuzione del ~ 40% delle emissioni totali di GHG. Non sono state riscontrate differenze significative tra NTS e NTS7 in termini di emissioni gassose. La non lavorazione a breve termine e il trattamento irriguo per aspersione (NTS) hanno fornito rese inferiori rispetto a CTF nel 2011 e nel 2012, ma hanno raggiunto rese simili nel terzo anno (NTS 8229 kg/ha ; CTF 8926 kg/ha), con un risparmio medio di 75% della quantità totale di acqua applicata in CTF. I dati NTS7 hanno mostrato che i rendimenti elevati (raggiungendo 9805 kg/ha nel 2012) e il risparmio idrico sono sostenibili a lungo termine. Si può concludere che, per la produzione aerobica del riso, l'NT risulta una strategia efficiente per ridurre al minimo le emissioni di GHG mantenendo alti livelli di produzione.

LaHue et al. (2016) hanno riportato come, nel complesso, il CH_4 sia prevalso il GWP in tutte e tre le gestioni idriche considerate. Le emissioni CH_4 di medie di due anni della sommersione continua si sono attestate su $133 \text{ kg CH}_4\text{-C ha}^{-1}$. Le gestioni irrigue AWD con semina in asciutta (DS-AWD) e semina in acqua (WS-AWD) hanno ridotto le emissioni di metano rispettivamente del 87% e 60%. Per quanto riguarda il N_2O , in questa sperimentazione, le parcelle sono state sommerse dopo l'applicazione dell'N e sono state mantenute sommerse fino a che i livelli di N estraibile nel suolo si sono avvicinati a zero; tale procedura ha permesso di ottenere emissioni di N_2O trascurabili. Il GWP per unità di resa è stato ridotto del 59–88% con le gestioni AWD.

Linguist et al. (2015) hanno rilevato emissioni di metano a partire da circa 2 settimane dalla sommersione del campo. La successione riso-riso ha sempre dato maggiori emissioni rispetto a quella riso-soia. In sommersione continua, le emissioni cumulative medie nella stagione sono state di $105 \text{ kg CH}_4\text{-C ha}^{-1}$ e $0,031 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$. Le emissioni di metano sono state ridotte, rispettivamente, del 48%, 93% e 93% nelle gestioni AWD/40F, AWD/60

e AWD/40. Al contrario, l'implementazione di gestioni AWD ha determinato un incremento delle emissioni di N_2O rispettivamente di 0,143, 0,245 e 0,474 kg N_2O-N ha⁻¹. Le emissioni di N_2O sono apparse maggiori all'inizio della stagione, durante i periodi di drenaggio, probabilmente per una maggiore presenza di azoto apportato con la fertilizzazione. Però con l'incremento delle emissioni di N_2O , il GWP è stato ridotto rispetto al controllo del 45%, 90%, e 86% nelle gestioni AWD/40F, AWD/60 e AWD/40. Anche a livello di emissioni per unità di prodotto, la sommersione continua è stata la gestione che ha determinato il maggiore impatto con, in media, 347 kg CO_2 eq t⁻¹. Introducendo pratiche AWD, tale valore è stato ridotto del 45, 89, and 84% nel AWD/40F, AWD/60 e AWD/40, rispettivamente.

Simmonds et al. (2015) hanno condotto uno studio pluriennale in California e Arkansas nel 2011 e 2012 con l'obiettivo di determinare se le emissioni stagionali di CH_4 e N_2O , e il GWP differivano tra le principali varietà coltivate in California e negli Stati Uniti del sud e per determinare l'importanza relativa delle caratteristiche di crescita della pianta nel spiegare la variabilità nelle stagionali emissioni GHG. L'ipotesi testata era che le varietà con una biomassa vegetale e epigea maggiore avessero un maggiore GWP a causa della più alta capacità di produzione di CH_4 dovute alla maggiore produzione di essudati radicali e della più alta capacità di trasporto di metano per via di un'aerenchima più sviluppata. Le emissioni di N_2O sono state trascurabili sia tra le varietà che tra i siti. Le emissioni di metano medie nei due siti gestiti con la semina in acqua sono state 63 e 13 kg CH_4-C ha⁻¹ e nei due siti gestiti con semina interrata sono stati 34 e 70 kg CH_4-C ha⁻¹. Il comportamento emissivo è risultato generalmente simile tra le varietà dello stesso sito sperimentale, con l'eccezione di minime variazioni nel momento di raggiungimento del picco emissivo. Il picco delle emissioni di metano durante il periodo di sommersione generalmente è stato raggiunto ad inizio agosto in tutte le varietà e su tutti i siti. Il GWP stagionale è risultato fortemente relazionato alle emissioni di CH_4 in tutti i siti e il N_2O ha contribuito in modo minoritario. Il GWP dei campi seminati in acqua è variato tra 314 e 2144 kg CO_2 eq ha⁻¹, mentre nei campi con semina interrata è variato tra 1254 e 2399 kg CO_2 eq ha⁻¹. Almeno il 90% del GWP stagionale in ogni sito in media è stato determinato dalle emissioni di CH_4 . Gli autori hanno rilevato relazioni contraddittorie tra le caratteristiche di crescita e le emissioni stagionali di metano, sottolineando che i parametri riferiti alla biomassa della pianta, da soli, non sono affidabili indicatori dei comportamenti di emissione di metano a causa delle complesse interazioni tra il fenotipo, l'ambiente e i meccanismi guidanti la produzione, l'ossidazione e il trasporto di CH_4 .

Sass et al. (1992), per testare i metodi per ridurre le emissioni di CH_4 , hanno applicato quattro metodi di gestione dell'acqua alle risaie su terreni limosi-argillosi vicino a Beaumont, in Texas. I quattro trattamenti dell'acqua studiati sono stati: sommersione continua convenzionale (46 giorni dopo la semina), sommersione continua con drenaggio a metà stagione, sommersione continua con drenaggi multipli, sommersione posticipata con irrigazione turnata (76 giorni dopo a semina). I tassi di emissione di metano variavano notevolmente con il regime idrico, mostrando l'emissione totale stagionale più bassa (1,2 g m⁻²) con un trattamento di irrigazione turnata e la più alta (14,9 g m⁻²) con una sommersione continua. Sebbene il trattamento di gestione dell'acqua con irrigazione turnata abbia emesso l'88% in meno di CH_4 rispetto al normale trattamento di irrigazione e non abbia

ridotto la resa del riso, tale gestione ha richiesto 2,7 volte più acqua rispetto ai 202 mm richiesti dal trattamento convenzionale.

3.3 Alternate wetting and drying in Italia

3.3.1 Aspetti agronomici, di qualità della granella e di influenza varietale

Lagomarsino et al. (2016). In uno studio biennale svolto a Bologna, sono state indagate due differenti gestioni idriche abbinata alla semina interrata della varietà Gladio: sommersione continua e AWD. La risommersione del campo nella gestione AWD è stata compiuta, il primo anno, al raggiungimento dei -15 cm di profondità dell'acqua e al secondo anno al raggiungimento dei -5 cm. Per misurare il potenziale idrico del suolo, sonde di umidità sono state installate ad una profondità pari a 8-15 cm nel primo anno e a 0-8 cm nel secondo. Nel primo anno di sperimentazione, utilizzando il criterio dei -15 cm, gli autori hanno ottenuto una diminuzione della resa produttiva del 33% rispetto alla sommersione continua. Per limitare le perdite produttive, l'anno successivo, la risommersione è avvenuta nel momento in cui il livello dell'acqua raggiungeva i -5 cm dalla superficie del suolo e mantenendo il campo sommerso per due settimane intorno al periodo della fioritura. La riduzione di produzione è stata del 12% rispetto alla sommersione continua, non statisticamente significativa. Gli autori hanno comunque sottolineato l'importanza della scelta varietale visto che varietà adattate a condizioni aerobiche del suolo possono ottenere produzioni equiparabili alla sommersione continua. Hanno infine sottolineato che ulteriori ricerche, soprattutto nei contesti pedoclimatici vocati alla coltivazione del riso, sono necessarie per valutare la durata e il numero di eventi di sommersione, il livello dell'acqua sopra la superficie del suolo, la gestione dei residui, il tipo di fertilizzanti e le loro condizioni di applicazione.

Oliver et al. 2019. L'esperimento è stato condotto nel 2017 a Vercelli, in un sito con suolo sabbio-limoso e pH di sub-acido adottando la tecnica della semina interrata, con lo scopo di indagare le differenti produzioni di granella, biomassa aerea (ANPP) e del sottosuolo (BNPP) per 12 varietà di riso europee, anche se alla fine sono state selezionate solo 4 di queste: Prometeo (italiana, grano medio), Gleva (spagnola, grano medio), Gageron (francese, grano corto) e Aralate (francese, grano lungo). Sono stati posti a confronto due regimi idrici: la sommersione continua (CF) e l'AWD. La sommersione delle parcelle in regime di AWD è avvenuto nel momento in cui il potenziale matriciale nel suolo raggiungeva - 25 kPa a 25 cm di profondità. La biomassa è stata misurata in 4 momenti del ciclo colturale: accostamento, differenziazione della pannocchia, fioritura e maturazione. Durante tutto il ciclo colturale, le varietà hanno mostrato mediamente un incremento di biomassa totale maggiore in CF che in AWD, specialmente in fioritura; nel CF, il BNPP e l'ANPP sono apparsi statisticamente maggiori rispetto all'AWD. Visto che non è stata colta della cementificazione e dell'indurimento eccessivo del suolo tramite l'utilizzo di un penetrometro, gli autori hanno perciò ipotizzato che questi risultati sono attribuiti a una crescita radicale molto laterale o molto profonda. Nel complesso, la produzione è apparsa simile tra AWD e CF per tutte le varietà indagate.

Orasen et al. (2019). Uno studio biennale svolto in Italia ha confrontato la gestione con semina interrata e successivo AWD da una parte e la semina interrata e sommersione continua dall'altra, considerando 3 diverse varietà (Baldo, Gladio e Loto). L'intervento è stato deciso sulla base del potenziale idrico misurato a 20 cm di profondità. Nel 2012, la prima risommersione è avvenuta a un valore soglia di -30 kPa e le successive due a -20 kPa. Nel 2013, non è stato necessario nessun intervento di sommersione, dato che, a causa delle abbondanti precipitazioni, il valore di potenziale idrico è variato tra 0 e -8 kPa. Nel 2013 è stato osservato un ritardo della fioritura nella gestione AWD rispetto alla sommersione continua, aspetto non emerso durante il primo anno di sperimentazione. Il regime idrico non ha influenzato il periodo fioritura-maturazione in tutte e tre le varietà. In sommersione continua, la produzione di Baldo è stata sempre superiore a Gladio e Loto. Baldo ha evidenziato un significativo calo produttivo in entrambi gli anni se coltivato in AWD (-21 e -25%), mentre Gladio ha mostrato una riduzione solo nel 2013 (-32%) e Loto non ha mai mostrato contrazioni. L'analisi delle componenti della produzione ha indicato che per le tre varietà studiate nessun effetto significativo è stato osservato sul numero di culmi fertili/m² nelle due stagioni colturali e nei due regimi idrici. Inoltre, solo la var. Gladio ha mostrato una riduzione significativa del numero di spighe per pannocchia con l'AWD (-36% e -22%). Nel 2013, il peso dei 1000 semi è risultato sempre ridotto con la gestione AWD per tutte le varietà, mentre nel 2012 la riduzione è stata significativa solo per la var. Baldo. Il Cd è risultato più alto nell'AWD rispetto alla sommersione continua, infatti il più consistente incremento di cadmio (+850%) è stato determinato per la var. Baldo nel 2012. Le concentrazioni di As sono risultate ridotte in condizione di AWD. All'interno di ogni varietà e regime idrico, le concentrazioni di As sono apparse inferiori nel 2013 rispetto al 2012. In generale, gli autori riportano come l'AWD sembrerebbe rallentare il tasso di crescita e sviluppo delle piante attraverso l'esposizione a temperature più basse per l'assenza di acqua nel campo. La var. Loto ha mostrato il migliore mantenimento della resa e della qualità nutrizionale del granello in AWD.

3.3.2 Aspetti connessi all'utilizzo irriguo in Italia

Lagomarsino et al. (2016). Le prove sono state condotte presso la Società Italiana Sementi (44° 41' 32.11" N, 11° 28' 55.61" E), Italia (provincia di Bologna), nel 2012 e nel 2013. Secondo Köppen-Geiger il clima del sito è Temperato caldo (Kottek et al., 2006; Rubel et al., 2017). La tessitura dei primi 42 cm di suolo è franco argilloso limosa (*silty clay loam*). L'impianto della coltura è avvenuto tramite semina diretta su terreno asciutto (*dry-seeded rice*). Il design delle prove sperimentali ha previsto la valutazione di due gestioni irrigue e della varietà di riso Gladio. Le gestioni irrigue testate sono: continuous flooding (PF) e alternate wetting and drying (AWD). Nella gestione AWD le irrigazioni sono state effettuate con due severità differenti nei due anni: per il 2012 nel momento in cui l'altezza del battente idrico, monitorata utilizzando dei pozzetti installati in campo, raggiungeva i -15 cm dal piano campagna e per il 2013 nel momento in cui il battente idrico raggiungeva i -5 cm. Per l'anno 2012 gli autori riportano per la gestione AWD una diminuzione della produzione del 33% rispetto alla PF e per il 2013 una diminuzione del 12% (non significativa) per la gestione

AWD rispetto alla PF. La gestione AWD ha fatto registrare una diminuzione nell'utilizzo della risorsa idrica rispetto alla PF del 70% nel 2012 e del 40% nel 2013.

3.3.3 Aspetti legati all'efficienza della fertilizzazione azotata

Miniotti *et al.* (2016) hanno svolto un esperimento di campo (2012–2013) in una risaia nell'Italia nordoccidentale per valutare e quantificare la sostenibilità agroambientale di tre diverse pratiche di gestione dell'acqua considerando (i) semina in acqua e sommersione continua (WFL), (ii) semina in asciutta e sommersione in fase di accestimento (DFL) e (iii) semina in asciutta e irrigazione intermittente (DIR). Gli effetti della gestione dell'acqua sui parametri agronomici, come i componenti della resa e il recupero di N sono stati valutati per quattro varietà di riso (Gladio, Baldo, Selenio e Loto). Per le diverse pratiche di gestione sono stati inoltre valutati l'efficienza nell'uso dell'acqua, la lisciviazione dei nitrati e le emissioni di gas serra (GHG). La gestione dell'acqua ha fortemente influenzato le rese in granella e la resa qualitativa. I trattamenti WFL e DFL hanno mostrato rese simili. Il trattamento DIR ha portato a riduzioni significative della resa rispettivamente del 28, 24, 19 e 14% per le quattro varietà. Questa riduzione è stata associata ad un minor accestimento e ad una ridotta assimilazione di N responsabili di un minor recupero apparente del concime azotato. Elevate concentrazioni di nitrati nella soluzione del suolo e lisciviazione dalla zona delle radici a seguito della nitrificazione rappresentano il più grande vincolo ambientale dei sistemi colturali che prevedono semina in asciutta. Il trattamento DIR ha fortemente contribuito a mitigare le emissioni di gas serra e ridurre il potenziale di riscaldamento globale di questi sistemi colturali fino al 70–90%.

3.3.4 Aspetti legati alle emissioni di gas serra

Verhoeven *et al.* (2019) hanno progettato un esperimento di campo con tre trattamenti di gestione dell'acqua. I calcoli del rapporto isotopico sono stati accoppiati a misurazioni simultanee di NO_3^- , NH_4^+ e DOC della soluzione del suolo. Le emissioni di N_2O sono state più alte nel trattamento con semina in asciutta + AWD (DS-AWD) rispetto ai trattamenti con semina in acqua + AWD (WS-AWD) e alla sommersione convenzionale con semina in acqua (WS-FLD). Nel trattamento DS-AWD le maggiori emissioni sono state associate a un contributo elevato dalla denitrificazione e una diminuzione della riduzione di N_2O , mentre nei trattamenti WS, le maggiori emissioni si sono verificate quando i contributi da denitrificazione/denitrificazione nitrificante e nitrificazione/denitrificazione fungina erano più simili. Il trattamento DS-AWD e l'applicazione di fertilizzanti a base di urea hanno portato ad un aumento della nitrificazione, successiva denitrificazione ed emissioni di N_2O derivante dalla denitrificazione. La più elevata produzione ed emissioni di N_2O sono stati associati a un contributo crescente dalla nitrificazione/denitrificazione accompagnata da diminuzioni nella riduzione di N_2O nei trattamenti AWD. Nel trattamento WS-FLD è stato riscontrato un aumento delle emissioni di N_2O a causa della denitrificazione fungina. Per una efficace gestione delle perdite di N tramite l'utilizzo di sistemi alternativi per la gestione dell'acqua, l'inibizione della nitrificazione è necessaria, soprattutto nelle prime fasi della stagione colturale quando la disponibilità di N supera il raccolto N richiesta.

Verhoeven et al. (2018) hanno studiato come l'introduzione dell'AWD possa modificare la distribuzione in profondità delle condizioni ambientali e dei nutrienti (NO_3^- , NH_4^+ , carbonio organico disciolto e potenziale redox del suolo (Eh) rispetto a sistemi di irrigazione convenzionale (FLD). Gli autori hanno quindi esaminato come queste variabili possano essere correlate alla produzione e al consumo di N_2O tramite tecniche di analisi isotopiche accoppiate alla quantificazione dei flussi di N_2O a cinque profondità (5, 12,5, 25, 50 e 80 cm). Queste misurazioni, insieme alle emissioni superficiali di N_2O , sono state rilevate in concomitanza alla fertilizzazione basale di urea e per sei giorni in concomitanza all'inizio del drenaggio finale. Le emissioni più elevate sono state osservate nel trattamento AWD all'inizio delle misurazioni. Queste emissioni sono state guidate da una elevata disponibilità di NH_4^+ e potrebbero principalmente essere attribuite alla nitrificazione direttamente o indirettamente tramite accoppiata nitrificazione-denitrificazione.

Peyron et al. (2016) hanno valutato l'efficacia della gestione dell'acqua utilizzando tecniche alternative alla tipica sommersione sulla mitigazione delle emissioni di CH_4 , e verificato se un aumento simultaneo delle emissioni di N_2O può compensare totalmente o parzialmente il loro vantaggio ambientale. Due sistemi di gestione dell'acqua alternativi sono stati confrontati rispetto quelli convenzionali (WFL): semina in asciutta con ritardo delle sommersioni (DFL) e irrigazione intermittente (DIR). Le emissioni di CH_4 e N_2O sono state monitorate a scala sul campo in due anni. Il sistema DFL è stato responsabile della diminuzione del 59% delle emissioni totali di CH_4 rispetto al WFL, mentre il trattamento DIR ha annullato le emissioni di CH_4 . L'effetto della mitigazione CH_4 del DFL rispetto al WFL è stato principalmente concentrato all'interno della fase vegetativa, mentre i flussi da AWD sono stati registrati durante l'intera stagione. Tuttavia, DIR ha prodotto i picchi di emissione più elevati e flussi cumulativi di N_2O quasi totalmente durante la fase vegetativa. Al contrario, DFL e WFL hanno mostrato emissioni di N_2O inferiori rispettivamente del 77 e del 93% rispetto alla DIR. L'adozione di pratiche di gestione dell'acqua alternative che prevedono la semina in asciutta e successivamente un ritardo nella sommersione o irrigazioni intermittenti possono contribuire a ridurre in modo significativo il GWP dei sistemi di coltivazione del riso del 56 e 83%, rispettivamente rispetto alla sommersione continua.

Lagomarsino et al. (2016) hanno valutato le emissioni CH_4 largamente influenzate dalla gestione idrica adottata. Nel primo anno, con una AWD più severa (-15 cm), le emissioni di CH_4 sono state pari a 0,04 kg C- CH_4 /ha/stagione del 97% inferiori rispetto alla sommersione continua. Nel secondo anno, l'implementazione di una AWD meno severa (-5 cm) ha portato a un aumento delle emissioni di CH_4 a 14,42 kg C- CH_4 /ha/stagione, l'11% in meno rispetto alla sommersione continua. Le emissioni di CH_4 nel periodo invernale, mantenendo il campo asciutto, sono state molto basse in entrambi gli appezzamenti. È stata riscontrata una relazione positiva tra durata della sommersione e emissioni di CH_4 e tra livello dell'acqua di sommersione e emissioni di CH_4 con un grande incremento delle emissioni a livelli maggiori di 10 cm. Le emissioni di N_2O sono state maggiori nelle gestioni AWD e lo studio ha evidenziato come per mantenere bassi i livelli di N_2O sia importante la gestione della fertilizzazione azotata e della sommersione del campo. Gli autori hanno anche formulato alcune ipotesi su tale andamento: rilascio di N_2O intrappolato nel suolo, incremento della attività biologica di produzione del N_2O , accessibilità e disponibilità ottimale del substrato. È stata inoltre riscontrata una correlazione positiva tra emissioni di N_2O e concentrazioni di

NH₄⁺ nell'acqua di sommersione. In generale, le emissioni di CH₄ registrate dagli autori sono risultate molto basse se comparate ad altri studi bibliografici probabilmente per la tessitura del suolo, la protezione della sostanza organica, il trasferimento e l'intrappolamento di CH₄, la profondità dello strato ossidato del suolo ospitante i metanotrofi, la disponibilità di accettori alternativi di elettroni (NO₃⁻, Fe³⁺, SO₄²⁻) e le gestioni colturali del campo (rotazione, la modalità di semina, ecc.). In entrambe le stagioni, il GWP basato sia su unità di superficie che di resa, è stato maggiore con le gestioni AWD rispetto alla sommersione continua.

Mazza et al. (2016). In questo lavoro viene analizzato l'effetto della gestione idrica AWD sulle emissioni GWP e sulla produttività in una risaia nel nord Italia. Sia durante l'intera stagione vegetativa che durante il periodo di sommersione, il GWP è risultato maggiore nelle parcelle sottoposte a sommersione permanente; tuttavia, nelle parcelle sottoposte ad AWD è stata osservata una significativa riduzione della produttività. Questi risultati suggeriscono l'importanza di un'attenta pianificazione basata sulle caratteristiche specifiche del sito, considerando i principali fattori che influenzano le potenzialità di mitigazione.

4. Osservazioni generali

In generale, il ricorso all'AWD, specialmente se "safe", non ha comportato consistenti penalizzazioni dal punto di vista produttivo. Dagli studi fin qui presentati, la comparazione tra le tecniche cosiddette tradizionali e l'AWD ha restituito produzioni statisticamente uguali. È stata, tuttavia, osservata una contrazione delle rese produttive incrementando la severità dell'AWD, e quindi allungando il periodo di asciutta del suolo. Le componenti della produzione, specialmente se si considerano gli studi condotti nelle aree tropicali, non sembrano risentire dell'adozione dell'AWD. In alcuni studi è stato osservato che la tecnica dell'AWD può portare ad un incremento dei granelli di riso gessati.

La riduzione dei consumi idrici garantiti dalla tecnica AWD deve necessariamente confrontarsi con gli obiettivi agronomico ed economico di mantenere elevate produzioni. Per tale ragione, tra gli studi esplorati in questa analisi della letteratura, ci si riferisce in queste conclusioni solo alle gestioni considerabili safe per le varietà di riso più utilizzate.

Dalla letteratura analizzata, riguardante sperimentazioni di campo e non in laboratorio, la riduzione dell'utilizzo irriguo risulta solo in parte condizionata dalle caratteristiche pedologiche e climatiche dei siti (benché quantità e frequenza delle piogge nella stagione colturale giochino talvolta un ruolo chiave) e si attesta usualmente attorno al 20-40% rispetto alla gestione irrigua tradizionale. Di conseguenza, dato il mantenimento della produzione e la riduzione dei volumi irrigui applicati attuando tecniche di AWD safe rispetto alla sommersione tradizionale, la *Water Productivity* (kg di granella prodotta rispetto ai m³ di acqua utilizzata) risulta più elevata per le tecniche AWD. Se l'aumento dell'efficienza di utilizzo della risorsa irrigua a livello di campo è sicuramente indubbio, esistono pochi studi relativi alla riduzione dell'utilizzo irriguo conseguibile a tale scala adottando tecniche AWD in maniera massiva su ampie porzioni di territorio. Non è perciò da escludere che i vantaggi conseguibili a scala territoriale adottando tale tecnica possano essere subordinati anche a criteri di tipo geografico e/o gestionale. Questi aspetti, tuttavia, devono essere ulteriormente

indagati tramite studi sviluppati *ad hoc*, che dovrebbero essere basati su sperimentazioni di campo ed estrapolazioni dei risultati a scala territoriale utilizzando modelli idrologici opportunamente sviluppati.

Il maggior rischio di perdite di N per lisciviazione di nitrati, produzione di N₂O e volatilizzazione di ammoniaca con l'adozione dell'AWD è probabilmente legato a uno squilibrio tra l'elevata disponibilità dell'elemento dopo la prima concimazione e il limitato assorbimento da parte delle plantule nei primi stadi vegetativi. D'altra parte, la maggiore disponibilità di ossigeno con l'adozione di tecniche AWD può favorire la mineralizzazione dei residui colturali interrati, contribuendo così ad aumentare la disponibilità di N per la pianta. Sebbene molte ricerche si siano concentrate sul favorire la sincronizzazione tra disponibilità di N e assorbimento da parte della coltura in modo da prevenirne le perdite, ulteriori studi sono necessari per una maggiore comprensione dell'influenza delle gestioni irrigue AWD sui processi che regolano la disponibilità dell'elemento al fine di integrare la crescente domanda di produzione di riso con una gestione più ecocompatibile. È quindi importante modulare la concimazione azotata in funzione dei cicli di AWD al fine di ottimizzare l'efficienza d'uso dell'azoto massimizzandone l'assorbimento da parte della coltura e quindi le rese produttive, e limitandone le perdite in acqua e in atmosfera.

L'adozione di tecniche AWD è in genere in grado di mitigare l'emissione di CH₄, ma l'efficacia di tale azione varia in base al momento in cui vengono effettuate le sommersioni e alla gestione delle alternanze idriche più o meno severe. A questo si aggiunge che, in taluni casi, l'AWD, rispetto alle tecniche di sommersione continua, induce un aumento dell'emissione di N₂O legata a periodi di maggiore ossidazione del suolo. Lo studio specifico della tecnica, nelle sue varianti, e della sua applicabilità sul territorio in esame, potrà condurre ad una corretta applicazione dell'AWD per la minimizzazione dell'impatto della risicoltura sui cambiamenti climatici.

5. Progetti correlati a RISWAGEST: sintesi dei risultati

5.1 Progetto MEDWATERICE (2019-in corso)

In questo progetto di durata triennale è stata allestita una piattaforma sperimentale presso in Centro Ricerche sul Riso di Castello d'Agogna (PV) volta a monitorare a scala di campo gli effetti di tre diverse gestioni irrigue, quali la semina in acqua e sommersione continua (WFL), la semina interrata e sommersione ritardata alla 3-4^o foglia del riso (DFL) e la semina in acqua e Alternate Wetting and Drying (AWD-safe). Al fine di delineare uno scenario che valuti contemporaneamente gli aspetti ambientali e produttivi, tra le numerose variabili prese in considerazione nel corso di questo progetto, si stanno in particolare analizzando:

- i diversi termini del bilancio idrico, con particolare attenzione all'utilizzo irriguo;
- la resa delle colture, le componenti della produzione e la qualità della granella.

I risultati per l'anno 2019 hanno mostrato che l'utilizzo irriguo nel caso del WFL è stato di poco superiore a quello di DFL. L'utilizzo irriguo per l'AWD, come atteso, è risultato inferiore alle altre due gestioni. In particolare, considerando un approccio integrato composto da misure di campo dei flussi irrigui nelle parcelle sperimentali e da modellistica idrologica, messo a punto per comparare le tre gestioni irrigue in condizioni di suolo analoghe, per

l'annata agraria 2019 si sono quantificati per il DFL e l'AWD risparmi idrici del 10% e del 19% rispetto al WFL, che ha mostrato un utilizzo irriguo di 2941 mm.

Da un punto di vista produttivo, il riso coltivato in regime di AWD non ha riscontrato alcun calo delle rese unitarie rispetto ai sistemi tradizionalmente utilizzati in risicoltura. Infatti, la raccolta dei dati 2019 non ha evidenziato differenze produttive significative, visto che tutte le tesi hanno mostrato una produzione media di risone pari a 9,9 t/ha. La strategia irrigua adottata ha inciso sulla resa globale della granella, in quanto, nonostante le differenze siano rimaste contenute, la tesi gestita in AWD (71,8%) è apparsa inferiore rispetto alle tesi WFL (72,3%) e DFL (72,3%). La gestione delle tesi in AWD ha influito negativamente anche sulla resa dei grani interi; infatti la resa per le tesi in AWD è apparsa statisticamente inferiore rispetto alle altre due tesi di circa il 2%. Gli attacchi tardivi di Brusone possono aver contribuito negativamente sui parametri in questione. Infine, è stata evidenziata una maggiore incidenza di granelli gessati nelle tesi WFL e AWD rispetto la tesi DFL, probabilmente causati da spighette presenti in accestimenti tardivi.

5.2 Progetto RISTEC (2018-2019)

Progetto dimostrativo biennale finanziato da Regione Lombardia per mezzo del Programma di Sviluppo Rurale 2014-2020 (Operazione 1.2.01 – “Progetti dimostrativi e azioni di informazione”) realizzato in collaborazione tra Ente Nazionale Risi (capofila), Università degli Studi di Milano e Università degli studi di Torino. Il Progetto RISTEC “Nuove tecniche colturali per il futuro della risicoltura” si è focalizzato sulle agrotecniche quali la sommersione invernale delle risaie, il sovescio di colture intercalari e le lavorazioni conservative (minima e non lavorazione), in quanto ritenute particolarmente idonee per raggiungere una maggiore sostenibilità agronomica, ambientale e economica della produzione risicola.

La Sommersione Invernale

La prova dimostrativa è stata allestita presso i campi del Centro Ricerche sul Riso di Castello d'Agogna, mediante un confronto tra la tecnica di sommersione invernale e la tradizionale gestione in asciutta dei campi. Ciascuna tecnica ha poi previsto la combinazione di due ulteriori livelli di confronto: la gestione delle paglie (in piedi o trinciate) e la fertilizzazione azotata (0, 130 e 160 kg/ha di azoto). I campi sono stati mantenuti in sommersione dal mese di novembre fino a metà febbraio. Inoltre, è stato effettuato il monitoraggio dei livelli di falda e degli utilizzi irrigui in tre aree in cui nel corso degli ultimi anni è stata adottata la tecnica della sommersione invernale, la prima presso il Centro Ricerche sul Riso e pari a 1,2 ha, le altre due aree presso l'Azienda Agricola Braggio nel comune di Zeme (PV), rispettivamente pari a 85 ha e 35 ha. I risultati del biennio non hanno evidenziato effetti positivi della sommersione invernale sulla produttività della coltura. Tuttavia, la tecnica ha influenzato chiaramente la degradazione delle paglie: l'effetto di volano termico dato dalla sommersione del campo nel periodo invernale ha indotto ad un aumento delle temperature in campo di circa 4°C, favorendo l'attività di decomposizione dei residui colturali da parte dei microrganismi del suolo. La maggiore degradazione delle paglie non ha apportato miglioramenti sulla disponibilità di azoto in primavera. Tuttavia, è stato notato un aumento dell'azoto, nel periodo invernale, presente in forma ammoniacale. Pertanto, sebbene non ci

sia stato un aumento significativo di azoto disponibile per la coltura, la tecnica è sembrata utile nel limitare il rischio di perdite di nitrati per lisciviazione durante l'inverno. A differenza di quanto osservato in altri areali, la sommersione invernale non ha indotto ad un aumento delle emissioni di metano in atmosfera nel periodo invernale, favorendo inoltre minori emissioni anche durante la stagione estiva, grazie ad una maggior degradazione dei residui colturali. In particolar modo nelle parcelle in cui la paglia è stata trinciata, è stata osservata una riduzione maggiore di emissioni di metano nel corso della stagione colturale. Infine, per quanto riguarda gli effetti sul bilancio idrogeologico, l'efficienza di percolazione è risultata alta nei campi in cui da alcuni anni è stata adottata la tecnica della sommersione invernale (96%), registrando dei tassi di percolazione invernale più alti rispetto a quelli misurati nei mesi estivi. Nel caso di aree sommerse sufficientemente estese, la falda è in grado di raggiungere livelli simili o leggermente inferiori a quelli estivi. Tuttavia, l'esaurimento dei volumi invasati è risultato molto più veloce, verificandosi nel giro di 1 mese, a fronte dei 2-2.5 mesi impiegati nel periodo estivo.

Pertanto, per mantenere i livelli di falda più elevati all'inizio della stagione agraria ed aumentare così l'efficienza dell'irrigazione, la sommersione invernale dovrebbe essere mantenuta più a lungo nel tempo e coinvolgere aree più vaste.

Il Sovescio

La prova dimostrativa è stata allestita presso l'Azienda Agricola Bandi nel comune di Nicorvo (PV) e ha previsto il confronto fra due sistemi in monosuccessione di riso, uno gestito con sovescio di veccia villosa (*Vicia villosa* Roth), seminata direttamente sulle stoppie nel periodo autunnale e successivamente interrata nelle ultime due settimane di aprile, e uno senza sovescio (testimone). In combinazione ai due sistemi, è stata allestita una prova di concimazione azotata, con l'utilizzo di quattro livelli di azoto (0; 80; 120; 160 kg/ha di azoto) sulla varietà Sole CL e due livelli di azoto (0; 120 kg/ha di azoto) sulla varietà CL15. Il sovescio di veccia ha avuto un chiaro effetto sulla produttività del riso e sulle sue componenti, influenzando positivamente l'investimento finale ed il numero di spighette per pannocchia.

Per quanto riguarda lo stato nutritivo della coltura, le tesi che hanno previsto l'utilizzo del sovescio hanno mostrato risultati migliori per tutti i parametri indagati. In particolar modo, nel corso della stagione colturale le tesi con l'utilizzo della cover crop hanno mostrato un maggiore vigore colturale (indice SPAD), in quanto la coltura ha potuto giovare di una maggiore disponibilità di azoto durante l'intero ciclo colturale. Nella tesi con l'utilizzo del sovescio è stata, infatti, riscontrata una maggiore disponibilità di azoto ammoniacale in campo, derivante dalla degradazione della biomassa fresca sovesciata, e una maggiore mineralizzazione netta rispetto al trattamento senza veccia. L'azoto derivante dal sovescio risulta disponibile per tutta la stagione colturale, con un determinante effetto nutritivo in particolar modo nella seconda parte del ciclo colturale. Dell'azoto apportato con il sovescio, la coltura è stata in grado di assorbirne fino al 48%; si tratta di un dato molto interessante, in quanto potrebbe comportare un risparmio di azoto apportato mediante concime minerale pari a circa 50-80 kg/ha. Pertanto, tutti questi risultati sottolineano ancora una volta come l'utilizzo di una coltura da sovescio concorra nel miglioramento della sostenibilità agro-ambientale della risaia.

L'Agricoltura conservativa

La prova dimostrativa ha visto il confronto tra aratura convenzionale, minima lavorazione e semina su sodo, valutate su due varietà differenti: Sole CL e CL15. In combinazione alle lavorazioni, per ogni trattamento sono stati valutati tre livelli di concimazione azotata (0, 120 e 160 kg/ha di azoto). L'aratura è stata effettuata in primavera ad una profondità di 30 cm alla quale è seguito l'affinamento del terreno e la semina interrata con seminatrice combinata. Nella minima lavorazione è stato eseguito un passaggio di erpice combinato con dischi, ancore e rulli, operante a circa 10 cm di profondità, senza organi lavoranti azionati dalla presa di potenza, mentre la semina su sodo è avvenuta con l'utilizzo di seminatrice specifica.

I risultati produttivi hanno confermato i risultati ottenuti dagli studi precedentemente svolti nell'appezzamento indagato: la semina su sodo è risultata essere la tecnica meno produttiva, mentre la minima lavorazione ha ottenuto risultati produttivi pari alla tradizionale aratura. Nella minima lavorazione si è verificato un investimento iniziale non ottimale che la coltura ha pienamente compensato con un maggiore accostamento, eguagliando l'investimento finale della lavorazione tradizionale. Nella semina su sodo il risultato produttivo è stato fortemente influenzato dall'investimento finale della coltura: nel corso del ciclo colturale è stato rilevato, infatti, un investimento iniziale inferiore alle altre due tecniche che non ha permesso alla coltura di raggiungere un investimento finale ottimale. Le altre componenti della produzione sono risultate maggiori nella semina su sodo, registrando un maggior numero di spighe per pannocchia ed un maggior peso dei 1000 semi rispetto alle altre due tecniche, risultati tuttavia non sufficienti per raggiungere il target produttivo delle altre due tecniche. Inoltre, nella semina su sodo sono stati riscontrati altri problemi dovuti al compattamento del suolo e alla capacità di assorbimento dei nutrienti, influenzata maggiormente dalla tecnica colturale piuttosto che dal livello di fertilizzazione. Per quanto riguarda il livello di fertilizzazione adottato, l'apporto di un surplus di azoto, pari a 40 kg/ha di azoto, non ha consentito di ottenere un vantaggio produttivo significativo quando associato a ciascuna delle tre differenti lavorazioni.

5.3 Progetto BABYRICE (2017-2018)

Il progetto BABYRICE "Riso *baby food*: un mercato da riconquistare" ha fornito informazioni importanti sull'influenza delle proprietà del suolo, della gestione idrica, della fertilizzazione e del genotipo sull'accumulo di As e Cd in granella. La concentrazione di As totale nei suoli, a parità di altre condizioni, è stata una discriminante importante nella totalità dei casi esaminati. Nei suoli a bassa concentrazione del contaminante, in tutti i campioni di granella analizzati, si sono registrate concentrazioni di arsenico totale in media del 12,4% inferiori rispetto a quelle misurate nella granella proveniente da suoli a più alta concentrazione di As, mentre per l'arsenico inorganico nei suoli con minori concentrazioni di As il contenuto medio della era dell'11.1% inferiore nell'83% dei casi. Si è avuta conferma che si hanno maggiori difficoltà a contenere la concentrazione di arsenico nei suoli più pesanti, più organici, che drenano con difficoltà, mentre in quelli sciolti si produce solitamente una granella con meno arsenico, ma con un rischio maggiore di superare il limite per il cadmio.

Per quanto riguarda la gestione dell'acqua, l'effetto delle asciutte di metà levata, rispetto alla sommersione continua, si è evidenziato meglio nel caso della semina interrata rispetto alla semina in acqua:

- Con la semina in acqua, grazie alle asciutte si sono ottenute riduzioni medie dell'arsenico totale del 14,4% e di quello inorganico del 17,4% rispettivamente nel 50% e 38% dei campioni analizzati;
- Con la semina interrata a file, si sono avute diminuzioni medie di arsenico totale del 12,1% e di As inorganico del 11,2% rispettivamente nell'85,7% e 57,1% dei campioni analizzati.

L'asciutta abbinata alla semina interrata ha dunque portato a un maggior numero di successi nella riduzione dell'arsenico rispetto alla semina in acqua. Inoltre, al fine di evitare indesiderati incrementi di cadmio, bisogna tenere presente che l'asciutta si deve concludere prima di inizio botticella e che il momento ottimale per risommergere è in prossimità della fase fenologica di microsporogenesi. Un'asciutta troppo tardiva, infatti, non solo non permette di ottenere sensibili diminuzioni di As nella granella, ma ha elevate probabilità di causare incrementi di Cd.

Per quanto riguarda il confronto tra diverse varietà, se consideriamo solamente l'arsenico inorganico, che è la forma normata dalla legge, emerge chiaramente che, fra i Lunghi B, la varietà che ha accumulato i quantitativi di As minori è CLXL 745, con una riduzione del 15,9% nel 2017 e del 12% nel 2018 rispetto alla media di tutti i campioni analizzati, mentre il maggior accumulo si è avuto con la varietà CL 26, che conteneva 14,9% di As inorganico in più rispetto alla media nel 2017 e il 14% nel 2018.

All'interno del gruppo dei tondi la varietà Terra CL ha accumulato quantità di As inorganico inferiori rispetto alla media del 50,6% nel 2017 e del 35,1% nel 2018, mentre Selenio è la varietà che ha accumulato più arsenico inorganico: il 47,3% in più rispetto alla media di tutti i campioni analizzati nel 2017 e il 21,3% nel 2018.

Per quanto riguarda il cadmio, la tendenza osservata è opposta: le varietà che hanno accumulato molto arsenico hanno accumulato pochissimo cadmio e viceversa, infatti tra i Lunghi B la varietà con il minor accumulo di cadmio è il CL26, mentre fra i tondi è Selenio

5.4 Progetto WATPAD (2015-2017)

Finanziato da Fondazione Cariplo nel contesto del Bando 2014 "Ricerca sull'inquinamento dell'acqua e per una corretta gestione della risorsa idrica", realizzato in collaborazione tra UNIMI (capofila), ENR e UPO (Università del Piemonte Orientale), è finalizzato al monitoraggio dei flussi idrici e di fitofarmaci a diverse scale spaziali in ambienti di risaia. La sperimentazione a scala di campo e di azienda è stata condotta per due anni (2015 e 2016) in un'azienda produttiva a Semiana (PV). Nel corso del progetto si è messo a punto un sistema di monitoraggio per la misura dei flussi idrici alla scala di campo e di azienda basato sull'installazione di strumenti per la misura di tutte le componenti del bilancio idrologico. I dati raccolti hanno consentito di determinare l'efficienza di uso dell'acqua (rapporto, nella stagione irrigua, tra l'evapotraspirazione della risaia e la quantità di acqua disponibile

espressa come somma di irrigazione e pioggia) di singole camere e dell'unità aziendale. Le camere di risaia nell'azienda hanno dislivelli topografici importanti tra loro. Si è osservata un'efficienza bassa per le camere a quote più elevate, con falda meno superficiale e su substrati più grossolani (18%-24%), più elevata per le camere a metà del pendio con suoli più impediti e falda prossima al piano campagna (60%), e molto elevata (>100%) per le camere poste a quote più basse, grazie al loro riutilizzo dei flussi idrici provenienti dalle camere poste più a monte. A scala aziendale, in seguito alla topografia degli appezzamenti e ai recuperi interni, l'efficienza irrigua si è attestata attorno al 40%. Per quanto riguarda la scala comprensoriale, nel progetto ci si è concentrati sulla porzione occidentale del distretto irriguo di San Giorgio di Lomellina (circa 1000 ha, di cui il 90% a riso). Per il distretto pilota si è messo a punto un sistema di simulazione in grado di stimare il fabbisogno irriguo dei territori a riso, l'efficienza di adduzione e distribuzione delle reti e l'interazione con la falda freatica. Il sistema è stato utilizzato per simulare gli effetti sull'utilizzo irriguo e sulla profondità di falda di scenari di conversione dei metodi irrigui.

5.5 Progetto GREENRICE (2014-2017)

L'Ente Nazionale Risi nell'ambito del progetto "Greenhouse gas emissions from paddy rice soils under alternative irrigation management" (GreenRice) ha messo a disposizione per due stagioni colturali (2015-2016) una piattaforma sperimentale in cui sono state valutate dal punto di vista agronomico ed ambientale diverse alternative di gestione dell'acqua. In particolare, si è fornito tutto il supporto agronomico all'attività sperimentale dei gruppi di ricerca afferenti all'Università di Ghent ed all'ETH di Zurigo. Come previsto dal progetto, l'attività sperimentale specifica di GreenRice, coordinata dalle Istituzioni sopra citate, si è intersecata con altri due progetti sviluppati nella piattaforma di Castello d'Agogna: GS-Ruse, con la finalità di valutare l'efficienza della concimazione azotata in relazione alla gestione dell'acqua praticata ed il progetto "Ammoniaca", relativo alla quantificazione delle emissioni del gas in conseguenza delle applicazioni di urea in copertura ed a seconda del diverso regime irriguo instaurato. L'attività di networking, oltre agli articoli ed alle presentazioni specifiche sotto elencate, ha contemplato una fase di training specifica a risicoltori aderenti alla piattaforma internazionale per la produzione di alimenti "sostenibili" "Sustainable Agriculture Initiative (SAI) Platform, che prevede, come obiettivo primario, la riduzione delle emissioni di gas serra. L'esperienza maturata nell'ambito del progetto è stata oggetto anche di un confronto con altri ricercatori dei paesi risicoli temperati nell'ambito della VI edizione del TRC (Temperate Rice Conference).

5.6 Progetto POLORISO (2012-2013)

Nell'ambito del progetto Poloriso sono stati valutati sistemi alternativi di gestione dell'acqua sulla produttività delle principali varietà di riso, sulla loro sostenibilità ambientale e sulla qualità merceologica e sanitaria del prodotto. La sperimentazione ha confrontato, attraverso prove parcellari, tre sistemi colturali e irrigui: I) semina in acqua e sommersione continua (FLD); II) semina interrata a file e sommersione in 3°-4° foglia (DRY); III) semina interrata a file e irrigazione turnata (IRR), in combinazione con quattro varietà (Gladio, Baldo, Selenio e Loto). Sono state quantificate le prestazioni produttive e qualitative dei trattamenti per

ciascuna varietà, l'utilizzo dei mezzi produttivi, la pressione delle avversità biotiche e la contaminazione delle acque da nitrati. Inoltre, allo scopo di determinare l'efficienza d'uso dell'azoto, per ciascuna varietà sono state previste due parcelle con diverso apporto di fertilizzante: il testimone non concimato e la dose ottimale di azoto.

In generale, la tecnica di semina interrata e sommersione posticipata (DRY) hanno determinato i migliori risultati produttivi per la varietà Baldo e Loto, mentre per le varietà Gladio e Selenio non si è differenziata statisticamente da FLD. IRR si è dimostrata la tecnica meno produttiva per tutte le varietà considerate. In entrambi gli anni di studio, i trattamenti FLD e DRY non sono risultati statisticamente differenti tra loro in tutte le varietà analizzate, sia nelle parcelle concimate sia nei testimoni. Inoltre, rispetto al 2012, le due tecniche in sommersione hanno ottenuto simili performance produttive, mentre IRR ha registrato ancora una volta produzioni significativamente inferiori rispetto agli altri due trattamenti. I valori di efficienza d'uso dell'azoto sono stati buoni in entrambe le annate non presentando differenze significative tra le tesi. I risultati ottenuti dalla sperimentazione hanno mostrato come la tecnica di gestione dell'acqua possa influenzare il contenuto di As e Cd in granella. Le maggiori concentrazioni di arsenico totale sono state ottenute per la tesi con sommersione continua, mentre la gestione a bagnature, come atteso, ha fatto registrare il minor contenuto. Per quanto riguarda il Cd, le maggiori concentrazioni nella granella sono state rilevate nelle tesi con l'asciutta di metà levata fino a botticella in semina interrata. Inaspettatamente, in entrambi gli anni la tesi con irrigazione turnata non ha portato all'accumulo delle concentrazioni più alte nella granella, nonostante il suolo si trovasse in condizioni di aerobiosi per tutto il ciclo colturale.

5.7 Progetto BIOGESTECA (2011-2012)

Le attività sono state svolte in due siti sperimentali, uno presso il Centro Ricerche sul Riso di Castello d'Agogna e l'altro presso il CREA-CI di Vercelli. Presso l'Ente Risi sono stati confrontati tre sistemi di coltivazione del riso per due stagioni agrarie in relazione alle modalità di semina e gestione dell'acqua:

- Semina in acqua e sommersione continua (FLD);
- Semina interrata e sommersione alla 3°-4° foglia (DRY);
- Semina interrata e irrigazione intermittente (riso aerobico) IRR.

Il confronto ha coinvolto quattro varietà rappresentative i gruppi merceologici più diffusi in Italia (Gladio, Loto, Selenio e Baldo) e ha riguardato l'efficienza della concimazione azotata e di uso dell'acqua, gli effetti sulla qualità delle acque e sull'entità della ricarica della falda acquifera superficiale, l'intensità e le composizioni delle popolazioni infestanti, nonché le produzioni, sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo.

Nel 2011 le migliori produzioni sono state ottenute con la tecnica tradizionale (semina in acqua e sommersione continua, FLD). I maggiori risultati produttivi sono stati ottenuti da Baldo. Le altre due tecniche hanno portato a prestazioni inferiori, con rese unitarie comparabili nel caso di Baldo e Loto. Nel 2012 è stato rilevato un notevole incremento produttivo del DRY rispetto all'anno precedente, mentre FLD e IRR hanno confermato il

risultato ottenuto nel 2011. Anche nel 2012 i minori risultati produttivi sono stati ottenuti dalla tecnica con irrigazioni turnate, soprattutto per Gladio e Baldo. Le produzioni della tesi IRR sono risultate sempre le più basse sia per le parcelle concimate, sia per le testimone, presentando risultati inferiori da 1,9 a 3,6 t/ha rispetto alla tecnica più produttiva. Per quanto riguarda l'efficienza d'uso dell'azoto, le più basse percentuali di recupero sono state registrate in semina in acqua. A tale andamento vi è stato uno scostamento del risultato ottenuto dal Gladio nel 2012, dove il valore più basso è stato riportato dalla gestione con irrigazioni turnate.

Presso il CREA-CI di Vercelli sono stati confrontati due sistemi di coltivazione del riso in relazione alle modalità di semina e gestione dell'acqua:

- Semina interrata e sommersione alla 3°-4° foglia (DRY);
- Semina interrata e irrigazione intermittente (riso aerobico, IRR) somministrata al raggiungimento di un potenziale idrico del suolo di circa -40 kPa a una profondità di 20 cm.

Il confronto tra i due sistemi di gestione ha coinvolto nove varietà di riso (Selenio, Centauro, Loto, Baldo, Carnaroli, Roma, Vialone Nano, Gladio, Salvo) per due stagioni successive e, tra i numerosi parametri indagati, ha riguardato anche la produzione, la resa alla lavorazione, la qualità del riso lavorato, il numero di culmi/m².

La gestione con irrigazioni turnate ha determinato una riduzione della resa media che si è attestato sul 50% nel 2011 e sul 14% nel 2012 a cui hanno contribuito forti attacchi di brusone. Nel 2012 le varietà Centauro, Loto, Roma, Salvo e Selenio hanno dimostrato di possedere un potenziale produttivo elevato superando la media di campo nella prova in condizioni IRR. Le varietà Salvo e Selenio sono quelle che hanno mostrato divario minimo tra le rese delle due tecniche di coltivazione a confronto. La sterilità, l'allettamento e il numero di culmi fertili, tranne in alcuni casi, non sono stati influenzati dalla tecnica irrigua, mentre il numero dei grani macchiati ha subito un drastico aumento nel caso della gestione IRR con risultati particolarmente negativi sulla varietà Loto e Baldo. Per la varietà selenio, la condizione IRR ha determinato forti aumenti nei livelli di Cd, Ni e riduzioni dei livelli di As, Co e Mo; la condizione DRY ha determinato aumenti significativi di As e Pb. Inoltre la varietà Selenio ha mostrato una maggiore capacità rispetto alle altre tre di escludere il Cd dalla granella integrale nella condizione IRR. Contrariamente al Cd, i livelli di As totale sono risultati più elevati nella granella integrale quando le piante sono cresciute in condizioni DRY e FLD, piuttosto che in IRR. Baldo ha mostrato maggiori capacità di esclusione dell'As dalla cariosside rispetto alle altre tre.

Considerando il biennio 2012-2013, l'utilizzo irriguo della tecnica WFL, quantificato considerando le portate irrigue immesse in campo meno quelle restituite nel canale adacquatore, si è attestato in media attorno a 2275 mm. Una riduzione del consumo irriguo del 20% e del 70% si è osservata rispettivamente per le gestioni DRY e IRR. Di conseguenza, le migliori prestazioni in termini di produttività dell'acqua WP (kg m⁻³) si sono ottenute con la tecnica IRR, poiché WP ha raggiunto valori di 0,88 kg m⁻³ in entrambi gli anni contro valori di 0,43 e 0,66 kg m⁻³ per la tecnica DRY rispettivamente nel 2012 e nel 2013.

I valori di WP per WFL si sono attestati intorno a $0,33 \text{ kg m}^{-3}$ nel 2012 e $0,59 \text{ kg m}^{-3}$ nel 2013, in accordo con i risultati riportati anche da altri autori per la stessa tecnica irrigua.

6. Bibliografia

- Ahmed S., Humphrey E., Muhammad Salim M., Bhagirath S. Chauhan B.S., 2016. Growth, yield and nitrogen use efficiency of dry-seeded rice as influenced by nitrogen and seed rates in Bangladesh. *Field Crops Research* 186, 18–31.
- Atwill R.L., Krutz L.J., Bond J.A., Reddy K.R., Gore J., Walker T.W., Harrell D.L., 2018. Water management strategies and their effects on rice grain yield and nitrogen use efficiency. *Journal of Soil and Water Conservation* 73 (3), 257-264.
- Balaine N., Carrijo D.R., Adviento-Borbe M.A., Linnquist B., 2019. Greenhouse Gases from Irrigated Rice Systems under Varying Severity of Alternate-Wetting and Drying Irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 83, 1533-1541.
- Belder, P., Bouman, B., Cabangon, R., Guoan, L., Quilang, E., Yuanhua, L., Spiertz, J., Tuong, T., 2004. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural Water Management*, 65(3), pp.193-210. Bouman B., Tuong T.P., 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agric. Water Manag.* 49, 11-30.
- Bouman B., Tuong T.P., 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agric. Water Manag.* 49, 11-30.
- Cabangon, R., Castillo, E., Tuong, T., 2011. Chlorophyll meter-based nitrogen management of rice grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, 121(1), pp.136-146.
- Cabangon, R., Tuong, T., Castillo, E., Bao, L., Lu, G., Wang, G., Cui, Y., Bouman, B., Li, Y., Chen, C., Wang, J., 2004. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. *Paddy and Water Environment*, 2(4), pp.195-206.
- Cao X., Wu L., Lu R., Zhu L., Zhang J., Jin Q., 2020. Irrigation and fertilization management to optimize rice yield, water productivity and nitrogen recovery efficiency. *Irrigation Science*, doi.org/10.1007/s00271-020-00700-4
- Carrijo D.R., Li C., Sanjai J. Parikh S.J., Linnquist B.A., 2019. Irrigation management for arsenic mitigation in rice grain: Timing and severity of a single soil drying. Short communication, *Science of the Total Environment* 649, 300-307.
- Carrijo D.R., Akbar, N., Reis A., Li C., Amélie C.M., Gaudin A.C.M., Sanjai J. Parikh S.J., Peter G. Green P.G., Linnquist B.A., 2018. Impacts of variable soil drying in alternate wetting and drying rice systems on yields, grain arsenic concentration and soil moisture dynamics. *Field Crops Research* 222, 101-110.
- Carrijo D. R., Lundy M. E., Linnquist B. A., 2017. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: A meta-analysis. *Field Crops Research* 203, 173-180.
- Chen P., Nie T., Chen S., Zhang Z., Qi Z., Liu W., 2019. Recovery efficiency and loss of ¹⁵N-labelled urea in a rice-soil system under water saving irrigation in the Songnen Plain of Northeast China. *Agricultural Water Management* 222, 139-153.
- Chlapecka J.L., Hardke J.T., Roberts T.L., Frizzell D.L., Castaneda-Gonzalez E., Clayton T., Hale K., Frizzell T., Duren M., Mann M., Clark S., Ablao A., 2019. Allowable Water Deficit When Utilizing Alternative Rice Irrigation Strategies. B.R. Wells Arkansas Rice Research Studies 2019, 170-174.

- Chu, G., Wang, Z., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., Zhang, J., 2015. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food and Energy Security*, 4(3), pp.238-254.
- de Borja Reis A., Munhoz de Almeida R.E., Cocco Lago B., Trivelinc P.C., Liguist B., Laercio Favarina J., 2018. Aerobic rice system improves water productivity, nitrogen recovery and crop performance in Brazilian weathered lowland soil. *Field Crops Research* 218, 59–68.
- De Datta, S.K. 1981. *Principles and Practices of Rice Production*. A Wiley-Interscience Publication.
- de Vries, M., Rodenburg, J., Bado, B., Sow, A., Leffelaar, P., Giller, K., 2010. Rice production with less irrigation water is possible in a Sahelian environment. *Field Crops Research*, 116(1-2), pp.154-164.
- Devkota, K.P., 2011. *Resource Utilization and Sustainability of Conservation Based Rice-Wheat Cropping Systems in Central Asia*. ZEF/Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Germany, pp. 167.
- Dong W., Guo J., Xu L., Song Z., Zhang J., Tang A., Zhang X., Leng C., Liu Y., Wang L., Wang L., Yang Yu Y., 2018. Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: Field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China. *Journal of environmental sciences* 64, 289-297.
- Fageria N.K., 2007. Yield of rice. *J. Plant Nutr.* 30, 843-879.
- Faiz-ul Islam S., de Neergaard A., Ole Sander B., Stoumann Jensen L., Reiner Wassmann R., Jan Willem van Groenigen J.W., 2020. Reducing greenhouse gas emissions and grain arsenic and lead levels without compromising yield in organically produced rice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 295, 106922.
- Fangueiro D., Becerra D., Albarran A., Pena, D., Sanchez-Llerena, J., Rato-Nunes, J.M., Lopez- Pineiro, A., 2017. Effect of tillage and water management on GHG emissions from Mediterranean rice growing ecosystems. *Atmos. Environ.* 150, 303–312.
- Frizzell T.D., Hardke J.T., Plummer W.J., Frizzell D.L., Castaneda-Gonzalez E., Hale K.F., 2018. *Agromomics of Alternate Wetting and Drying*. AAES Research Series 659, 279-282.
- Graham-Acquaah S., Siebenmorgen T.J., Reba M.L., Massey J.H., Mauromoustakos A., Adviento-Borbe A., January R., Burgos R., Baltz-Gray J., 2019. Impact of alternative irrigation practices on rice quality. *AACCI-Cereals&Grains Association* 00, 1-9.
- Hameed F., Xu J., Fahad Rahim J., Wei Q., ur Rehman Khalil A., Liao Q., 2019. Optimizing Nitrogen Options for Improving Nitrogen Use Efficiency of Rice under Different Water Regimes. *Agronomy*, 9, 39.
- Hamoud Y.A., Shaghaleh H., Sheteiwy M., Guo X., Elshaikh N.A., Khan N.U., Oumarou A., Rahim S.F., 2019. Impact of alternate wetting and soil drying and and clay content on the morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nutrient use-efficiency. *Agricultural Water management* 223, 105706.
- Hoang T.T.H., Do D.T., Tran T.T.G., Ho T.D., ur Rehman H., 2019. Incorporation of rice straw mitigates CH₄ and N₂O emissions in water saving paddy fields of Central Vietnam, *ARCHIVES OF AGRONOMY AND SOIL SCIENCE* 65, 1, 113–124.
- Howell, K., Shrestha, P. and Dodd, I., 2015. Alternate wetting and drying irrigation maintained rice yields despite half the irrigation volume, but is currently unlikely to be

adopted by smallholder lowland rice farmers in Nepal. *Food and Energy Security*, 4(2), pp.144-157.

- Humphreys J., Brye K.R., Rector C., Gbur E.E., Hardke J.T., 2018. Water Management and Cultivar Effects on Methane Emission from Direct-seeded, Delayed-flood Rice Production in Arkansas. *Journal of Rice Research and Developments*, 1(1): 14-24.
- Jiang Y., Daniela Carrijo D., Huang S., Chene J., Nimlesh Balaine N., Zhang W., van Groenigen K.J., Bruce Linquist B., 2019. Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis. *Field Crops Research* 234, 47–54.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), pp.259-263.
- Lagomarsino A., Agnelli A. E., Linquist B., Adviento-Borbe M. A., Agnelli A., Gavina G., Ravaglia S., Ferrara R. M., 2016. Alternate Wetting and Drying of Rice Reduced CH₄ Emissions but Triggered N₂O Peaks in a Clayey Soil of Central Italy. *Pedosphere*, 26(4), 533-548.
- LaHue G. T.; Chaney R. L.; Adviento-Borbe M. A.; Linquist B. A. (2016). Alternate wetting and drying in high yielding direct-seeded rice systems accomplishes multiple environmental and agronomic objectives. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 229, 30-39.
- Lampayan R.M., Samoy-Pascual K.C., Sibayan E.B., Ella V.B., Jayag O.P., Cabangon R.J., Bouman B.A.M., 2015. Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines. *Paddy and Water Environment* 13, 215-227.
- Liang K., Zhong X., Huang N., Lampayan R.M., Pan J., Tian K., Liu Y., 2016. Grain yield, water productivity and CH₄ emission of irrigated rice in response to water management in south China. *Agricultural Water Management* 163, 319-331.
- Liang K., Zhong X., Huang N., Lampayan R.M., Liu Y., Pan J., Peng B., a, Xiangyu Hua X., Fu Y., 2017. Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system. *Science of the Total Environment* 609, 46–57.
- Liao B., Wu X., Yu Y., Luo S., Hu R., Lu G., 2020. Effect of mild alternate wetting and drying irrigation and mid-season drainage on CH₄ and N₂O emissions in rice cultivation. *Science of Total Environment* 698, 134212.
- Linquist B.A., Anders M.M., Adviento-Borbe M.A.A., Chaney R.L., Nalley L.L., Da Rosa E.F.F., Van Kessel C., 2015. Reducing greenhouse gas emissions, water use and grain arsenic levels in rice systems. *Global Change Biology*, 21, 407-417.
- Malumpong C., Ruensuk N., Rossopa B., Channu C., Intarasathit W., Wongboon W., Poathong K., Kunket K., 2020. Alternate Wetting and Drying (AWD) in Broadcast rice (*Oryza sativa* L.) Management to Maintain Yield, Conserve Water, and Reduce Gas Emissions in Thailand. *Agric Res* doi.org/10.1007/s40003-020-00483-2.
- Matsuo N, Mochizuki T., 2009. Growth and Yield of Six Rice Cultivars under Three Water-saving Cultivations. *Plant Production Science*. <https://doi.org/10.1626/pps.12.514>.
- Mazza G., Agnelli A.E., Orasen G., Gennaro M., Val G., Lagomarsino A., 2016. Reduction of Global Warming Potential from rice under alternate wetting and drying practice in a

sandy soil of northern Italy. *Ital. J. Agrometeorology-rivista Italiana di Agrometeorologia* 21, 35–44.

- Miniotti E. F., Romani M., Said-Pullicino D., Facchi A., Bertora C., Peyron, M., Sacco D., Bischetti G. B., Lerda C., Tenni D., Gandolfi C., 2016. Agro-environmental sustainability of different water management practices in temperate rice agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 222, 235-248.
- Norton G.J., Shafaei M., Travis A.J., Deacon C.M., Danku J., Pond D., Cochrane N., Lockhart K., Salt D., Zhang H., Dodd I.C., Hossain M., Islam M.R., Price A.H., 2017. Impact of alternate wetting and drying on rice physiology, grain production and grain quality. *Field Crops Research* 205, 1-13.
- Oliver V., Cochrane N., Magnusson J., Brachi E., Monaco S., Volante A., Curtois B., Vale G., Price A., The Y.A., 2019. Effects of water management and cultivar on carbon dynamics, plant productivity and biomass allocation in European rice systems. *Science of Total Environment* 685, 1139-1151.
- Orasen G., De Nisi P., Lucchini G., Abruzzese A., Pesenti M., Maghrebi M., Kumar A., Nocito F.F., Baldoni E., Morgutti S., Negrini N., Valè G., Sacchi G.A., 2019. Continuous Flooding or Alternate Wetting and Drying Differently Affect the Accumulation of Health-Promoting Phytochemicals and Minerals in Rice Brown Grain. *Agronomy* 2019,9, 628.
- Pan J., Liu Y., Zhong X., Lampayan R.M., Singleton G., Huang N., Liang K., Peng B., Tian K., 2017. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N-inputs in South China. *Agricultural Water Management* 184, 191-200.
- Peyron M., Bertora C., Pelissetti S., Said-Pullicino D., Celi L., Miniotti E., Romani M., Sacco D., 2016. Greenhouse gas emissions as affected by different water management practices in temperate rice paddies. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 232, 17-28.
- Richards, M., Sander, B.O., 2014. Alternate wetting and drying in irrigated rice. Implementation guidance for policymakers and investors. <https://cgspace.cgiar.org/rest/bitstreams/34363/retrieve>.
- Rubel, F., Brugger, K., Haslinger, K. and Auer, I., 2017. The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100. *Meteorologische Zeitschrift*, 26(2), pp.115-125.
- Runkle B., 2017. Alternate wetting and drying and methane reductions.
- Sass R.L., Fisher F.M., Wang Y.B., Turner F.T., Jund M.F., 1992. Methane emission from rice fields: the effect of floodwater management. *Glob. Biogeochem. Cycl.* 6, 249–262.
- Shaibu, Y., Mloza Banda, H., Makwiza, C., Malunga, J., 2014. Grain yield performance of upland and lowland rice varieties under water saving irrigation through alternate wetting and drying in sandy clay loams of souther Malawi. *Experimental Agriculture*, 51(2), pp.313-326.
- Sibayan E.B., Kristine Samoy-Pascual K., Grospe F.S., Casil M.E.D., Takeshi Tokida T., Padre A.T. and Kazunori Minamikawa K., 2018. Effects of alternate wetting and drying technique on greenhouse gas emissions from irrigated rice paddy in Central Luzon, Philippines. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64, 1, 39–46
- Silalertruksa T., Gheewala S., Mungkung R., Nilsalab P., Lecksiwilai N., Sawaengsak W., 2017. Implications of Water Use and Water Scarcity Footprint for Sustainable Rice Cultivation. *Sustainability* 9, 2283.

- Simmonds M.B., Anders M., Adviento-Borbe M.A., van Kessel C., McClung A., Linquist B.A., 2015. Seasonal Methane and Nitrous Oxide Emissions of Several Rice Cultivars in Direct-Seeded Systems. *Journal of Environmental Quality* 103-114.
- Song T., Xu F., Yuan W., Chen M., Hu Q., Tian Y., Zhang J., Xu W., 2019. Combining alternate wetting and drying irrigation with reduced phosphorus fertilizer application reduces water use and promotes phosphorus use efficiency without yield loss in rice plants. *Agricultural Water Management* 223, 105686.
- Tanner K.C., Windham-Myers L., Marvin-DiPasquale M., Fleck J.A., Linquist B.A., 2018. Alternate Wetting and Drying Decreases Methylmercury in Flooded Rice (*Oryza sativa*) Systems. *Soil Biology & Biochemistry, Soil Science Society of America Journal* 115-125.
- Tuong T.P., Buoman B.A.M., Mortimer M., 2005. More rice, less water-integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. *Plant Prod. Sci.* 8 (3), 231-241.
- Verhoeven E., Barthel M., Yu L., Celi L., Said-Pullicino D., Romani M., Sleutel S., Six J., Decock C., 2019. Early season N₂O emissions under variable water management in rice systems: source-partitioning emissions using isotope ratios along a depth profile. *Biogeosciences* 16, 384-408.
- Verhoeven E., Decock C., Barthel M., Bertora C., Sacco D., Romani M., Sleutel S., Six J., 2018. Nitrification and coupled nitrification-denitrification at shallow depths are responsible for early season N₂O emissions under alternate wetting and drying management in an Italian rice paddy system. *Soil Biology and Biochemistry* 120, 58-69.
- Wang Z., Gu D., Beebout S.S., Zhang H., Liu L., Yang J., Zhang J., 2018. Effect of irrigation regime on grain yield, water productivity and methane emissions in dry direct-seeded rice grown in raised beds with wheat straw incorporation. *The Crop Journal*, 495-508.
- Wang, Z., Zhang, W., Beebout, S., Zhang, H., Liu, L., Yang, J., Zhang, J., 2016. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates. *Field Crops Research*, 193, pp.54-69.
- Xu, Y., Ge, J., Tian, S., Li, S., Nguy-Robertson, A., Zhan, M., Cao, C., 2015. Effects of water-saving irrigation practices and drought resistant rice variety on greenhouse gas emissions from a no-till paddy in the central lowlands of China. *Science of The Total Environment*, 505, pp.1043-1052.
- Yao, F., Huang, J., Cui, K., Nie, L., Xiang, J., Liu, X., Wu, W., Chen, M., Peng, S., 2012. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Research*, 126, pp.16-22.
- Ye, Y., Liang, X., Chen, Y., Liu, J., Gu, J., Guo, R., Li, L., 2013. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crops Research*, 144, pp.212-224.
- Zhang, H., Xue, Y., Wang, Z., Yang, J., Zhang, J., 2009. An Alternate Wetting and Moderate Soil Drying Regime Improves Root and Shoot Growth in Rice. *Crop Science*, 49(6), pp.2246-2260.