

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

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



**Valutazione dei servizi ecosistemici
di regolazione del ciclo del carbonio:
confronto fra pratiche agricole nell'isola
di Nosy Mitsio, Madagascar**

Relatore:

Prof. Paco Melià

Tesi di Laurea magistrale di:

Marco Colombo 928281.

Anno Accademico 2020 - 2021

Ringraziamenti

Con questa tesi si concludono il mio percorso di studi e la mia avventura universitaria, mi sembra quindi doveroso ringraziare tutte le persone che mi hanno aiutato e sostenuto in questo percorso. Inizio ringraziando il Prof.Melià, il relatore di questa tesi, per avermi dato la possibilità, per la seconda volta nel mio percorso, di essere un suo tesista, per avermi aiutato e supportato soprattutto durante le parti più difficili di questo lavoro. Un ringraziamento particolare anche ad Andrea, in rappresentanza dell'intera associazione, per la sua disponibilità e per avermi fatto conoscere i progetti e il mondo in cui opera l'associazione Kukula e a Jacopo, che con competenza e disponibilità mi ha dato consigli e aiuti fondamentali per finire questo lavoro.

Il ringraziamento più grande va ovviamente a mio fratello e ai miei genitori, che mi hanno dato la possibilità di seguire questo percorso di studi, per avermi supportato e soprattutto sopportato nei momenti difficili di questo percorso.

Grazie a Edo e Ila, mi avete accompagnato fin dai primi giorni di questo percorso universitario e lo avete reso molto più facile e divertente e ora, in qualche modo, siamo finalmente siamo arrivati agli ultimi festeggiamenti al poli.

Grazie ai gibboni, un gruppo di persone entrato nella mia vita in un momento un po' particolare e da lì in poi non ne è più uscito, per fortuna. Ora è un gruppo di amici di cui, tra discussioni assurde e serate su discord, non potrei più fare a meno. Spero che la mia laurea sia un'occasione per una reunion di gruppo generale, anche perché ci sono ancora delle birre da offrire se non sbaglio.

Grazie alla conga e alla compagnia del mare in generale, soprattutto a chi quest'anno mi ha dovuto sopportare mentre anche in vacanza in spiaggia continuavo a parlare e preoccuparmi della mia tesi.

Il ringraziamento finale non può che essere per Smack, Triz, Teo e Simo, anche se è difficile trovare le parole giuste. Siete la mia seconda famiglia, non riuscirei ad immaginarmi i festeggiamenti per questa laurea senza di voi, ma in realtà neanche i festeggiamenti per qualsiasi traguardo futuro nelle nostre vite. Grazie.

Marco out.

Sintesi

Garantire la sicurezza alimentare, migliorare la nutrizione e promuovere l'agricoltura sostenibile sono le tre grandi sfide da affrontare per raggiungere l'obiettivo di sviluppo sostenibile "Fame Zero" (SDG 2). Queste sfide, già di per sé particolarmente ardue, sono ulteriormente complicate nell'attuale contesto di cambiamento globale, i cui effetti vanno ad aggravare situazioni già precarie come quella di alcune zone del continente africano. Inoltre, la produzione alimentare ha a sua volta impatti rilevanti sul clima, attraverso i cambiamenti di uso del suolo e le emissioni climalteranti del settore agricolo e dell'allevamento, e contribuisce quindi in modo fondamentale alla possibilità di raggiungere l'obiettivo di sviluppo sostenibile "Lotta contro il cambiamento climatico" (SDG 13)

La ricerca di strategie produttive efficaci, in grado di coniugare gli aspetti di sicurezza alimentare e sostenibilità ambientale, richiede un approccio multidisciplinare che tenga conto degli ecosistemi e degli agro-ecosistemi non solo nel garantire servizi ecosistemici di approvvigionamento (produzione di cibo), ma anche servizi di regolazione fondamentali come quelli dei cicli biogeochimici. L'obiettivo di questo lavoro è il confronto tra diverse pratiche agricole in termini di servizi di approvvigionamento e servizi di regolazione del ciclo del carbonio. L'approccio è stato applicato nell'isola di Nosy Mitsio, in Madagascar, dove è in corso un progetto di cooperazione internazionale volto a garantire la sicurezza alimentare della popolazione locale. Il confronto riguarda un progetto di realizzazione di orti multifamiliari, la pratica agricola maggiormente utilizzata nell'isola, il cosiddetto *slash and burn*, e un sistema di agroforestazione (un sistema agricolo promiscuo che combina specie erbacee, arbustive e arboree).

Gli scenari considerati sono stati valutati mediante l'uso di indicatori che ne quantificano le prestazioni sia nel campo della sicurezza alimentare, in termini di copertura e bilanciamento della dieta sia nel campo della sostenibilità ambientale, in termini di servizi ecosistemici legati al ciclo del carbonio (rimozione e stoccaggio di carbonio nella biomassa vegetale e nel suolo).

I risultati mostrano come sia l'orticoltura sia l'agroforestazione siano delle valide alternative alla pratica dello *slash and burn* nell'isola di Nosy Mitsio. L'orticoltura garantisce maggiore stabilità nella produzione di cibo e nel bilanciamento della dieta e l'agroforestazione fornisce prestazioni ambientali migliori.

La pratica dell'agroforestazione garantirebbe una produzione di cibo che, seppur meno varia di quella degli orti, è in grado di superare le necessità di un singolo villaggio aprendo alla possibilità di commerciare i beni in eccesso nelle occasioni di viaggio verso l'entroterra. Una combinazione delle due pratiche potrebbe essere quindi la soluzione ideale, per garantire ottime prestazioni in entrambi gli ambiti considerati.

Abstract

Achieving food security and improved nutrition, and promote sustainable agriculture are major challenges to be tackled to attain the sustainable development goal “Zero hunger” (SDG 2).

These challenges, already difficult by themselves, are complicated by the global change context, whose effects can further worsen already uncertain situations like that of substantial part of the African continent.

Furthermore, food production has a great impact on climate through land use change and emissions from livestock breeding and agriculture, strongly affecting the possibility to reach the sustainable development goal “Climate action” (SDG 13).

The research for efficient productive systems, able to combine food security and environmental sustainability, requires a multi-disciplinary approach taking into account the role of ecosystems and agro-ecosystems in guaranteeing both provisioning and regulating ecosystem services. The aim of this work is to compare different agricultural practices in terms of provisioning services and regulating services related to the carbon cycle. This approach is applied to the Nosy Mitsio island, in Madagascar, where an ongoing international cooperation project aims to guarantee food security to the local population. The comparison is made between a project of multi-familiar vegetables garden, the most common agricultural practice in the island (the so-called *slash and burn*) and an agroforestry system.

The considered scenarios have been evaluated with a set of indicators that quantify their performances both in terms of food security and diet balancing and in terms of environmental sustainability, focusing on the ecosystem services linked to the carbon cycle (carbon sequestered and carbon stocked in plant biomass).

Results shows that both vegetables gardens and agroforestry are valid alternatives to the practice of *slash and burn* in Nosy Mitsio. Vegetables gardens can guarantee a more stable food production and a more balanced diet while the agroforestry system ensures better environmental performances.

Agroforestry could guarantee a food production that, even if with a lesser balanced diet compared to that supplied by vegetables gardens, is higher than the demand of a single village. This opens to the possibility of trading this surplus during the journeys to the mainland. A combination between the two practices could hence be the ideal solution to guarantee optimal performances in both the considered aspects.

INDICE

RINGRAZIAMENTI	I
SINTESI	III
ABSTRACT	V
INDICE.....	VII
INDICE DELLE FIGURE	IX
INDICE DELLE TABELLE.....	XI
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 2: CICLO DEL CARBONIO E SERVIZI ECOSISTEMICI.....	5
2.1 Ciclo del carbonio.....	5
2.2 Servizi ecosistemici.....	7
CAPITOLO 3: SLASH AND BURN E AGROFORESTAZIONE.....	9
3.1 Slash and burn.....	9
3.2 Agroforestazione.....	10
3.3 Confronto tra agroforestazione e slash and burn	12
CAPITOLO 4: CASO DI STUDIO.....	13
4.1 Inquadramento territoriale	13
4.2 Deforestazione in Madagascar.....	13
4.3 Coperture del suolo e stock di carbonio	14
4.4 Nosy Mitsio	18
CAPITOLO 5: RICERCA DI ALTERNATIVE ALLO SLASH AND BURN.....	21
5.1 Progetto orti tri-familiari Kukula.....	21
5.2 Sistema di agroforestazione	22
CAPITOLO 6: CREAZIONE SISTEMA DI AGROFORESTRY.....	25
6.1 Raccolta dati piante	25
6.2 Calcolo della biomassa e del carbonio stoccato	28
6.3 Dinamica di crescita delle piante.....	29
6.4 Scelta finale schema agroforestry.....	34
CAPITOLO 7: RISULTATI	37
7.1 Scenari confrontati.....	37
7.2 Indicatori utilizzati	39
7.3 Ipotesi e premesse	42

7.4 Risultati indicatori ambientali per il confronto degli scenari	46
7.5 Risultati indicatori di dieta e alimentazione per il confronto degli scenari	50
CAPITOLO 8: CONCLUSIONI E FUTURI MIGLIORAMENTI.....	53

Indice delle figure

Figura 1: Concentrazione gas serra negli ultimi 2000 anni (Meinshausen et al 2017)	1
Figura 2: Emissioni globali di gas serra per settore economico nel 2010 (IPCC AR5 2014).....	2
Figura 3: Area forestata per continente nel periodo 1990-2020 (FAO 2020)	3
Figura 4: Bilancio di carbonio (IPCC-AR5, 2014).....	6
Figura 5: Flussi di carbonio in ingresso e uscita ad un ecosistema e flussi interni tra i diversi livelli	7
Figura 6: Servizi ecosistemici (da WWF, 'Living Planet Report' 2016).....	8
Figura 7: Scenari possibili per produttività del suolo di territori sottoposti a slash and burn.....	10
Figura 8: Deforestazione (A) e degrado forestale (B) nel periodo 1994-2014 (Yesuf et al. 2019)	14
Figura 9: Mappa contenuto carbonio organico nel suolo in Madagascar (Ramifehiarivo et al.2016)... ..	15
Figura 10: Mappa stock carbonio nelle foreste tropicali del Madagascar (Vieilledent et al. 2016)	15
Figura 11: Stock C nei primi 30cm di suolo in Madagascar nel 2016 da SoilGrid250m....	16
Figura 12: Coperture del suolo Madagascar 2019 (Global Land Cover Copernicus)	17
Figura 13: Boxplot stock di C nel suolo nelle diverse coperture del suolo.....	18
Figura 14: Regione Diana	18
Figura 15: Arcipelago dell'isola di Nosy Mitsio	18
Figura 16: Mappa coperture del suolo nel 2019 a Nosy Mitsio	19
Figura 17: Tabella contenuto di carbonio nella biomassa (IPCC 2006)	29
Figura 18: Crescita altezza pianta di <i>Tectona grandis</i> in caso di tasso crescita costante..	31
Figura 19: Curve di crescita del diametro di piante a diverse velocità di crescita (Bowman et al, 2013)	31
Figura 20: Esempi di crescita DBH per diverse specie usando le curve proposte da Bowman et al (2013)	32

Figura 21: Dinamica di crescita di diametro e altezza per una pianta di <i>Tectona grandis</i> utilizzando una funzione di Von Bertalanffy modificata.....	33
Figura 22: Dinamica di crescita di diametro e altezza per una pianta di <i>Mangifera indica</i> utilizzando una funzione di Von Bertalanffy modificata.....	33
Figura 23: Dinamica di crescita di diametro e altezza per una pianta di <i>Annona squamosa</i> utilizzando una funzione di Von Bertalanffy modificata.....	34
Figura 24: Dinamica stock di C sottoterra e sopra il livello del suolo per una pianta di <i>Tectona grandis</i>	34
Figura 25: Schema della distribuzione delle piante nel sistema di agroforestazione proposto.....	35
Figura 26: Coperture del suolo regione Diana anno 2015, 'Global Land Cover' Copernicus.....	41
Figura 27: Coperture del suolo regione Diana anno 2019, 'Global Land Cover' Copernicus.....	41
Figura 28: Andamento temporale del contenuto di carbonio sopra il livello del suolo nel sistema di agroforestazione proposto.....	44
Figura 29: Andamento temporale del contenuto di carbonio sotto il livello del suolo nel sistema di agroforestazione proposto.....	44
Figura 30: Andamento del carbonio nella biomassa delle radici delle specie utilizzate nel sistema di agroforestazione.....	45
Figura 31: Andamento dello stock di C non proveniente da biomassa nel suolo nel sistema di agroforestazione.....	45
Figura 32: Valori indicatori ambientali per lo scenario di agroforestazione a 40, 60 e 80 anni	48
Figura 33: Valori indicatori ambientali per lo scenario degli orti a 40, 60 e 80 anni	49
Figura 34: Numero di abitanti il cui fabbisogno medio sarebbe coperto da un ettaro di terreno coltivato nei diversi scenari analizzati per il villaggio di Ampanitsoa.....	52

Indice delle tabelle

Tabella 1: Elenco specie scelte nel progetto degli orti tri-familiari.....	22
Tabella 2: Informazioni raccolte nel database di specie per agroforestazione. Diametro a 1,3 m di altezza, altezza pianta e altre informazioni riguardanti le 32 specie del database	25
Tabella 3: Fattori di crescita assoluti per diverse velocità di crescita.....	30
Tabella 4: Distribuzione annuale specie in orto medio per villaggio di Ampanitsoa	37
Tabella 5: Numero di piante per specie in un ettaro di agroforestazione proposta.....	38
Tabella 6: Carbonio nel suolo per singola specie dopo raccolto in un orto medio.....	43
Tabella 7: Risultati dei diversi indicatori ambientali per i quattro scenari analizzati dopo 40 anni	47
Tabella 8: Risultati dei diversi indicatori ambientali per i quattro scenari analizzati dopo 60 anni	47
Tabella 9: Risultati dei diversi indicatori ambientali per i quattro scenari analizzati dopo 80 anni.....	47
Tabella 10: Stock di carbonio medio nella biomassa nel sistema di agroforestazione calcolato su un ciclo di 240 anni	49
Tabella 11: Fabbisogno calorico medio giornaliero e fabbisogno medio annuale di proteine e carboidrati per una dieta in cui gli ortaggi coprono il 20% del fabbisogno	51
Tabella 12: Fabbisogno calorico medio giornaliero e fabbisogno medio annuale di proteine e carboidrati per una dieta in cui gli ortaggi coprono il 50% del fabbisogno.....	51

1. INTRODUZIONE

La lotta ai cambiamenti climatici caratterizzerà i prossimi decenni della vita dell'uomo sulla Terra. "Il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile, e l'influenza dell'attività antropica sul sistema climatico è chiara" (IPCC AR5 2014). Il ciclo del carbonio si è spezzato, la produzione di CO₂ ha superato la capacità di assorbimento delle piante portando all'accumulo di anidride carbonica in oceani e atmosfera.

La concentrazione di CO₂ in atmosfera ha superato i 400 ppm, come mostrato in Fig. 1, in quella che gli studiosi definiscono come una nuova era, l'Antropocene, caratterizzata dalla forte impronta antropica sul sistema climatico.

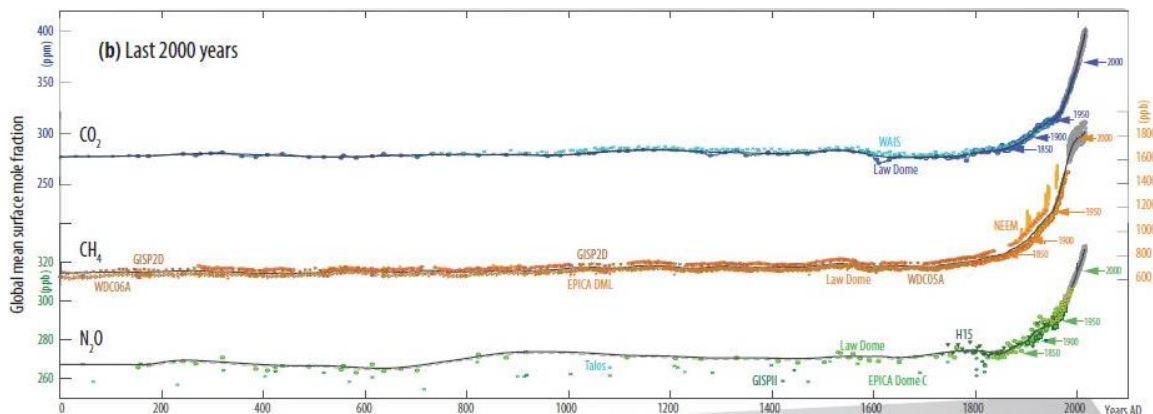


Fig. 1. Concentrazione gas serra negli ultimi 2000 anni (Meinshausen et al 2017)

Nel 2010 le emissioni globali sono state pari a 49 Gt CO_{2eq} (IPCC 2014) distribuite nei diversi settori economici come mostrato in Fig. 2, con produzione di calore ed elettricità, trasporti, industria e AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Uses, agricoltura foreste e altri usi del suolo) ad avere i ruoli più importanti nelle emissioni.

Il settore AFOLU ha contribuito al 24% delle emissioni. Quindi, in un'ottica futura di riduzione e successivo azzeramento delle emissioni occorre apportare dei cambiamenti all'attuale sistema agricolo e di produzione del cibo. Uno degli aspetti principali che porta il settore AFOLU ad avere grande impatto nei cambiamenti climatici è il suo essere causa di cambiamenti di uso del suolo. Per produzione alimentare è già stato convertito in terreno agricolo il 70% delle praterie, il 50% delle savane, il 45% delle foreste decidue temperate e il 27% delle foreste tropicali (TEEB 2015); corrispondente a circa il 50% delle aree abitabili del pianeta. (Our World in Data 2021). L'agricoltura è quindi un importante driver di deforestazione, e le perdite di ecosistemi intatti sono principalmente concentrate nelle zone tropicali.

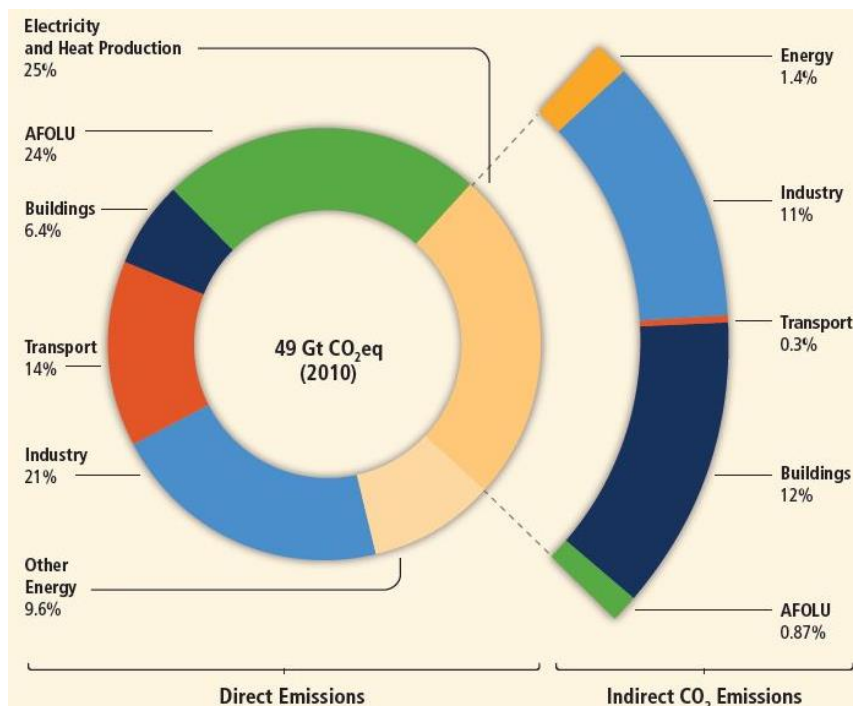


Fig. 2: Emissioni globali di gas serra per settore economico nel 2010 (IPCC AR5 2014)

Per comprendere l'importanza delle foreste tropicali nel ciclo del carbonio, basti considerare che queste assorbono quasi 1/3 della CO₂ assorbita globalmente dagli ecosistemi terrestri (<http://www.fao.org/soils-2015/resources/infographics/en/>)

L'area globale coperta da foresta è diminuita di circa 178 milioni di ha in 30 anni nel periodo 1990-2010. Il tasso netto di perdita di foresta è però diminuito dal 1990, il tasso annuale è sceso dai 7,84 milioni di ha nel periodo 1990-2000, ai 5,7 milioni di ha nel 2000-2010, ai 4,74 milioni di ha nel 2010-2020 (FAO 2020). Il tasso netto di perdita di foresta non descrive però a pieno la complessità delle dinamiche di uso del suolo. Infatti, è il risultato dell'azione di due forze opposte: la deforestazione da un lato e l'afforestazione sommata all'espansione naturale delle foreste dall'altro. Si stima una perdita di 420 milioni di ha di foresta a causa della deforestazione tra il 1990 e il 2020, anche se il tasso annuale è diminuito durante gli anni passando dai 15,8 milioni di ha all'anno nel 1990-2000 ai 10,2 milioni di ha all'anno nel 2015-2020 (FAO 2020).

Più del 90% della deforestazione in questi 30 anni è avvenuta ai tropici (FAO 2020), e in particolare l'Africa è il continente più colpito come mostrato in Fig. 3.

Ulteriore importanza alla necessità di preservare gli ecosistemi di foresta tropicale è data dalla capacità di quest'ultima di garantire servizi ecosistemici utili all'uomo. Con servizi ecosistemici si intendono tutti i benefici forniti da un ecosistema verso il genere umano; le foreste tropicali, con la loro biodiversità e il loro ruolo nella regolazione del clima, sono un patrimonio naturale fondamentale oltre che una fonte importante di servizi ecosistemici.

Tutti questi aspetti evidenziano l'importanza di superare il sistema agricolo industrializzato e intensivo, che ha caratterizzato gli ultimi decenni di storia, in favore di un sistema più sostenibile

e meno impattante sul clima terrestre. Infatti, tra i 17 SDGs (Sustainable Development Goals, Obiettivi per lo sviluppo sostenibile) elaborati dalle Nazioni Unite vi è quello di promuovere un'agricoltura sostenibile con l'obiettivo di raggiungere la sicurezza alimentare in tutto il pianeta.

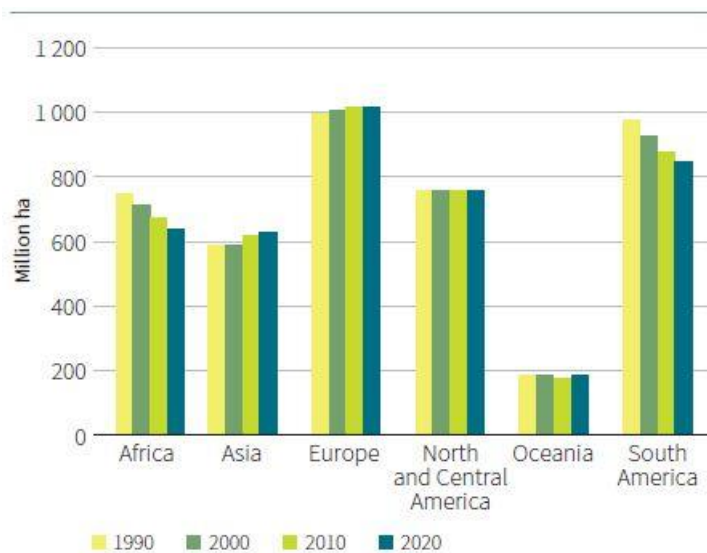


Fig. 3: Area forestata per continente nel periodo 1990-2020 (FAO 2020)

La sicurezza alimentare, definita nel World Food Summit della FAO nel 1996 come “la sicurezza di poter accedere a quantità sufficienti di alimenti sani e nutrienti che soddisfano le necessità e le preferenze alimentari per una vita sana e attiva” è infatti ancora ben lontana dall’essere raggiunta in alcune zone del mondo. Infatti, più di 800 milioni di persone al mondo sono denutrite e due miliardi di persone soffrono di malnutrizione di micronutrienti.

Il continente africano, soprattutto l’Africa subsahariana, è probabilmente la zona del mondo dove le problematiche legate a sicurezza e malnutrizione hanno una gravità maggiore. Questo è legato sia ai cambiamenti climatici che portano ad un aumento di terreni esposti a desertificazione e siccità sia alla messa in atto di pratiche agricole non sostenibili e inappropriate.

Questo lavoro di tesi, svolto in collaborazione con Kukula, una ONG che opera in Madagascar e tratta aspetti di sostenibilità ambientale e sicurezza alimentare, si pone quindi l’obiettivo di valutare diversi sistemi di produttività agricola, potenzialmente inseribili nel contesto geografico e sociale in analisi, l’isola di Nosy Mitsio in Madagascar. L’analisi si concentra sul confronto tra lo *slash and burn* (pratica agricola basata sulla deforestazione di un’area la cui biomassa viene bruciata per fare spazio a campi agricoli, spiegata più nel dettaglio nel capitolo 3), un progetto di orti a cui Kukula collabora e un sistema di agroforestazione proposto in questo elaborato. La valutazione tiene conto sia del miglioramento per quanto riguarda la quantità di nutrienti (carboidrati e proteine) nella dieta della popolazione locale e la varietà della dieta stessa, sia della riduzione di impatti ambientali rispetto alla tecnica agronomica attualmente prevalente, il cosiddetto *slash and burn*. Questa valutazione viene effettuata attraverso l’uso di indicatori che quantifichino le prestazioni delle diverse pratiche agricole nella capacità di stoccare o sequestrare

carbonio, di evitare emissioni da deforestazione e di produzione di cibo necessario a sfamare gli abitanti dell'isola.

Il lavoro è suddiviso e articolato nei seguenti capitoli:

- Capitolo 2: descrizione del ciclo del carbonio e dei servizi ecosistemici ad esso associati;
- Capitolo 3: descrizione delle pratiche agricole di *slash and burn* e agroforestazione;
- Capitolo 4: presentazione del caso di studio analizzato, con descrizione delle caratteristiche e delle problematiche legate al territorio specifico
- Capitolo 5: presentazione del progetto di orti sviluppato dall'associazione Kukula
- Capitolo 6: descrizione del sistema di agroforestazione proposto
- Capitolo 7: descrizione degli scenari analizzati, degli indicatori utilizzati per l'analisi e presentazione dei risultati ottenuti
- Capitolo 8: conclusioni e sviluppi futuri

2 CICLO DEL CARBONIO E SERVIZI ECOSISTEMICI

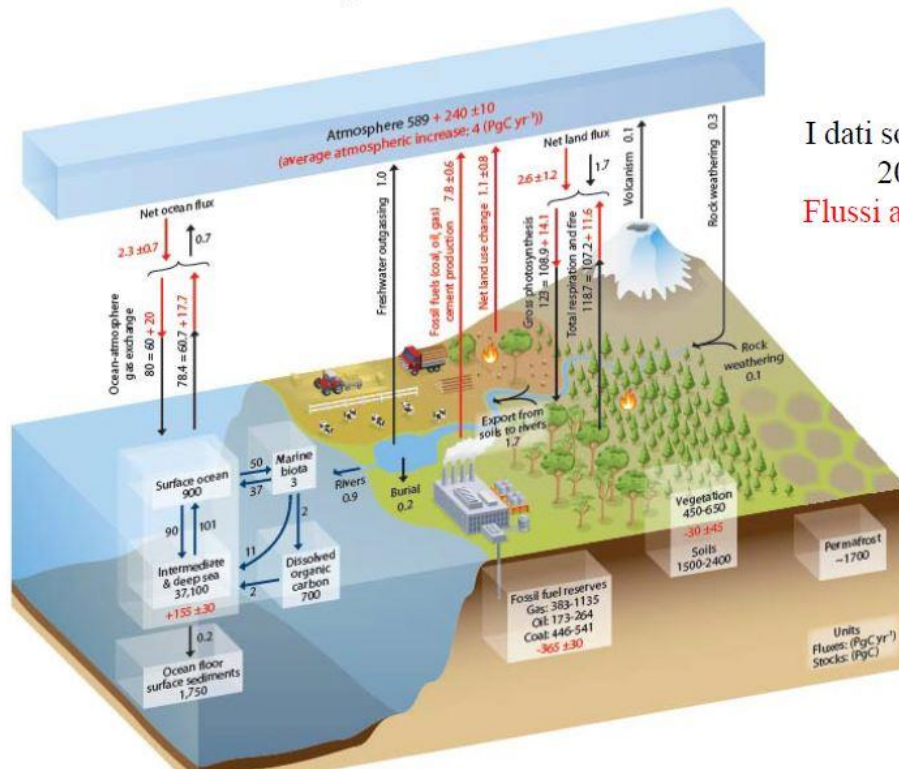
2.1 Ciclo del carbonio

Sulla terraferma, le piante rimuovono carbonio dall'atmosfera attraverso il processo di fotosintesi. Il carbonio che rimane nella biomassa della pianta può passare agli animali erbivori che si cibano delle piante. Quindi, o viene rilasciato di nuovo in atmosfera attraverso la respirazione o si muove risalendo la catena alimentare per essere successivamente rilasciato in atmosfera per respirazione animale. Quando gli animali e le piante muoiono, attraverso la loro decomposizione ritrasferiscono il carbonio al suolo.

Gli oceani, invece, assorbono carbonio attraverso processi fisici e biologici. A livello della superficie, l'anidride carbonica atmosferica si dissolve in acqua e il fitoplancton utilizza questa CO₂ per la fotosintesi. Il fitoplancton è la base della catena alimentare marina, il carbonio può quindi risalire la catena alimentare, essere riciclato nelle acque superficiali alla morte del fitoplancton o il fitoplancton può andare a fondo e stoccare carbonio come sedimento marino sul fondale. Sul lungo periodo, questo processo ha reso gli oceani la più grande riserva di carbonio sul pianeta.

Successivamente, in un processo chiamato "upwelling" le correnti marine portano in superficie le acque fredde profonde e l'acqua, scaldandosi, rilascia carbonio in forma gassosa in atmosfera continuando il ciclo del carbonio.

Questo ciclo era in perfetto equilibrio prima dell'avvento delle attività antropiche. Già nell'era preindustriale le pratiche agricole avevano comportato uno sbilanciamento del ciclo del carbonio riducendo lo stock di carbonio del suolo e aumentandone la concentrazione in atmosfera. Ma è con l'avvento dell'età industriale e dei combustibili fossili che l'uomo ha fortemente compromesso il bilancio del carbonio e accumulato CO₂ in oceani e atmosfera come mostrato in Fig.4.



I dati sono valori medi
2002-2009.
Flussi antropogenici in
rosso

Fig. 4: Bilancio di carbonio (IPCC-AR5, 2014)

In un ecosistema il carbonio può essere stoccato in quattro diversi livelli:

- Biomassa epigea: comprende tutto il materiale vegetale vivente sopra il livello del suolo
- Biomassa ipogea: comprende l'apparato radicale vivo e morto
- Biomassa morta: comprende alberi caduti morti, ceppi, lo strato di lettiera al suolo e i detriti legnosi grossolani
- Suolo: comprende tutte le forme con cui il carbonio può rimanere al suolo (come anidride carbonica tra i pori o come sostanza organica)

La circolazione del carbonio tra questi diversi livelli avviene come descritto in Fig. 5.

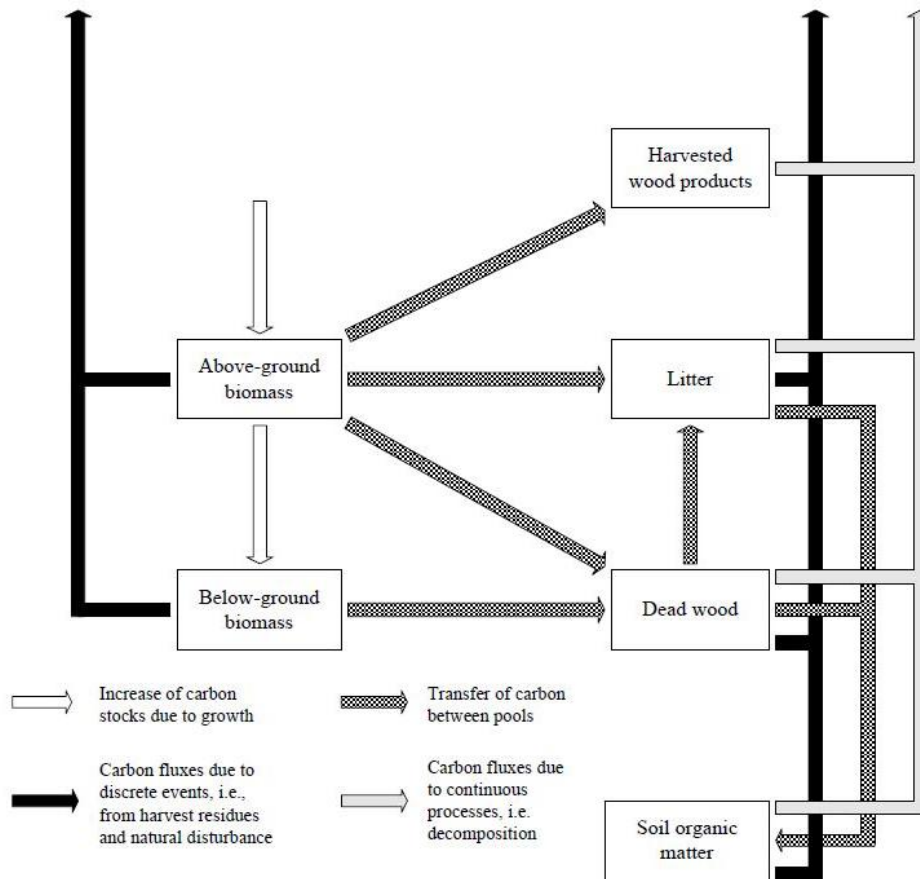


Fig. 5: Flussi di carbonio in ingresso e uscita ad un ecosistema e flussi interni tra i diversi livelli (IPCC 2006)

Tra i quattro comparti, quello del carbonio nel suolo è quello che presenta più problematiche e incertezze nella stima. Infatti, la quantità di carbonio che viene depositato al suolo attraverso relazioni radici-suolo è un processo tanto importante quanto ancora poco studiato rispetto agli altri flussi nel ciclo del carbonio (Proctor & He. 2021).

Il processo di rizodeposizione, rilascio di composti dalle radici al terreno, e più in generale tutti i processi che avvengono nella rizosfera, cioè il volume di suolo che circonda ed è a contatto con le radici, hanno grande importanza per la crescita e la salute della pianta e ricoprono un ruolo chiave per lo stoccaggio di carbonio al suolo (Iannucci et al. 2021)

2.2 Servizi ecosistemici

Con servizi ecosistemici si intendono tutti i benefici forniti da un ecosistema verso il genere umano. Il [Millennium Ecosystem Assessment](#) (2005) ne ha fornito una classificazione suddividendoli in 4 categorie principali, come mostrato in Fig. 6:

- Supporto alla vita (Supporting): tutti quei servizi necessari per la produzione di tutti gli altri servizi ecosistemici e contribuisce alla conservazione della biodiversità

- Regolazione (Regulating): oltre al mantenimento della salute e del funzionamento degli ecosistemi, le funzioni regolative raccolgono molti altri servizi che comportano benefici diretti e indiretti per l'uomo come la stabilizzazione del clima, il riciclo dei rifiuti, l'impollinazione.
- Approvvigionamento (Provisioning): tutti quei servizi di fornitura di risorse quali acqua, cibo e materiali.
- Culturali (Cultural): comprendono servizi ricreativi, funzioni etiche e spirituali, di paesaggio in senso estetico e di patrimonio naturale.

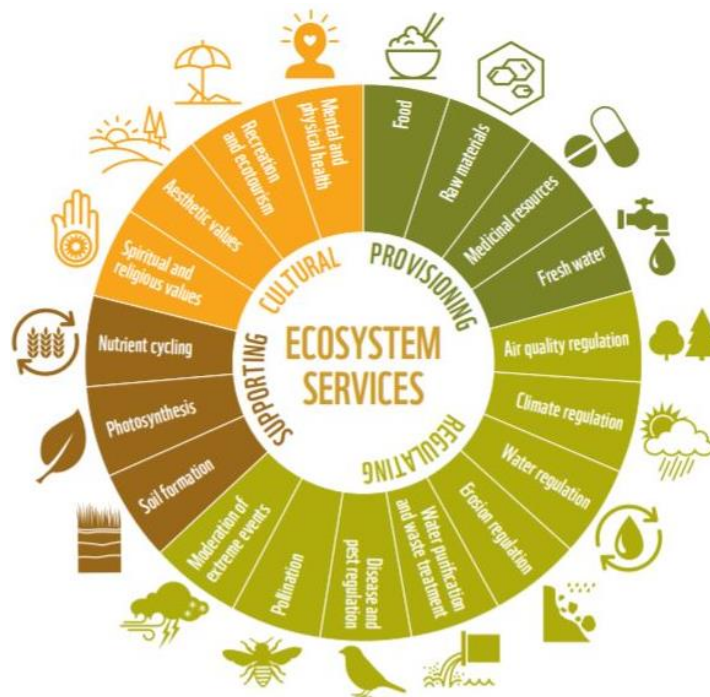


Fig. 6: Servizi ecosistemici (da WWF, 'Living Planet Report' 2016)

3 SLASH AND BURN E AGROFORESTAZIONE

3.1 Slash and burn

Nella storia l'uomo ha sempre disboscato foreste per far spazio all'agricoltura e in alcune zone del mondo ciò accade tuttora per fare spazio a zone agricole permanenti; nelle zone tropicali invece la deforestazione può avvenire per dare spazio a zone agricole non permanenti utilizzando una tecnica denominata "slash and burn" o "shifting cultivation".

Questa tecnica si basa su 3 fasi principali: 'slash and burn', coltivazione e riposo (Laskar et al. 2021). Per prima cosa si taglia la vegetazione nell'area relativamente ristretta di foresta che è stata scelta, poi si brucia la biomassa per fare spazio ai campi agricoli che beneficiano dei nutrienti rilasciati dalle piante bruciate. Dopo alcuni anni, i nutrienti nel terreno si esauriscono e quindi gli agricoltori abbandonano quella zona lasciandola a riposo per diversi anni, teoricamente per permettere alla foresta di ricrescere, e si spostano su una diversa area di foresta da abbattere ripetendo continuamente questo processo.

Secondo il rapporto FAO 1985, questa pratica agricola rappresentava uno stile di vita per 300-500 milioni di persone nel mondo (Brady 1996); attualmente è un uso del suolo che caratterizza 280 milioni di ettari tra Africa, Asia, America latina, isole dei Caraibi e del Pacifico e garantisce sostentamento a 200-300 milioni di persone (Laskar et al. 2021).

Da quanto riportato da Andriamananjara et al, (2016), l'andamento della vegetazione all'interno delle diverse fasi slash and burn, in un caso di studio condotto nell'est del Madagascar, ha il seguente sviluppo:

- Il primo ciclo di maggese dopo la deforestazione è associato ad un sistema dove le specie vegetali dominanti sono: *Trema orientalis* e *Harunga-namadagascariensis*.
- Dal secondo al quinto ciclo di maggese dopo la deforestazione le precedenti specie dominanti sono sostituite da *Psidia altissima* e *Rubus moluccanus* o *Lantana camara* portando ad un paesaggio di arbusti.
- Dopo il sesto ciclo, dominano specie erbacee o felce, *Imperata cylindrica* e *Aristida* sp.).

Le tecniche tradizionali di slash and burn, improntate ad una agricoltura di pura sussistenza, erano sostenibili in quanto ogni zona era coltivata per 2-3 anni su un ciclo totale di 20 o più anni, (anche se la durata effettiva dei periodi di maggese e coltura è influenzata da fattori ecologici e socioeconomici locali; Thong et al. 2020), comportando un'erosione del suolo e un impatto sul ciclo dell'acqua trascurabili (Brady 1996, Kotto-Same et al. 1997, Cardinael et al. 2020).

Lo stesso non si può dire per le tecniche di slash and burn più moderne, che soffrono della pressione dovuta ad una maggiore produzione di cibo necessaria dato l'aumento della popolazione. Questo comporta una riduzione degli anni di attesa tra due turni di coltivazione di un terreno con conseguente intensificazione dell'uso dei terreni e brevi periodi di maggese. Le conseguenze di questi aspetti sono la riduzione di fertilità di suolo, coltivazioni meno produttive e ad una ridotta resilienza delle foreste. (Celentano et al. 2020, Brady 1996, Kotto-Same et al. 1997, Davidson et al. 2008). In Madagascar, ad esempio, il periodo di riposo si è ridotto da 8 a 4 anni negli ultimi decenni (Gay-des-Combes et al. 2017), passando a quello che in Fig. 7 viene definito scenario c.

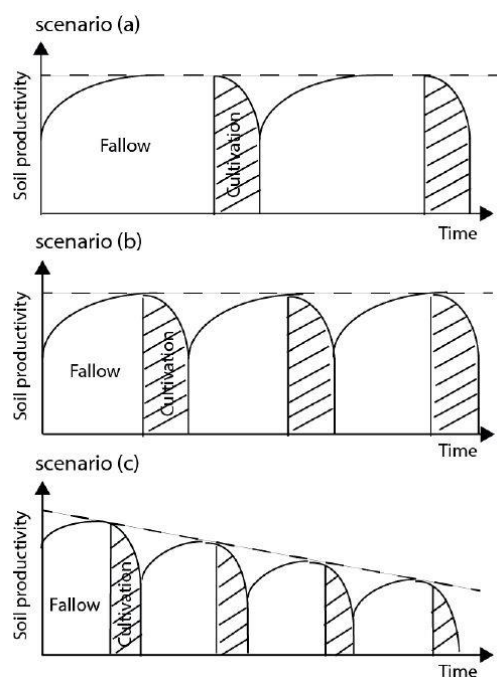


Fig. 7: Scenari possibili per produttività del suolo di territori sottoposti a slash and burn

Questo accorciamento del ciclo di coltivazione e riposo comporta conseguenze dal punto di vista della sostenibilità ambientale. In particolare, vengono riportati un aumento di emissioni di carbonio (Celentano et al. 2020), riduzione di contenuto di carbonio nel suolo sia negli strati superficiali del suolo sia in strati più profondi (Laskar et al. 2021), riduzione di C nell'intero sistema (Kotto-Same et al. 1997, Kauffman 1995, Williams et al. 2008), aumento del rischio di invasione di specie non native (Sexton et al. 2020), minore resistenza all'erosione del suolo da parte di vento e pioggia, maggiore flusso di N₂O dal suolo all'atmosfera (Wang et al. 2021) e aumento delle emissioni di CH₄ dal suolo (Mapanda et al. 2010).

Per mantenere la sostenibilità del sistema 'slash and burn' sono necessari periodi di riposo di 20 anni circa (Laskar et al. 2021, Kotto-Same et al. 1997, Bonner et al. 2013) o anche di molto superiori in alcuni casi specifici (Thong et al. 2020), ma mantenere questa lunghezza dei periodi a maggese potrebbe non essere praticabile dal punto di vista sociale (Laskar et al. 2021).

3.2 Agroforestazione

Esistono diverse definizioni di agroforestazione. Il World Agroforestry Centre (<https://www.worldagroforestation.org>) la definisce come "l'interazione tra agricoltura ed alberi, incluso l'uso agricolo degli alberi" mentre per l'AFTA (Association for Temperate Agroforestry) (<http://www.aftaweb.org>) viene definita come "un sistema intensivo di gestione della terra che ottimizza i benefici dall'interazione biologica che si crea quando gli alberi e/o gli arbusti sono volutamente combinati con campi coltivati e/o bestiame". Esistono molte altre definizioni ma in sostanza si riferiscono tutte alla pratica di far crescere volontariamente alberi,

campi coltivati e bestiame in un sistema di mutua interazione per ricavarne benefici e servizi (Nair et al. 2009).

L'agroforestazione cerca di bilanciare diverse necessità: far crescere alberi per produzione di legname e altri scopi commerciali, garantire una produzione di cibo adeguata e diversificata in modo da soddisfare i bisogni dei produttori stessi ed eventualmente per vendere i prodotti e infine fornire una protezione all'ecosistema in modo da preservarne la capacità di produrre risorse e garantire servizi ecosistemici.

Nei tropici i sistemi di agroforestazione sono principalmente indirizzati al sostentamento della popolazione locale mentre nelle nazioni più industrializzate questi sistemi nascono per garantire protezione ambientale e in alcuni casi per produrre un ritorno economico (Nair et al. 2009).

Per essere chiamata agroforestazione una pratica agricola deve rispettare quattro criteri: intenzionale, intensivo, interattivo e integrato.

- Intenzionale: le combinazioni tra alberi, campi coltivati e bestiame sono pensate e gestite volutamente come una sola unità;
- Intensivo: le pratiche di agroforestazione sono gestite in modo intensivo per mantenere le capacità produttive e protettive;
- Interattivo: la gestione cerca di utilizzare attivamente le interazioni biologiche e fisiche tra le varie componenti con l'obiettivo di aumentare la produzione garantendo i benefici di conservazione ambientale
- Integrato: gli alberi, le coltivazioni e il bestiame sono strutturalmente e funzionalmente combinati in un'unica unità integrata di gestione. L'integrazione può essere sia sotto sia sopra il livello del suolo.

Le cinque pratiche di agroforestazione più sviluppate sono: alley cropping, forest farming, riparian buffer strips, silvopasture e windbreaks.

- Alley cropping: la coltivazione di cibo, foraggio o piante medicinali tra file di alberi. È una versione di intercropping, coltivazione di specie diverse sullo stesso campo, su una scala temporale più lunga.
- Forest farming: coltivazione intenzionale di specie orticole, piante medicinali o ornamentali negli strati inferiori di foreste che sono gestite per ottimizzare sia la produzione di legname sia quella dei campi sottostanti.
- Riparian buffer: file di alberi, cespugli e piante erbacee piantate tra campi coltivati o pascoli e corsi d'acqua.
- Silvopasture: combinazione volontaria di alberi, piante da foraggio e animali da pascolo in un unico sistema integrato e intensivo.

- Windbreaks: filari di alberi o cespugli atti a migliorare la produzione dei campi coltivati o proteggere persone e bestiame dal vento.

Si stima che, globalmente, i sistemi di agroforestazione coprano circa 1 miliardo di ettari di terreno (Cardinael et al. 2020).

I sistemi di agroforestazione sono spesso visti dagli agricoltori come un modo di diversificare la produzione, i guadagni e i servizi ma, in determinate zone del pianeta, per i piccoli produttori agricoli la tecnica dello 'slash and burn' rimane il principale mezzo di sostentamento. Tale mezzo, però, risulta anche essere una causa di peggioramento continuo della situazione ambientale (Nair et al. 2009). In questi contesti, dove degrado ambientale e povertà sono correlati, i sistemi di agroforestazione rappresentano una valida alternativa per la mitigazione del cambiamento climatico ed il recupero dei terreni riuscendo ad unire gli obiettivi di sicurezza alimentare e ripristino dei servizi ecosistemici (Nair et al. 2009, Celentano et al. 2020).

3.3 Confronto tra agroforestazione e slash and burn

Mentre i sistemi agricoli basati sulla tecnica dello slash and burn sono sempre meno sostenibili a causa della riduzione del periodo di riposo, i sistemi di agroforestazione hanno il potenziale di aumentare la fertilità del suolo, ridurre l'erosione, migliorare la qualità dell'acqua, aumentare e aiutare a conservare la biodiversità, sequestrare carbonio dall'atmosfera (Jose 2009, Nair et al. 2009, Celentano et al. 2020).

Da quanto riportato da Kuyah et al (2009) in un'analisi riguardante i servizi ecosistemici in sistemi di agroforestazione nell'Africa sub-sahariana, questi ultimi garantivano un aumento della produzione, maggior quantità di azoto e fosforo nel suolo e un maggiore stock di carbonio. In questi sistemi si riscontra anche una riduzione di perdita di suolo e ruscellamento superficiale, un migliore tasso d'infiltrazione e un maggiore tasso di umidità del suolo

4 CASO DI STUDIO

4.1 Inquadramento territoriale

Il Madagascar è una grande isola nel sud-est del continente africano. Questa sua condizione di isolamento, combinata con la presenza di un elevato numero di microhabitat, ha portato all'eccezionale biodiversità che contraddistingue il paese sia per numero di specie totali sia per numero di specie endemiche.

La presenza di foreste tropicali è un altro importante fattore per l'elevata biodiversità dell'isola. Infatti, le foreste tropicali rappresentano il 52% delle foreste mondiali (FAO 2015) ospitando 2/3 della biodiversità terrestre (Whitmore 1998) e il 96% delle specie mondiali stimate di alberi (Fine et al. 2009). Per proteggere questo ambiente, in Madagascar sono presenti numerose aree protette e riserve naturali. Al 2017, le aree protette coprono l'11% dell'area totale e il 30% della foresta, (Neugarten et al. 2020).

L'isola si può suddividere in quattro regioni climatiche caratterizzate da diverse tipologie di foresta: la foresta tropicale umida ad est, la foresta secca ad ovest, la foresta spinosa a sud e le mangrovie lungo la costa ovest.

4.2 Deforestazione in Madagascar

La ricchezza di biodiversità del Madagascar è però fortemente minacciata dalla deforestazione che ha caratterizzato gli ultimi decenni dell'isola. Infatti, il Madagascar ha perso il 44% delle sue foreste naturali tra il 1953 e il 2014, di cui il 37% tra il 1973 e il 2014. Si stima che la deforestazione nel periodo 2010-2014 abbia portato a 40.2 Mt C di emissioni nell'atmosfera (10 Mt C/y) (Vieilledent et al. 2018).

Sia la deforestazione sia il degrado forestale costituiscono quindi dei seri problemi nell'isola: e se la deforestazione implica l'azione antropogenica a grande scala, la degradazione della foresta dipende principalmente da conversioni a scala locale che comportano un lieve ma persistente ritiro della foresta.

Da quanto risulta da uno studio di approfondimento dell'impatto della deforestazione e del degrado forestale nel Madagascar nel periodo 1995-2014 di Yesuf et al. (2019), il passaggio da foresta a zona urbanizzata o mix vegetativo e il passaggio da mix vegetativo a zona urbanizzata o coltivata sono in media più veloci e più marcati delle altre transizioni e sono avvenuti principalmente nel periodo 1994-2002. Si riporta in Fig.8 una rappresentazione di deforestazione e degrado forestale nel periodo 1994-2014.

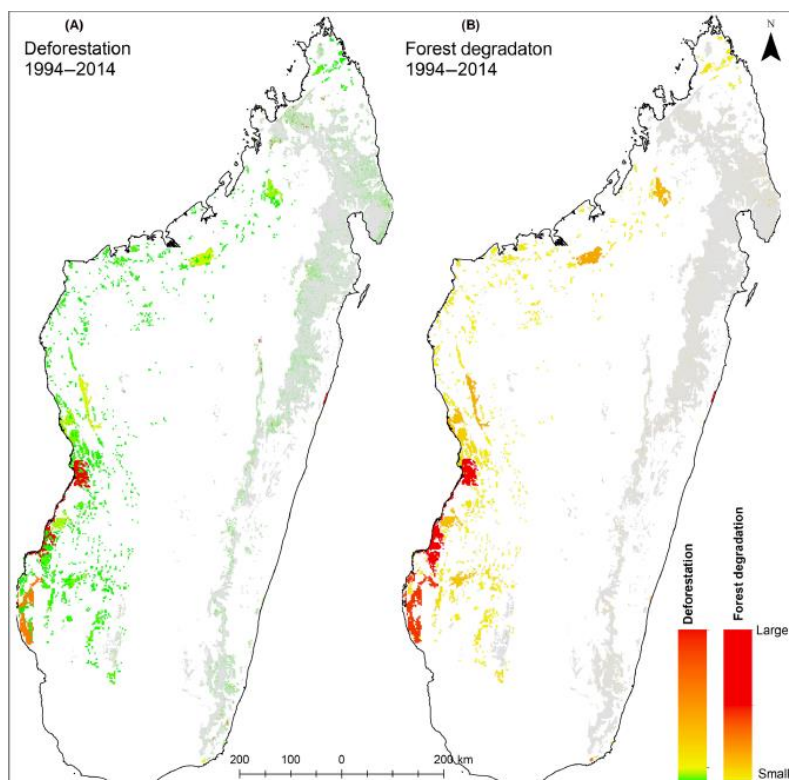


Fig. 8: Deforestazione (A) e degrado forestale (B) nel periodo 1994-2014 (Yesuf et al. 2019)

Se si considerano i fattori che influenzano la deforestazione si ricava che lo 'slash and burn', il taglio selettivo e i cicloni tropicali sono gli agenti principali per quanto riguarda la zona est; mentre la deforestazione e il degrado nelle foreste secche ad ovest è principalmente guidato da 'slash and burn', pascolo di animali, produzione di carbone e incendi.

Le transizioni più frequenti e più marcate sono da tutte le categorie verso aree coltivate, confermando l'ipotesi che sia la tecnica agricola dello 'slash and burn' quella che modula i principali cambiamenti di uso del suolo in Madagascar.

4.3 Copertura del suolo e stock di carbonio

Data l'importanza dello stoccaggio di carbonio per la mitigazione dei cambiamenti climatici, negli anni sono stati fatti, per quanto riguarda il Madagascar, diversi tentativi di mappatura per valutare gli stock di carbonio nel suolo e nella biomassa epigea delle foreste.

Le due mappature più recenti sono quelle di Ramifehiarivo et al (2016) e Vieilledent et al (2016), riportate in Fig. 9 e 10, relative rispettivamente al contenuto di carbonio nei primi 30cm di

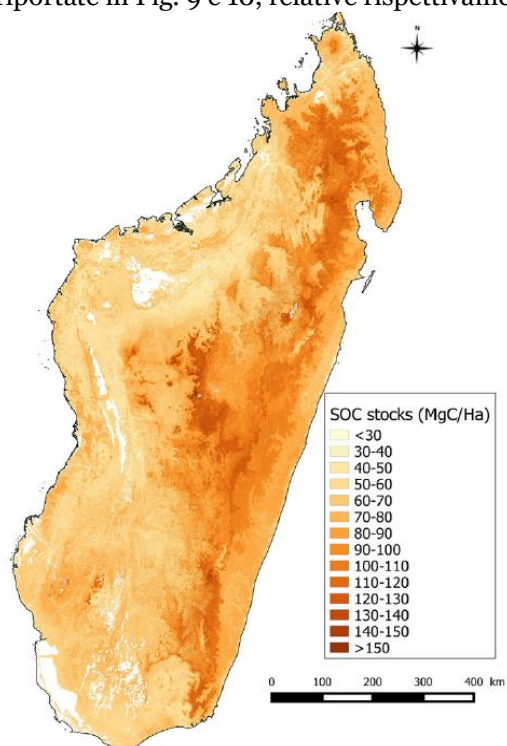


Fig. 9: Mappa contenuto carbonio organico nel suolo in Madagascar (Ramifehiarivo et al. 2016)

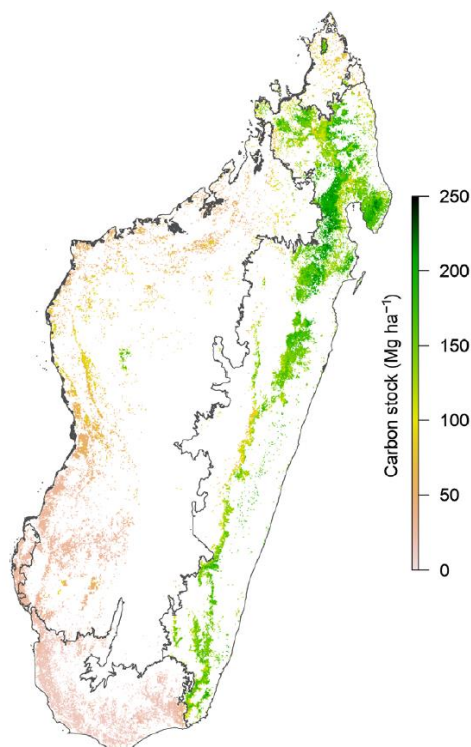


Fig. 10: Mappa stock carbonio nelle foreste tropicali del Madagascar (Vieilledent et al. 2016)

suolo la prima e carbonio stoccato dalle foreste del Madagascar la seconda. La mappa di Ramifehiarivo et al (2016) ha una risoluzione di 30 m, e migliora la precisione della precedente mappa esistente (1km di risoluzione (Grinand et al. 2009)). La mappa di Vieilledent et al (2016) ha invece una risoluzione di 250 m, che migliora quelle delle due mappe già esistenti (Saatchi et al 2011) a 1 km di risoluzione e Baccini et al (2012) a 500m di risoluzione).

Come si può osservare dalle due mappe, la zona ovest caratterizzata dalla predominanza della foresta tropicale umida ha uno stock di carbonio maggiore sia considerando il carbonio organico nel suolo sia considerando la biomassa epigea. Infatti, i valori medi di C nella biomassa epigea nelle diverse tipologie di foreste presentano notevoli differenze. Si varia dal 17 (± 6) t/ha della foresta spinosa, al 52 (± 25) t/ha della foresta secca per arrivare infine ai 150 (± 33) t/ha della foresta umida.

La mappa dello stock di carbonio nel suolo è coerente con la mappa ricavata dai dati sul Madagascar del progetto SoilGrid250m (<https://soilgrids.org>) mostrata in Fig. 11.

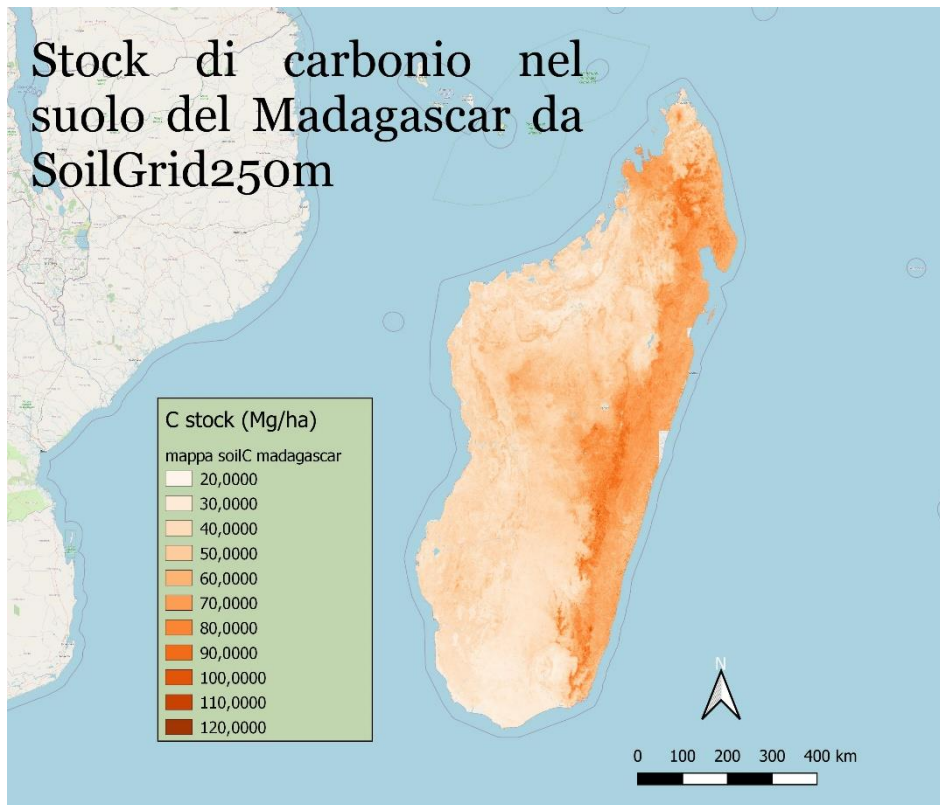


Fig. 11: Stock C nei primi 30cm di suolo in Madagascar nel 2016 da SoilGrid250m (<https://soilgrids.org>)

Il progetto 'Soilgrid' nasce dal lavoro dell'ISRIC (International Soil eReference Information Centre) e del WSI (World Soil Information) che, per ridurre la distanza tra domanda e disponibilità di dati relativi al suolo, hanno rilasciato questo sistema globale di informazioni sul suolo.

Soilgrid fornisce previsioni globali per diverse proprietà del suolo (contenuto di carbonio, peso specifico, pH, frammentazione del suolo, ect..) a sette profondità standard (0, 5, 15, 30, 60, 100 e 200 cm).

Per stimare questi parametri è stato utilizzato un sistema di machine learning basato su modelli ad albero non lineari.

Le covariate utilizzate sono:

- Profilo di curvatura, pendenza e profondità;
- Media mensile e deviazione standard a lungo termine di EVI (Enhanced Vegetation Index);
- Media e deviazione standard a lungo termine della riflettanza nell' infrarosso vicino (NIR);
- Media e deviazione standard a lungo termine della temperatura diurna e notturna;
- Media mensile di ore sotto copertura nevosa;
- Classi di copertura del suolo;

- Precipitazione mensile;
- Unità litologiche;
- Classe morfologica;
- Media mensile a lungo termine dell'area affetta da inondazioni;
- Distribuzione delle mangrovie;
- Spessore medio del suolo e del deposito sedimenti;

La temperatura e la riflettanza nel NIR risultano essere le variabili più importanti nella stima del contenuto di carbonio rappresentato nella mappa in Fig. 11

Per valutare in modo più approfondito gli effetti della deforestazione in Madagascar, bisogna indagare le eventuali differenze di stock di carbonio nelle diverse coperture del suolo nell'isola. In Fig. 12 si può vedere come è caratterizzata la distribuzione delle diverse coperture del suolo.

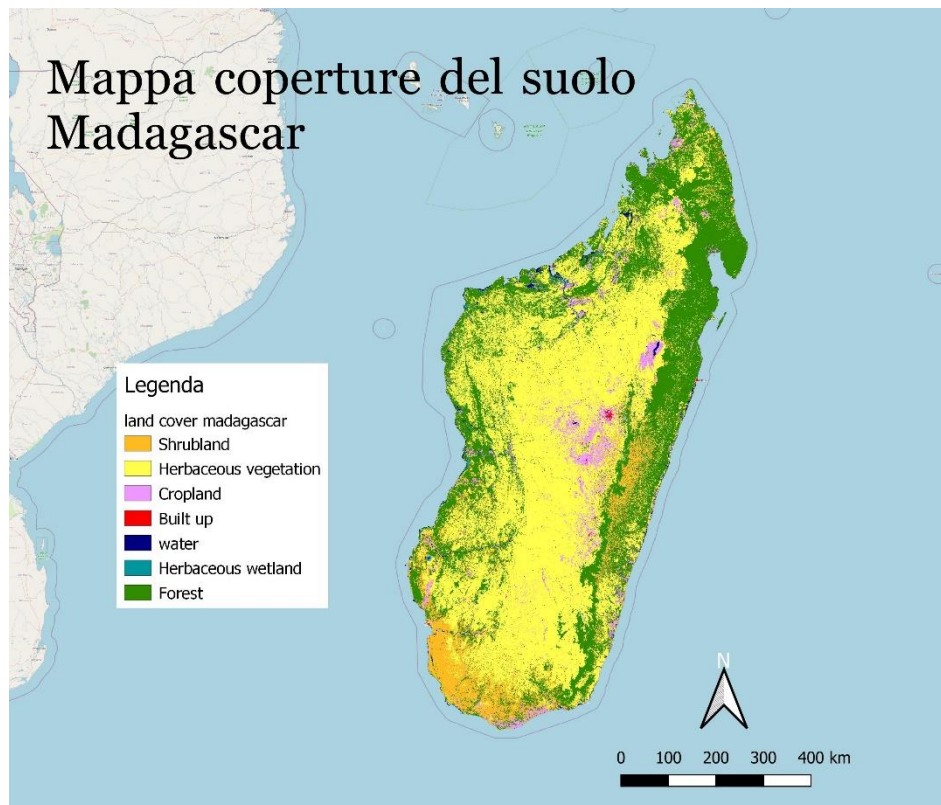


Fig. 12: Coperture del suolo Madagascar 2019 (Global Land Cover Copernicus)

Successivamente, utilizzando QGIS la mappa dell'uso del suolo è stata incrociata con quella dello stock di carbonio nel suolo per verificare la presenza di differenze tra le diverse categorie.

Come si può vedere dai boxplot in Fig. 13 lo stock di carbonio nei suoli coperti da foreste è mediamente maggiore rispetto ad altre coperture vegetate e aree coltivate. Il valore medio delle aree forestate è di 60 t/ha mentre per le aree coltivate è di circa 50 t/ha, per le aree coperte da vegetazione arbustiva ed erbacea il valore medio è minore ma vi la dispersione è elevata.

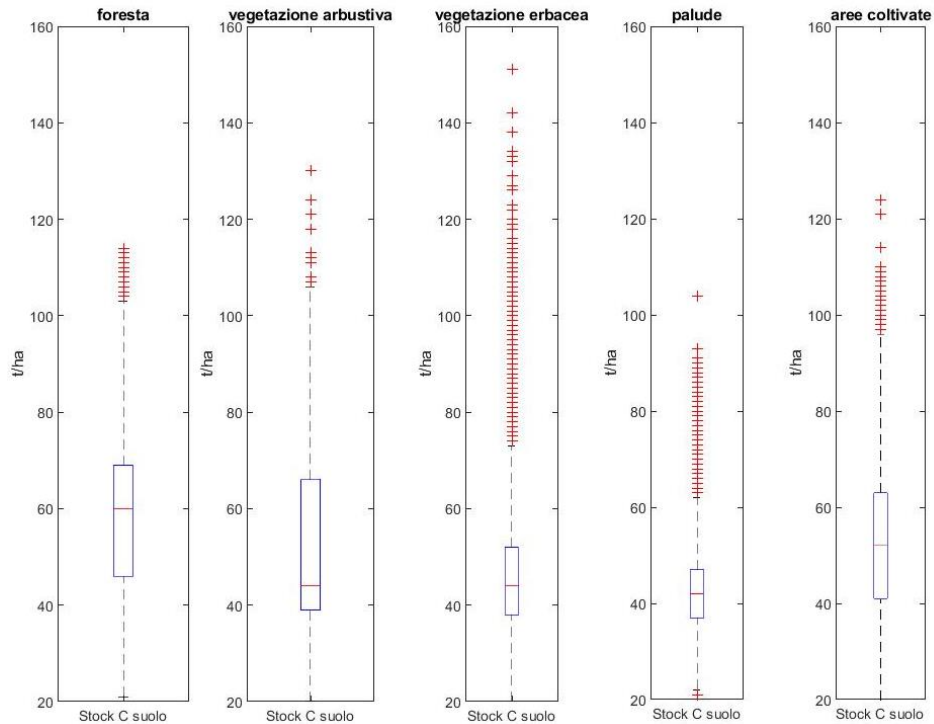


Fig. 13: Boxplot stock di C nel suolo nelle diverse coperture del suolo

4.4 Nosy Mitsio

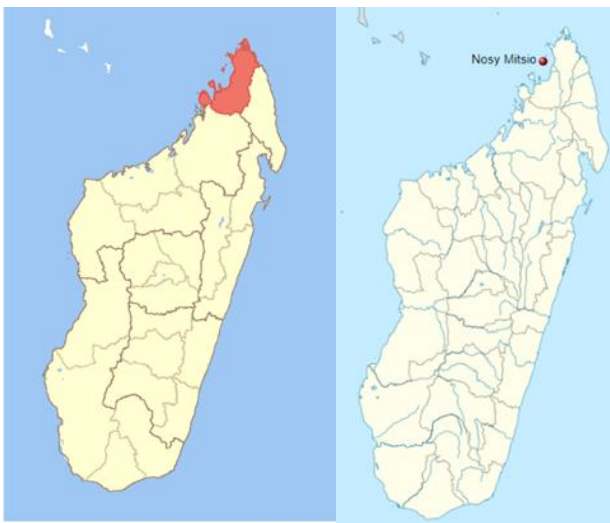


Fig. 14-15: Regione Diana e arcipelago di Nosy Mitsio

La regione Diana (Fig.14) appartiene alla provincia di Antsiranana nel nord del Madagascar. È considerata virtualmente isolata dal resto del paese data la presenza del monte Tsaratanana (2800 m s.l.m.). È una zona ricca di biodiversità con la presenza di numerosi parchi e riserve.

Nosy Mitsio (Fig. 15) è un arcipelago di 11 piccole isole a 70km a nord est di Nosy Be e 60km a nord ovest della città di Ambilobe. L'unica isola abitata è Grande Mitsio. È

popolata da circa 2000 persone suddivise in piccoli villaggi, tra cui i più grandi sono Ampanitsoa e Bevaoko, con 250 e 350 abitanti rispettivamente. Dalla mappa riportata in Fig. 16 si può vedere come l'effetto delle attività antropiche sull'uso del suolo nell'isola sia ancora relativamente poco marcato.

Il villaggio di Ampanitsoa è collocato in una zona costiera ed è immerso in una foresta di cocco. Le uniche attività di sussistenza sono la pesca e la coltivazione, che prevede principalmente la produzione di riso tra dicembre e maggio. La semina del riso viene fatta a spaglio su sodo, cioè lanciando i semi su un terreno non lavorato, e in seguito il terreno con il seme sopra viene rivoltato

con un attrezzo chiamato 'vague' formato da un bastone e una piccola paletta di ferro all'estremità. Non esiste irrigazione, si inaffia solo con le piogge.

Le risorse alimentari sono dunque limitate, l'importazione dall'entroterra prevederebbe un viaggio di circa 6 ore verso Ambilobe, la città più vicina, con un cospicuo aumento dei costi. Da questo deriva una dieta locale poco diversificata che porta ad una condizione di malnutrizione cronica per la quasi totalità della popolazione.

Mappa coperture del suolo Nosy Mitsio

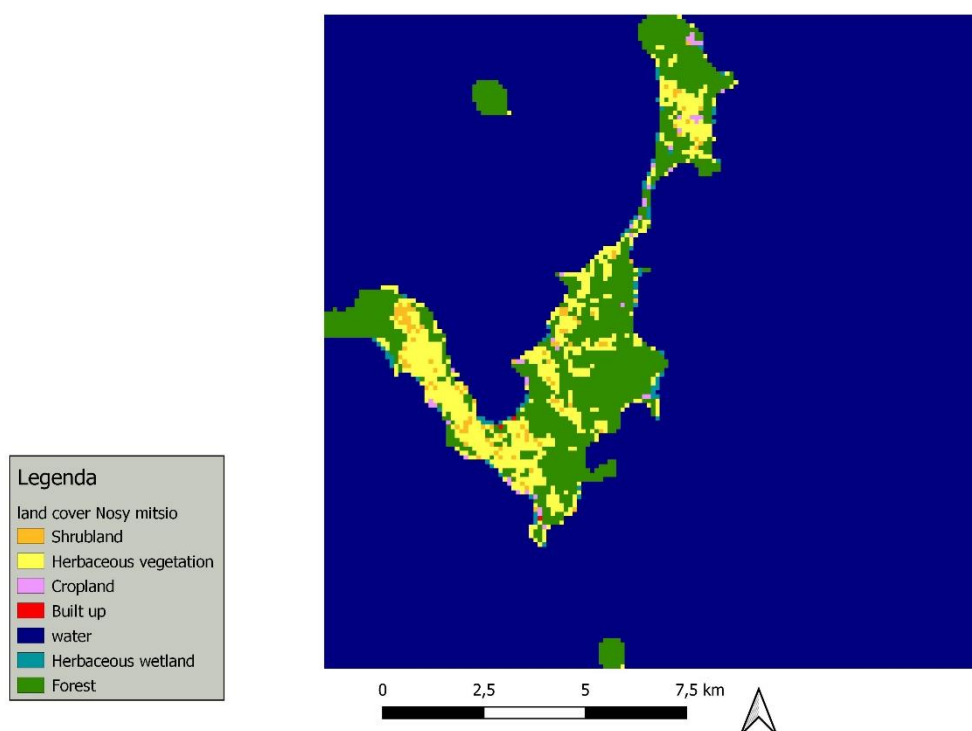


Fig. 16: Mappa delle coperture del suolo nel 2019 a Nosy Mitsio

5 RICERCA DI ALTERNATIVE ALLO SLASH AND BURN

5.1 Il progetto di Kukula per orti tri-familiari

Kukula è un'associazione non-profit che opera nel nord-ovest del Madagascar. Promuove modelli di sviluppo sostenibile nell'ambito della cooperazione internazionale, tramite interventi finalizzati a rispondere alle esigenze specifiche delle comunità locali, attraverso l'utilizzo accorto e razionale delle risorse naturali a disposizione.

Il progetto di orti tri-familiari a Nosy Mitsio si inserisce in un contesto di progetto più ampio, il progetto "Tany Vao". Lo scopo generale del progetto Tany Vao è quello di migliorare le condizioni di salute delle comunità insulari della Regione di Diana, affette da un'emergenza cronica causata dalla totale assenza di servizi primari.

Nello specifico, l'obiettivo degli orti tri-familiari è quello di dotare le comunità delle competenze e delle infrastrutture necessarie a sviluppare in autonomia un ciclo integrato di produzione agricola, che contribuisca a raggiungere l'autosufficienza alimentare e a ridurre la malnutrizione.

La fase preliminare del progetto ha previsto una valutazione dello stato di salute della popolazione dei due villaggi, Ampanitsoa e Bevaoko, da parte di una équipe medica. Una équipe di nutrizionisti ha invece raccolto misure antropometriche e parametri ematochimici di donne fertili e bambini e informazioni riguardanti le abitudini alimentari.

Tutti i dati raccolti nella fase preliminare di analisi sono stati poi utilizzati per individuare varietà ortofrutticole caratterizzate da elevato apporto nutrizionale, allo scopo di aumentare la diversità dietetica e contrastare i problemi di malnutrizione cronica che interessano le comunità dei due villaggi.

In tabella 1 vengono riportate le specie scelte per il progetto con relativi contenuti nutrizionali e capacità produttive.

Per dimensionare gli orti è stato calcolato il fabbisogno calorico dei componenti di alcune famiglie del villaggio, è stato considerato che per una dieta sana ed equilibrata gli ortaggi dovrebbero coprire circa il 20% del fabbisogno totale e di conseguenza si è ricavata la produzione necessaria per garantire il giusto apporto di proteine e carboidrati vegetali. Dalla produzione si ricava la metratura necessaria per ogni specie e quindi la dimensione finale dell'orto tri-familiare.

Tabella 1: Elenco delle specie scelte nel progetto degli orti tri-familiari

FAMIGLIA	SPECIE	Contenuto CARBO g/kg W	Contenuto PROT g/kg W	Densità 10m²	PRODUZIONE (kg/pianta)
Amaryllidaceae	Cipolla	686	10	33.5	0.2
Amaryllidaceae	Aglio	84	9	33.5	0.1
Apiacea	Carota	76	11	50	0.2
Asteracea	Lattuga	22	18	200	0.4
Brassicacea	Sukuma wiki	44	29	20	0.8
Chenopodiacea	Spinacio	30	34	300	0.4
Cucurbitacea	Zucca	35	11	6	7
Cucurbitacea	Zucchini	14	13	20	4
Malvacea	Gombo	58	15	40	3
Solanacea	Pomodoro	35	10	20	4
Solanacea	Melanzana	26	11	20	4
Fabacea	Cece secchi	543	218	200	0.6
Fabacea	Fagiolo	517	236	200	0.3
Fabacea	Arachide	112	266	25	3
Solanacea	Patata	180	21	40	4
Poacea	Mais	758	92	20	1

5.2 Sistema di agroforestazione

Un progetto definibile come NBS (Nature Based Solution) nell'ambito dell'agricoltura, come possono essere orti e agroforestazione, dovrebbe sempre avere quattro macrofunzioni: essere una pratica sostenibile, essere una infrastruttura verde, portare miglioramento e garantire la conservazione (Simelton et al 2021).

Per rispettare queste funzioni un progetto deve avere:

- Un elemento produttivo, quindi aumentare la produzione agricola, conservare o aumentare il contenuto di nutrienti in suolo, acqua e piante o migliorare il microclima della zona agricola attraverso la regolazione di umidità, temperature o venti.
- Una funzione strutturale, quindi regolare flussi d'acqua nel suolo e in superficie, prevenire l'erosione del suolo o aumentare la stabilità del terreno.
- Una funzione biochimica, biologica o microbica benefica. Quindi rimuovere, ridurre o contenere gli inquinanti presenti nel sistema in acqua, aria o terreno, migliorare salute del suolo o la salute degli impollinatori o aumentare la resilienza alle malattie o infine fungere da stock di carbonio nel suolo e nelle piante.
- Un beneficio di salvaguardia delle specie, quindi aumentare o proteggere la biodiversità locale o a larga scala.

Date le caratteristiche e i vantaggi legati ai sistemi di agroforestazione descritti nel capitolo 2, la pratica dell'agroforestazione potrebbe essere una soluzione per limitare lo slash and burn.

Potrebbe inoltre essere una valida alternativa al sistema di orti tri-familiari progettato da Kukula o anche affiancarlo e creare un sistema che sia la combinazione delle due pratiche agricole.

6 PROGETTO DI UN SEMPLICE SISTEMA AGROFORESTALE

6.1 Raccolta dati di piante adatte a sistemi di agroforestazione

Tra le informazioni necessarie per progettare l'agroforestazione ci sono dati dendrometrici della pianta come l'altezza e il DBH (diameter at breast height, cioè il diametro misurato ad 1,3 m di altezza) per poterne valutare la crescita.

Altri dati necessari riguardano informazioni sui tempi di rotazione, di vita produttiva totale e sugli anni necessari ad iniziare a produrre per ogni specie di pianta, in modo da poter pianificare una rotazione o combinazione di specie che sia efficace.

Dati relativi alla produzione annuale o per pianta delle diverse specie negli anni servono a valutare se il sistema di agroforestazione che si sta progettando è in grado di avere una produzione agricola sufficiente per il contesto in cui si inserisce. I dati relativi alla spaziatura tra gli alberi della stessa specie servono a pianificare la geometria dell'agroforestazione in modo da evitare competizione interna per le risorse di luce e nutrienti disponibili.

Le informazioni sull'uso abituale di ogni specie nei sistemi di agroforestazione servono a scegliere piante ed alberi che siano compatibili tra loro e creino delle sinergie positive e vantaggi reciproci.

Per poter creare un sistema di agroforestazione che rispetti le funzioni prima elencate è stata quindi necessaria una ricerca di informazioni specifiche per le diverse specie di piante potenzialmente utilizzabili.

Si è creato quindi un primo database di 32 specie, da aggiungere a quelle coinvolte nel progetto per orti tri-familiari, che contenesse informazioni su tutte le specie che sono potenzialmente utilizzabili in un sistema di agroforestazione in un contesto tropicale come quello di Nosy Mitsio in Madagascar. Il database viene presentato in Tabella 2.

Tabella 2: Informazioni raccolte nel database di specie per agroforestazione. Diametro a 1,3 m di altezza, altezza pianta e altre informazioni riguardanti le 32 specie del database.

Specie	DBH (m)	H (cm)	Vita produttiva	Produzione	Spaziatura	Uso in agroforestazione
Palma da cocco - <i>Cocos nucifera</i>	0.3	25	Inizio produttività a 6 anni, vita fino a 80. Diametro arriva veloce a 0.4, crescita rapida in h all'inizio	15-100 frutti all'anno ad albero	Almeno 7-8m di distanza	usato spesso combinato con cereali o piante da frutto
Palma reale - <i>Roystonea regia</i>	3	30				
Papaya - <i>Carica papaya</i>	0.3	8	da 1 a 3 anni circa di vita produttiva, 5y in generale	100 frutti ad albero in condizioni ottimali	3m di distanza	foglie usate come paccame

Teak - <i>Tectona grandis</i>	0.6	35	50 anni periodo di rotazione		2m ma attenzione a radici superficiali molto estese	
Avocado - <i>Persea americana</i>	0.45	15	produzione dopo 6-8 anni	400-600 frutti all'anno	6-9m di distanza	usata in agroforestry multistrato
Tamarindo - <i>Tamarindus indica</i>	1.5	25	produttivo da 7-10 anni, max produttività dai 15 e fino a 200 anni	fino a 200kg ad albero		poco compatibile con altre piante per estensione chioma
Maya caniste - <i>Pouteria campechiana</i>	1	8	dai 3-5 anni, prima con innesto		7-8m di distanza	Albero da ombra
Giacò - <i>Artocarpus heterophyllus</i>	0.8	15	inizio produttività a 8 anni circa	fino a 250 frutti per albero col giusto rapporto F:M	12m	usata in agroforestry multistrato
Cannella - <i>Cinnamomum verum</i>	0.45	10	tagliato ogni 2 anni a regime (vive anche 500 anni)	primo raccolto dopo 3-4 anni		
Guanàbano - <i>Annona muricata</i>	0.15	7	dopo 2 anni, 15 anni circa di vita produttiva	12-24 frutti all'anno	5m di distanza	combinato spesso con mango o avocado
Jambalac - <i>Syzygium samarangense</i>	0.4	12	produttivo dopo 5-6 anni	max 700 frutti in condizioni ottimali	8-10m	ottimo windbreak
Annona squamosa - <i>Annona squamosa</i>	0.2	6	dopo 2 anni, 15 anni circa di vita produttiva	100 frutti ad albero	6m	spesso utilizzato con banana, mango e caffè
Sapotiglia - <i>Manilkara zapota</i>	0.5	25	dopo 8-10 anni, 4-5 con innesto	200-250kg frutti ad albero	8-9m	
Guayabita del Perú - <i>Psidium cattleianum</i>	0.25	12	dopo 2 anni			come siepe ornamentale
Mango - <i>Mangifera indica</i>	0.6	20	produttivo dopo 3-4 anni, 20 anni di vita	500 frutti ad albero	6-12m	
Arancio - <i>Citrus Sinensis</i>	0.4	9	dopo i 2-3 anni se innestati, dopo 3-5 altrimenti, a max h dopo 10-20 anni. Vita produttiva di solito 30 anni	fino a 100 frutti all'anno		

Limone - Citrus Limon		3				
Mandarino - Citrus reticulata	0.2	4.5	dopo i 2-4 anni se innestati, dopo 4-6 altrimenti, 30 anni produttività		8m	
Melarosa Rossa - Syzygium malaccense	0.45	5 - 25		21-85kg per albero all'anno	10m	
Lici - Litchi chinensis		12	dopo i 4-6 anni se innestati, dopo 8-12 altrimenti	5000 frutti (albero di 20anni)	10-12m	ombra
Rollinia mucosa - Rollinia deliciosa		15			4m	
Baobab - Adansonia digitata	10	20	600 anni di vita circa			rami secchi o morti come fertilizzante
salvia - Salvia officinalis		0.6	piante sostituite dopo 3 anni			
guava - Psidium guajava	0.25	10	produttiva dopo 5-8 anni, fino ai 15-25 sui 40 di vita totale	30-40 kg a pianta (5 anni), 50-70 kg al massimo (7 anni)	6-9m	
passion fruit - Passiflora edulis	0.07	9	produttivo dopo 1.5 anni e rimane produttiva per 4-5 anni, vita max 8 anni		3-4m	
banana - Musa acuminata	0.3	3	h max in circa un anno, muore ogni anno e rinasce dal rizoma			
anacardo - Anacardium occidentale	0.3	12	produttivo dopo 3 anni, produz. max a 10 anni (che prosegue fino a 30/40), vita fino a 100	80-200 kg/ha	7-10m	living fence
longan - Dimocarpus longan	1	12	dopo 3-5 anni con innesto, 7-10 altrimenti. Su 400 anni vita	40-55 kg albero	5-8m	
fico nero - Ficus carica	0.2	6	produttivo dopo 5-7 anni, fino ai 50			
fico d'india - Opuntia ficus-indica		5	produttivo dopo 5-6 anni			
moringa (albero del rafano) - Moringa oleifera	0.45	8	produttivo dopo 1-2 anni (1 innesto, 2 no). Cresce molto velocemente i primi anni, anche 3m anno. Vita >30 anni		2-3m	
neem - Azadirachta indica	0.5	15	altezza fino a 6m in 3 anni, 10m in 5 anni. Periodo di rotazione 30 anni ca	5-20kg albero		

I dati e le informazioni presenti nel database sono ricavati sia da articoli di letteratura scientifica sia da siti di agroforestazione e piante tropicali (Food Plants; Plants for a future; Useful Tropical Plants; Analogforestry database).

Non per tutte le specie considerate nel database sono state ricavate tutte le informazioni in quanto la letteratura riguardante i sistemi di agroforestazione è ancora in fase di evoluzione.

6.2 Calcolo della biomassa e del carbonio stoccato

Tra le funzioni biologiche che un sistema naturale può avere vi è lo stoccaggio di carbonio, che in un contesto geografico tropicale come quello del Madagascar è di grandissima importanza. Per valutare il potenziale di stoccaggio di un sistema di agroforestazione bisogna prima stimare la quantità totale di biomassa del sistema.

Per quantificare la biomassa epigea si utilizzano normalmente delle equazioni allometriche, cioè equazioni che mettono in relazione la biomassa secca totale della pianta a dati dendrometrici misurabili quali l'altezza H , il diametro DBH e la densità del legno ρ .

Il sito [GlobaAllomeTree](#) fornisce una selezione dalla letteratura scientifica di equazioni allometriche per calcolare volume e biomassa (sia totale sia di singoli comparti della pianta) di numerose specie. Per ogni equazione vengono specificati quali comparti della pianta (corteccia, tronco, rami, fogliame) si considerano, per quali specie è utilizzabile, le unità di misura delle variabili utilizzate, in che zona geografica del mondo è stata utilizzata e il riferimento bibliografico in letteratura scientifica. Da queste equazioni sono state selezionate le più rappresentative per ciascuna delle specie considerate nel database per agroforestazione. Per le specie per cui non erano presenti equazioni specifiche nel database è stata utilizzata l'equazione di Chave et al. (2014), valida per le specie tropicali in generale.

Per quantificare la biomassa ipogea, per la quale equazioni simili non erano disponibili, si è considerato una percentuale pari a 25% della biomassa epigea, utilizzando lo stesso rapporto radice-chioma utilizzato da Takimoto et al (2008) e suggerito dalle linee guida UNFCCC.

Le stime di biomassa secca epigea e ipogea devono poi essere convertite in contenuto di carbonio. Per questa conversione si è utilizzato come fattore di conversione il valore 0.47 come da linee guida IPCC (2006) mostrate in Fig. 17.

TABLE 4.3 CARBON FRACTION OF ABOVEGROUND FOREST BIOMASS			
Domain	Part of tree	Carbon fraction, (CF) [tonne C (tonne d.m.) ⁻¹]	References
Default value	All	0.47	McGroddy <i>et al.</i> , 2004
Tropical and Subtropical	All	0.47 (0.44 - 0.49)	Andreae and Merlet, 2001; Chambers <i>et al.</i> , 2001; McGroddy <i>et al.</i> , 2004; Lasco and Pulhin, 2003
	wood	0.49	Feldpausch <i>et al.</i> , 2004
	wood, tree d < 10 cm	0.46	Hughes <i>et al.</i> , 2000
	wood, tree d ≥ 10 cm	0.49	Hughes <i>et al.</i> , 2000
	foliage	0.47	Feldpausch <i>et al.</i> , 2004
	foliage, tree d < 10 cm	0.43	Hughes <i>et al.</i> , 2000
	foliage, tree d ≥ 10 cm	0.46	Hughes <i>et al.</i> , 2000
Temperate and Boreal	All	0.47 (0.47 - 0.49)	Andreae and Merlet, 2001; Gayoso <i>et al.</i> , 2002; Matthews, 1993; McGroddy <i>et al.</i> , 2004
	broad-leaved	0.48 (0.46 - 0.50)	Lamloom and Savidge, 2003
	conifers	0.51 (0.47 - 0.55)	Lamloom and Savidge, 2003

Fig. 17: Contenuto di carbonio nella biomassa vegetale (IPCC 2006)

Una volta operata questa conversione si è quindi in grado di valutare il carbonio totale stoccato da una pianta sia nella biomassa sotterranea sia in quella sopra il livello del suolo. Ma il valore ricavato è il valore di carbonio stoccato dalla pianta che ha raggiunto il suo punto massimo di crescita. Per valutare quanto carbonio possa essere stoccato in un sistema di agroforestazione bisogna valutare le diverse specie utilizzate, i loro tempi di rotazione e i tassi di crescita delle piante. Bisogna quindi valutare la dinamica della crescita della pianta e valutare come questa influenzi sia lo stoccaggio di carbonio sia la produzione dell'agroforestazione.

6.3 Dinamica di crescita delle piante

L'approccio più semplice per le analisi di crescita di organismi si basa sul processo di regressione lineare che ha però il limite di ridurre il range di modelli che possono essere utilizzati (Paine et al 2012). L'uso di una relazione lineare inoltre non rende possibile descrivere il progressivo rallentamento del processo di crescita che caratterizza la maggior parte degli organismi.

I modelli lineari assumono un tasso di crescita assoluto costante (AGR Absolute Growth Rate) nel tempo mentre i modelli esponenziali assumono un tasso di crescita relativo costante (RGR Relative Growth Rate). Entrambe queste assunzioni sono limitanti in quanto sia il tasso di crescita assoluto sia quello relativo variano con il variare delle condizioni ambientali.

Più in generale, i modelli di crescita possono essere suddivisi in due grandi gruppi (Paine et al 2012): quelli che assumono l'esistenza di un asintoto superiore che limiti la crescita e quelli che non ne assumono l'esistenza.

L'idea di una dimensione finale asintotica è controversa se si considera una singola pianta, mentre è molto utilizzata in zoologia e biologia per considerare le risorse limitate nella crescita di una popolazione. (Paine et al 2012). Le piante possono avvicinarsi al raggiungere una dimensione asintotica a causa delle risorse limitate nel terreno o per cambiamenti ontogenetici. Gli alberi con chiome folte possono invece avere una crescita asintotica in termini di altezza totale anche se continuano a crescere in termini di circonferenza raggiunta e biomassa totale.

I modelli asintotici sono di solito più appropriati nei casi in cui si studia l'intero ciclo vitale della pianta, come capita spesso con le specie annuali. I modelli non asintotici hanno invece il problema di assumere implicitamente che la crescita della pianta continui indefinitamente, che è una assunzione a volte irrealistica (Paine et al 2012).

Tra le informazioni raccolte per la creazione del database di specie di agroforestazione, le informazioni relative a tassi di crescita assoluti e/o relativi sono risultate essere piuttosto ridotte. Per tutte le specie si ha un valore finale di altezza e diametro a crescita avvenuta. Inoltre, per la maggioranza delle specie il tasso di crescita non viene dato con un valore numerico ma viene riferita solo l'appartenenza a una classe di crescita ('fast', 'medium', 'slow'). Per alcune specie si hanno solo delle informazioni riguardanti il tempo di maturazione o le dimensioni raggiunte dopo un determinato numero di anni.

Partendo da queste informazioni si sono cercati diversi metodi per modellizzare la crescita delle piante.

Il primo approccio tentato è stato quello di applicare un tasso di crescita assoluto costante ad altezza e diametro traducendo in valore numerico le tre categorie 'fast', 'medium' e 'slow'. Si tratta quindi di ipotizzare una crescita lineare in altezza e diametro e utilizzare le equazioni allometriche già utilizzate in precedenza per calcolare biomassa e contenuto di carbonio.

Le tre categorie non hanno dei corrispettivi valori numerici in letteratura scientifica, ma tra le riviste di settore vengono spesso tradotti con i valori riportati in tabella 3.

Tabella 3 Fattori di crescita assoluti per diverse velocità di crescita

TASSO CRESCITA	fast	medium	slow
CM/ANNO	63.5	47	30.5

Questi valori si riferiscono alla crescita in altezza della pianta ma, come visibile in Fig. 18, questo approccio è stato scartato in quanto molto poco realistico rispetto alla reale dinamica di crescita della pianta

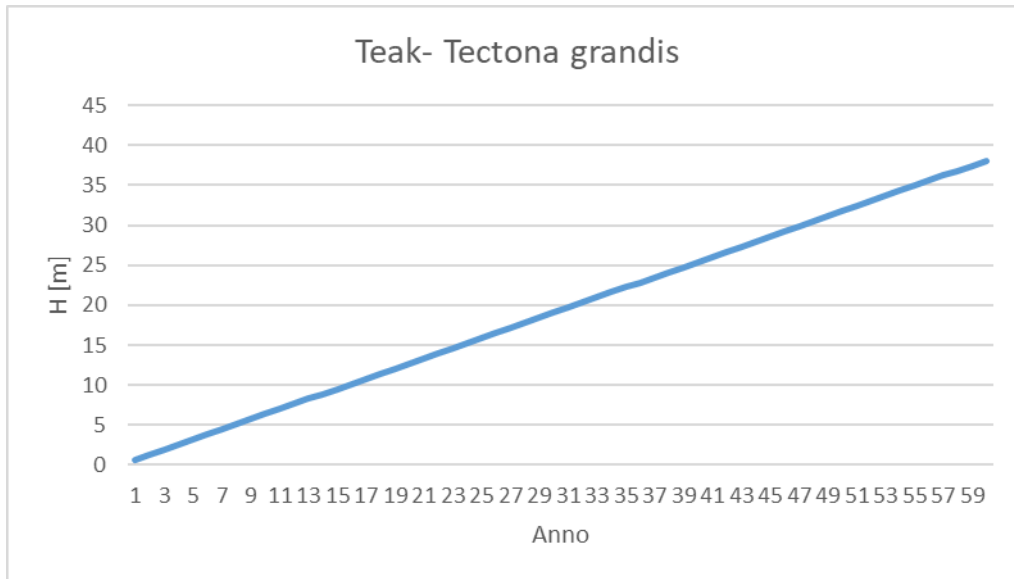


Fig. 18: Crescita in altezza della pianta di teak (*Tectona grandis*) in caso di tasso crescita costante

Il secondo approccio considerato è stato quello di utilizzare le curve di crescita proposte da Bowman et al 2013 e presentate in Fig. 19. Si tratta di curve ideali di crescita per diversi tassi di crescita possibili, da una crescita molto lenta a una molto rapida.

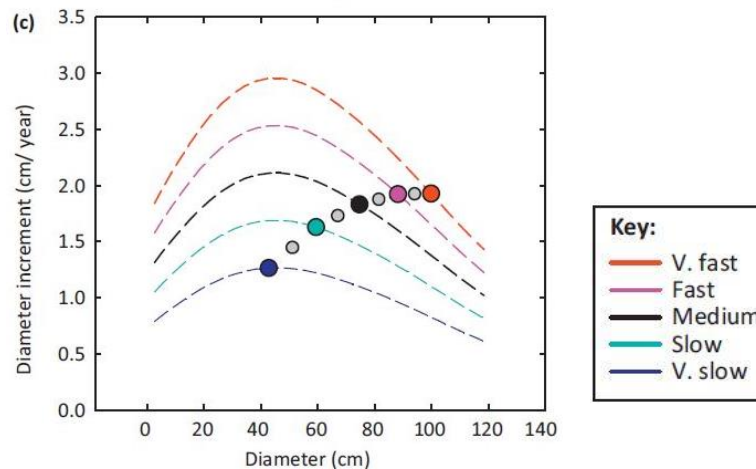


Fig. 19: Curve di crescita del diametro di piante a diverse velocità di crescita (Bowman et al, 2013)

Queste curve di crescita sono state applicate a tre diverse specie, una per categoria di tasso di crescita. Il teak *Tectona grandis* per 'fast', il mango *Mangifera indica* per 'medium' e la specie *Annona squamosa* per 'slow'. I risultati sono mostrati in Fig. 20.

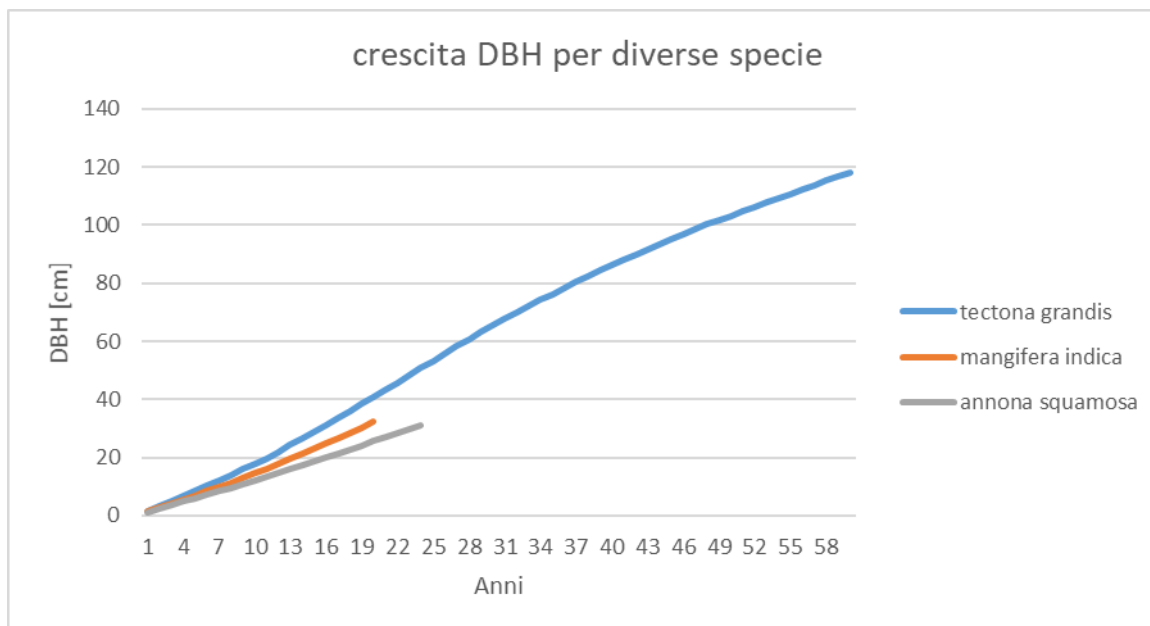


Fig. 20: Esempi di crescita di DBH per diverse specie usando le curve proposte da Bowman et al (2013)

I valori di riferimento per il DBH delle tre specie sono rispettivamente 60cm per *Tectona grandis*, 80 per *Mangifera indica* e 20 per *Annona squamosa*. I valori ricavati con le curve di crescita, come si può notare dalla Fig. 20, si discostano di molto dai valori di riferimento a disposizione; quindi, anche questo approccio di modellizzazione è stato scartato.

Dati i risultati ottenuti con i primi due approcci, si è deciso di passare ad utilizzare dei modelli asintotici.

L'equazione logistica è probabilmente la funzione sigmoide asintotica più conosciuta ed usata per descrivere la dipendenza dal tempo di processi di crescita biologica (Thornley & France 2004). L'equazione logistica ha innumerevoli usi in campo biologico, e lo stesso vale per le forme modificate di logistica come la funzione di Richards, l'equazione di Gompertz o la funzione di Von Bertalanffy.

La funzione di crescita di Von Bertalanffy è un caso di funzione logistica generalizzata che viene normalmente utilizzata in biologia per valutare la crescita in lunghezza degli animali nel tempo. In particolare, è comunemente utilizzata per la crescita dei pesci.

La funzione di Von Bertalanffy è descritta dall'equazione 6.1

$$L(a) = L_{\infty}(1 - \exp(-k(a - t_0))) \quad (6.1)$$

Dove:

- L_{∞} = è il valore asintotico
- a = età
- k = coefficiente di crescita

- t_0 = età con valore iniziale zero

Una versione modificata dell'equazione di Von Bertalanffy è stata utilizzata da Perez & Kanninen (2005) per modellizzare la crescita nel tempo di altezza e diametro di piante di *Tectona grandis*. Le due equazioni utilizzate sono l'equazione 6.2 e 6.3.

$$DBH = DBH_{\infty}((1 - \exp(-0.07 * t))^{1.165}) \quad (6.2)$$

$$H = H_{\infty}((1 - \exp(-0.09 * t))^{1.1}) \quad (6.3)$$

Equazioni di questa tipologia, con parametrizzazioni diverse per descrivere le diverse velocità di crescita delle diverse specie, sono state quindi utilizzate per modellizzare la crescita di DBH e altezza di tutte le specie presenti nel database. In Fig. 21, 22, 23 si mostrano gli andamenti di crescita per *Tectona grandis*, *Mangifera indica* e *Annona squamosa*.

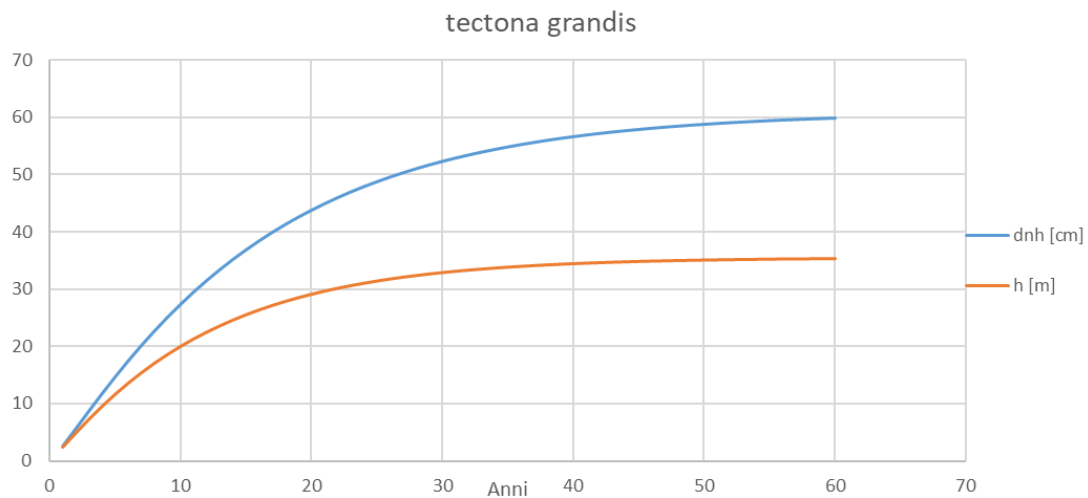


Fig. 21: Dinamica di crescita di diametro e altezza per una pianta di *Tectona grandis* utilizzando una funzione di Von Bertalanffy modificata

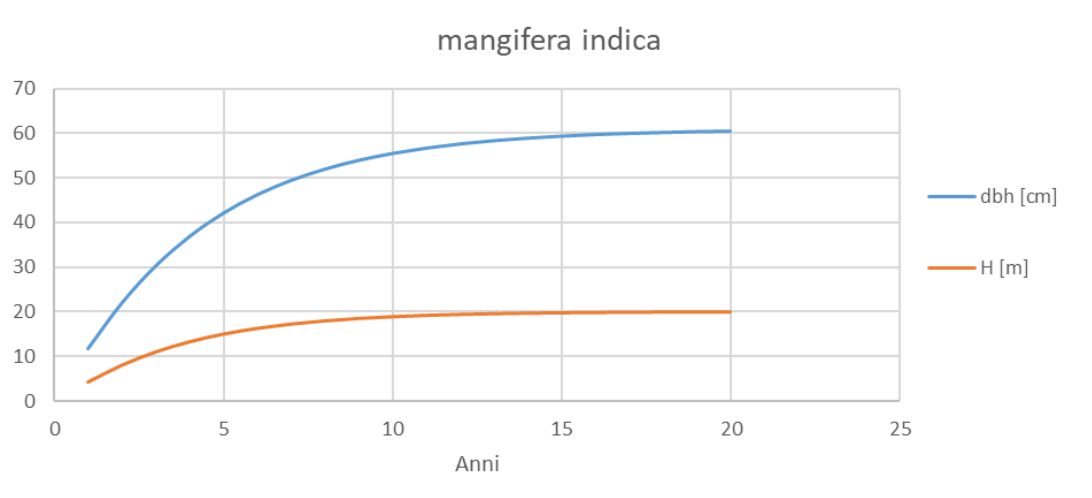


Fig. 22: Dinamica di crescita di diametro e altezza per una pianta di *Mangifera indica* utilizzando una funzione di Von Bertalanffy modificata

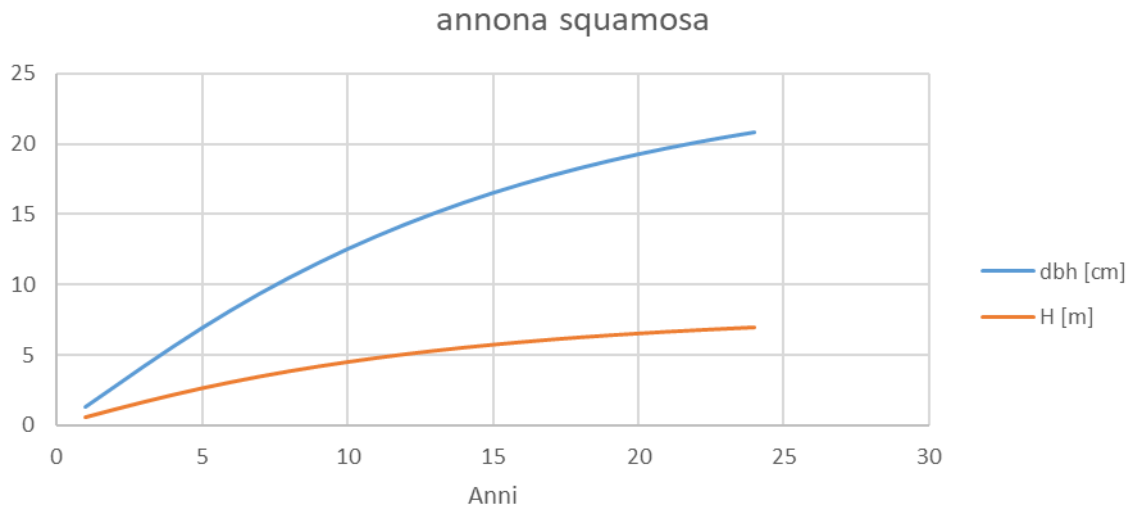


Fig. 23: Dinamica di crescita di diametro e altezza per una pianta di *Annona squamosa* utilizzando una funzione di Von Bertalanffy modificata

Una volta valutata la dinamica di crescita di DBH e altezza sono state applicate, per tutte le specie del database, le equazioni allometriche e le proporzioni già menzionate in precedenza per calcolare biomassa e carbonio stoccato sia sottoterra sia sopra il livello del suolo ad ogni anno di crescita della pianta.

In Fig. 24 viene mostrato un esempio di come lo stoccaggio di carbonio aumenti nei due comparti con la crescita della pianta.

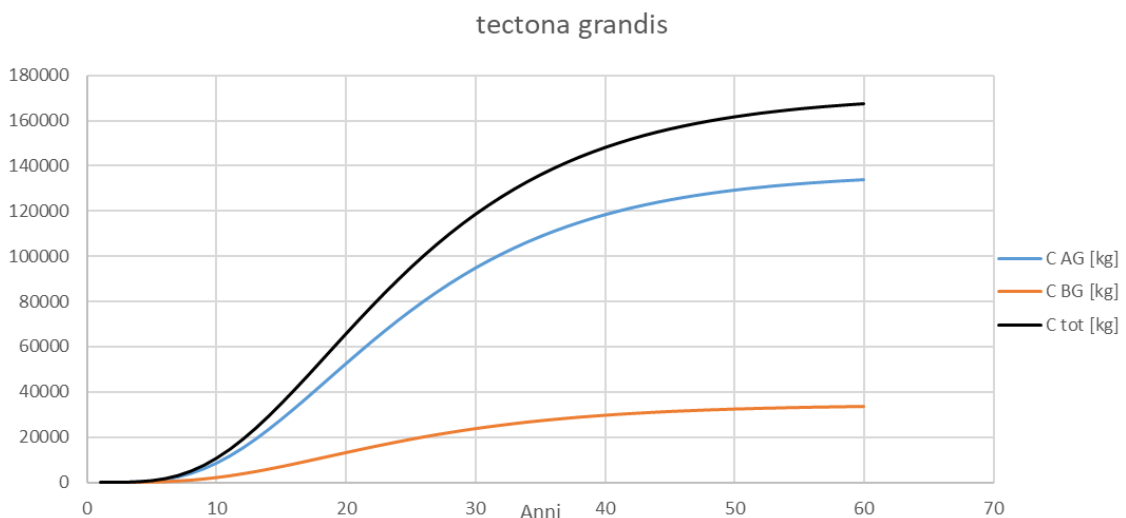


Fig. 24: Dinamica stock di C sottoterra e sopra il livello del suolo per una pianta di *Tectona grandis*

6.4 Scelta dello schema di agroforestazione

La pratica di agroforestazione scelta è quella dell'intercropping basata sul cocco. L'intercropping è la tecnica più adatta al contesto dell'isola di Nosy Mitsio per la possibilità di garantire sia produzione di cibo adeguata sia risultati dal punto di vista ambientale.

La scelta del cocco come specie che faccia da riparo e contorno delle specie orticole o a rotazione più breve è dovuta sia alle caratteristiche specifiche della specie sia al fatto che intorno ai villaggi di Ampanitsoa e Bevaoko sono presenti delle foreste di cocco dense o rade.

Il cocco è una specie che ben si adatta all'intercropping per diverse motivazioni:

- ha un periodo di rotazione piuttosto lungo, di circa sessanta anni;
- raggiunge un'altezza di 30m circa lasciando lo spazio per crescere anche in altezza ad altre piante;
- il suo apparato radicale si estende per circa 2m in larghezza e 25-60cm in profondità lasciando circa il 70-75% del suolo tra due piante di cocco disponibile per altre specie;
- in media lascia passare il 50-60% della radiazione solare; il valore effettivo varia con età, dimensione e disposizione geometrica delle piante di cocco.

Lo schema dell'agroforestazione proposta è riportato in Fig. 25. La configurazione finale è stata suggerita dall'agronomo che collabora con l'associazione Kukula e che ha lavorato al progetto degli orti tri-familiari.

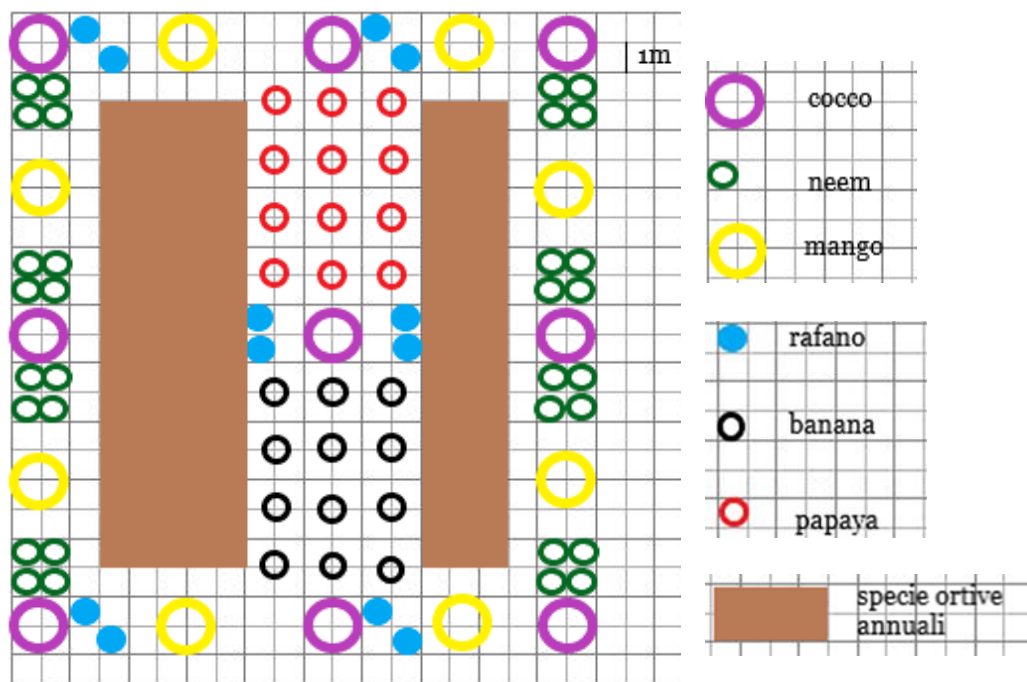


Fig. 25: schema della distribuzione delle piante nel sistema di agroforestazione proposto

Le specie presenti sono state scelte per le sinergie reciproche presenti, perché in grado di garantire una produzione di cibo continua e al contempo garantire uno stock di carbonio elevato. Alcune specie sono state scelte per delle loro caratteristiche specifiche. La banana, *Musa acuminata*, infatti, è particolarmente adatta a sistemi agricoli in contesti dove le conoscenze tecniche di agricoltura non sono molto elevate. Il banano è una specie rizomatosa, le piante muoiono ogni

anno dopo il raccolto per rinasce dal rizoma garantendo una, seppur minima, valvola di sicurezza per la produzione del sistema.

7 RISULTATI

7.1 Scenari confrontati

Per confrontare i diversi scenari si è deciso di utilizzare 1ha come unità di riferimento. È stato scelto questo come valore di riferimento in quanto il progetto degli orti di Kukula prevede orti con un'estensione pari a circa 1ha nel villaggio di Ampanitsoa e inoltre gli appezzamenti di riso già esistenti nei villaggi hanno un'estensione che varia da 0.5 a 2 ha.

Gli scenari possibili che si delineano per un ettaro di riferimento sono dunque quattro:

- conservazione della foresta integra
- coltivazione con slash and burn
- progetto orti Kukula
- agroforestazione

Per valutare lo scenario degli orti si è partiti dai dati raccolti sulla popolazione del villaggio di Ampanitsoa e dagli orti pianificati in base ai dati di quattro famiglie di cui si conosce il numero dei componenti, la loro età ed il sesso per poter calcolare il loro fabbisogno calorico medio. Dal fabbisogno delle quattro famiglie è stata ricavata l'estensione degli orti necessari al suo soddisfacimento ed è stato successivamente calcolato quello che risulterebbe essere l'orto familiare medio del villaggio di Ampanitsoa che è mostrato in tabella 4.

Tabella 4: Numero di piante per specie in orto medio per villaggio di Ampanitsoa

SPECIE	N PIANTE
Cipolla	194
Aglione	432
Carota	375
Lattuga	324
Sukuma wiki	162
Spinacio	475
Zucca	23
Zucchina	76
Gombo	25
Pomodoro	31
Melanzana	41
Cece secchi	77
Fagiolo	137
Arachide	17
Patata	67
Mais	34

In un ettaro di terreno di riferimento si possono inserire sei orti tri-familiari composti ciascuno da tre orti medi per un totale di diciotto orti medi in un ettaro di terreno.

Per una valutazione più precisa dell'estensione degli orti andrebbe considerata la rotazione delle colture all'interno dell'anno, che porterebbe quindi a non avere contemporaneamente tutte le

piante mostrate in tabella 4 e quindi ad una possibile ottimizzazione dell'estensione totale dell'orto. Ma, ai fini dell'analisi di questo lavoro di tesi e quindi ai fini del calcolo di stoccaggio di carbonio e di produzione totale di cibo non è necessario considerare la rotazione intra-annuale delle colture; in quanto la produzione totale sarebbe invariata e la variazione di stock di carbonio sarebbe, se presente, trascurabile. Inoltre, considerare l'orto come se tutte le piante fossero coltivate nello stesso momento equivale a considerare il caso peggiore, cioè l'estensione degli orti non potrà mai essere maggiore di quanto considerato in questa analisi.

Per l'agroforestazione, utilizzando lo schema descritto nel paragrafo 6.2 su un ettaro di terreno, il numero di piante per specie è quello descritto in tabella 5. Per quanto riguarda le specie orticole annuali, sono state considerate a titolo di esempio quattro specie: pomodoro, *Solanum lycopersicum*, melanzana, *Solanum melongena*, spinacio, *Spinacia oleracea*, e lattuga, *Lactuca sativa*. Per le specie orticole si immagina una suddivisione al 50% dei terreni dedicati alle coppie pomodoro-melanzana e lattuga-spinacio con una rotazione dei terreni di anno in anno.

Tabella 5: Numero di piante per specie in un ettaro di agroforestazione proposta

Specie	n piante
Palma da cocco - <i>Cocos nucifera</i>	100
Papaya - <i>Carica papaya</i>	300
banana - <i>Musa acuminata</i>	300
Mango - <i>Mangifera indica</i>	100
moringa (rafano) - <i>Moringa oleifera</i>	200
Neem - <i>Azadirachta indica</i>	400
Pomodoro - <i>Solanum lycopersicum</i>	1584
Melanzana - <i>Solanum melongena</i>	1584
Spinacio - <i>Spinacia oleracea</i>	24240
Lattuga - <i>Lactuca sativa</i>	16160

Per valutare correttamente questi due scenari bisogna comprendere come il carbonio viene stoccato al suolo e quanto ne viene stoccato o rilasciato alla fine di ogni ciclo produttivo, annuale per le specie orticole e variabile per le altre specie.

Uno degli aspetti fondamentali nello stoccaggio di carbonio nel suolo è il rapporto radici-suolo, per quantificare quanto carbonio possa essere trasferito al suolo da una pianta bisogna comprendere come le radici interagiscono con il suolo.

La rizosfera è quella regione sottile di suolo che circonda le radici delle piante, che è influenzata direttamente dalle secrezioni delle piante chiamate essudati. I processi che avvengono nella rizosfera, risultato delle interazioni tra suolo pianta e microbi, sono estremamente importanti per lo sviluppo, il nutrimento e la salute della pianta.

Gli essudati radicali svolgono un ruolo cruciale nella componente chimica dell'ecologia della rizosfera e sono la chiave per il trasferimento di carbonio al suolo (Iannucci et al, 2021). Gli essudati radicali costituiscono tra il 5% e il 21% di tutto il carbonio fissato da fotosintesi o tra il 15 e 25% circa di tutto il carbonio sotto il livello del suolo (Iannucci et al, 2021).

Il flusso di carbonio attraverso le radici delle piante verso la rizosfera è regolato in parte da processi interni alla radice e in parte da processi come la fotosintesi che avvengono nella parte superiore della pianta. Gli essudati radicali rappresentano un flusso di carbonio piccolo ma significativo che coinvolge una grande varietà di composti (Farrar et al, 2003). Sono processi complessi sia dal punto di vista spaziale sia temporale e che dipendono molto dalle condizioni fisiologiche delle radici e dalla natura dell'ambiente che le circonda (Farrar et al, 2003).

Di tutto il carbonio che viene partizionato nel sottosuolo, circa il 50% è stoccato nella biomassa delle radici, il 33% ritorna in atmosfera per effetto della respirazione delle rizosfera, il 12% può essere recuperato come residuo al suolo e una piccola parte è perso per liscivazione o deflusso superficiale.

Assumendo che le radici e i microorganismi contribuiscano in modo equivalente alla respirazione della rizosfera, assunzione da trattare comunque con cautela, una stima della rizodeposizione sarebbe di circa l'11% del carbonio netto fissato o il 27% di tutto il carbonio allocato alle radici (Jones et al, 2009).

Per gli scenari di foresta vergine e slash and burn invece, si considerano semplicemente un ettaro di foresta integra nel primo caso e un ettaro coltivato con l'attuale tecnica agricola utilizzata nei villaggi di Nosy Mitsio.

7.2 Indicatori utilizzati

Le prestazioni dei diversi scenari, sia per quanto riguarda l'impatto ambientale sia per quanto concerne l'aspetto nutrizionale e di bilanciamento della dieta, sono state valutate utilizzando opportuni indicatori.

Per quanto riguarda le prestazioni ambientali tutti e quattro gli scenari possono essere valutati utilizzando degli indicatori riguardanti i servizi ecosistemici relativi al ciclo del carbonio. Gli indicatori utilizzati in questa analisi sono quattro: stock di carbonio (t/ha), sequestro di carbonio totale (t/ha y), sequestro di carbonio nel suolo (t/ha y) ed emissioni da deforestazione evitate cumulate (tCO_{2eq}).

Lo stock di carbonio nel sistema viene calcolato con l'equazione 7.1

$$CS_{xt} = \sum_{j=1}^j A_{xjt}(C_{aj} + C_{bj} + C_{sj} + C_{oj}) \quad (7.1)$$

Dove:

- CS_{xt} = stock di carbonio nel lotto x al tempo t (t C)

- A_{xjt} = area del lotto x al tempo t (ha)
- C_{aj} = carbonio nella biomassa epigea (t C/ha)
- C_{bj} = carbonio nella biomassa ipogea (t C/ha)
- C_{sj} = carbonio nel suolo (t C/ha)
- C_{oj} = carbonio in altri comparti organici (lettiera e legno morto) (t C/ha)

Il carbonio stoccato in un ettaro risulta quindi essere la somma del carbonio contenuto nella biomassa, nei comparti organici e nel suolo.

Il sequestro di carbonio invece rappresenta un incremento, o una riduzione, dello stock di carbonio nel tempo, e viene calcolato usando l'equazione 7.2

$$\Delta C_{xtT} = C_{xT} - C_{xt} \quad (7.2)$$

Dove:

- ΔC_{xtT} = carbonio sequestrato in un lotto dall'anno t all'anno T ($t < T$) (t C/ha)
- C_{xt} = stock di carbonio in un lotto all'anno t (t C/ha)
- C_{xT} = stock di carbonio in un lotto all'anno T (t C/ha)

In questo caso C_{xt} viene utilizzato come punto di riferimento per determinare se è avvenuto un sequestro o un'emissione netta di carbonio tra gli anni t e T . Se ΔC_{xtT} è positivo significa che è stato sequestrato del carbonio nel sistema nel periodo tra i due anni, se invece ΔC_{xtT} è negativo significa che vi è stato un rilascio di carbonio nel sistema nel periodo considerato.

I due indicatori utilizzati per il sequestro sono valori annuali, si calcola quindi la riduzione dello stock in un'unità di tempo dividendo il valore ΔC_{xtT} per il ΔT che si sta considerando. Si ottengono così i flussi annuali.

Per quantificare le emissioni da deforestazione evitate bisogna invece delineare uno scenario di '*business as usual*' per l'andamento della deforestazione. Una volta noto questo scenario di riferimento si possono valutare le emissioni evitate, ipotizzando che il passaggio da foresta ad un'altra copertura di suolo comporti una riduzione dello stock di carbonio con conseguente rilascio in atmosfera della differenza di carbonio.

Per calcolare il tasso di deforestazione dell'isola di Nosy Mitsio sono stati utilizzati i dati di copertura del suolo della regione Diana forniti dal servizio di monitoraggio 'Global Land Cover' di Copernicus mostrati in Fig. 26 e 27.

Diana

Year: 2015
Total area: 19,409km²
Country: Madagascar



Land Cover composition

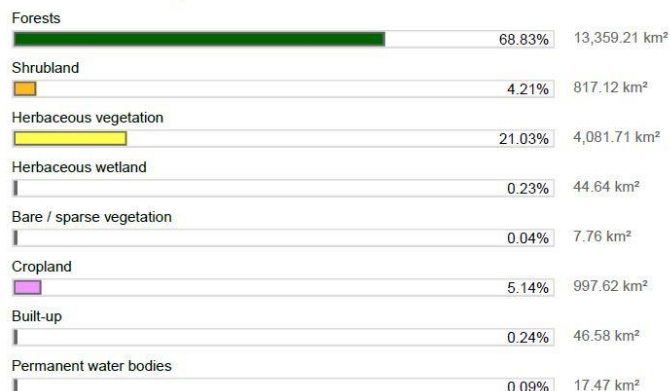


Fig. 26: Coperture del suolo regione Diana anno 2015, 'Global Land Cover' Copernicus

Diana

Year: 2019
Total area: 19,409km²
Country: Madagascar



Land Cover composition

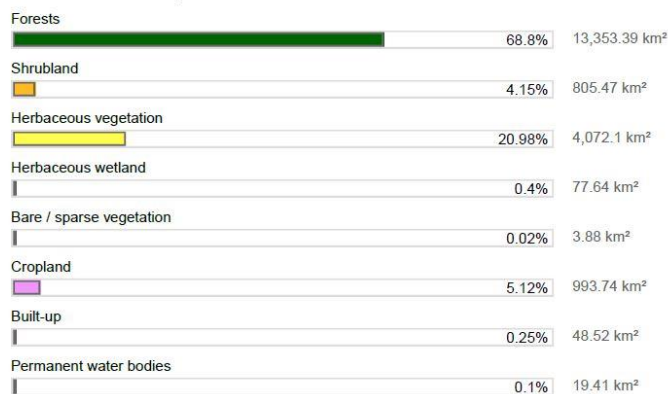


Fig. 27: Coperture del suolo regione Diana anno 2019, 'Global Land Cover' Copernicus

Una volta calcolato il tasso di deforestazione della regione Diana si ricava quello dell'isola di Nosy Mitsio, in proporzione all'area totale, che servirà come riferimento e scenario 'business as usual'.

Per quanto riguarda il confronto dal punto di vista alimentare e della dieta solo gli scenari di orti ed agroforestazione possono essere confrontati in quanto non vi sono dati riguardanti le monoculture di riso con la tecnica dello slash and burn nell'isola.

Per confrontare i due scenari si è utilizzato come indicatore il numero di abitanti il cui fabbisogno annuale medio di carboidrati e di proteine è teoricamente coperto da 1ha di orti o agroforestazione. Lo scenario dell'agroforestazione è stato ulteriormente suddiviso in due diversi scenari differenziati dalla percentuale di fabbisogno che viene coperta da frutta e ortaggi, 20% e 50% rispettivamente.

7.3 Ipotesi e premesse

Prima di presentare i risultati del confronto tra i diversi scenari si illustrano alcune ipotesi di lavoro fatte nel calcolo degli indicatori.

Il valore di carbonio stoccato nella foresta è stato calcolato come somma di tre fattori, il carbonio nella biomassa epigea, quello nella biomassa ipogea e il carbonio nel suolo. Per il valore medio di carbonio nella biomassa epigea nella foresta tropicale secca è stato utilizzato il valore ricavato da Vielledent et al (2016) pari a 52 t/ha. Il carbonio nella biomassa ipogea è stato ricavato moltiplicando il valore di 52 t/ha per il fattore 0.25 già presentato nel paragrafo 6.2. Infine, per il carbonio nel suolo il valore è stato ricavato dall'analisi per i diversi usi del suolo del Madagascar, vedi paragrafo 4.3, da cui risulta un valore medio di carbonio nell'isola di Nosy Mitsio nei suoli caratterizzati da foresta come copertura del suolo pari a 57.8 t/ha.

Inoltre, per una corretta comprensione dei valori ricavati per alcuni indicatori è necessaria una descrizione di come è stato valutato lo stoccaggio di carbonio nel suolo a fine ciclo per i casi degli orti e dell'agroforestazione.

Per quanto riguarda gli orti è stato ipotizzato, come già previsto dal progetto dell'associazione Kukula, che dopo il raccolto i residui delle piante vengano lasciati sul terreno come pacciamatura. Il carbonio che viene rilasciato nel suolo viene quantificato come il 5% del carbonio presente nel comparto di biomassa viva totale, (sia epigea sia ipogea; IPCC 2006). I valori ricavati sono presentati in tabella 6.

Per lo scenario di agroforestazione invece il carbonio sequestrato al suolo per ogni specie è stato calcolato considerando sia la rizodeposizione da parte delle radici sia l'utilizzo della biomassa residua come pacciamatura. Per la rizodeposizione si considera il 15% del carbonio nel comparto sotto il livello del suolo (Iannucci et al. 2021) mentre per la pacciamatura è stato considerato per semplicità solo l'apparato fogliare, pari in media al 5% della biomassa totale sopra il livello del suolo, nell'ultimo anno del ciclo; il resto della biomassa della pianta si ipotizza che esca dal sistema come raccolto o legname. L'apporto reale dell'utilizzo della biomassa per pacciamatura potrebbe essere maggiore di quello considerato in questa analisi, in quanto rami e foglie perse negli altri anni di vita della pianta possono essere utilizzati come pacciamatura al terreno e trasferire quindi carbonio al suolo. Tuttavia, a causa della difficoltà nel quantificare con certezza la biomassa utilizzabile per la pacciamatura durante l'intero ciclo di vita della pianta si è deciso di non considerare questo aspetto.

Tabella 6: Carbonio nel suolo per singola specie dopo raccolto in un orto medio

SPECIE	CARBONIO [KG] NEL SUOLO DOPO RACCOLTO
Cipolla	1.2
Aglione	1.3
Carota	2.3
Lattuga	4.0
Sukuma wiki	4.0
Spinacio	5.9
Zucca	5.0
Zucchini	9.4
Gombo	2.2
Pomodoro	3.7
Melanzana	5.1
Ceci secchi	1.4
Fagiolo	1.3
Arachide	0.2
Patata	8.3
Mais	1.1

In entrambi i casi, agroforestazione e orti, non è stato considerato il flusso di carbonio rilasciato dal suolo nello smuovere il terreno tra un ciclo e l'altro per la sostituzione delle piante per mancanza di dati che ne permettessero una stima corretta. Si ipotizza che sia comunque un flusso dal valore trascurabile rispetto ai flussi presi in considerazione nell'analisi.

Il sistema di agroforestazione, tra i quattro scenari, è per conformazione quello per il quale l'andamento dello stock di carbonio è più soggetto a variabilità nel tempo in quanto influenzato dalle differenti lunghezze dei cicli delle diverse piante. Si mostrano in Fig. 28 e 29 gli andamenti dello stock di carbonio rispettivamente sopra e sotto il livello del suolo.

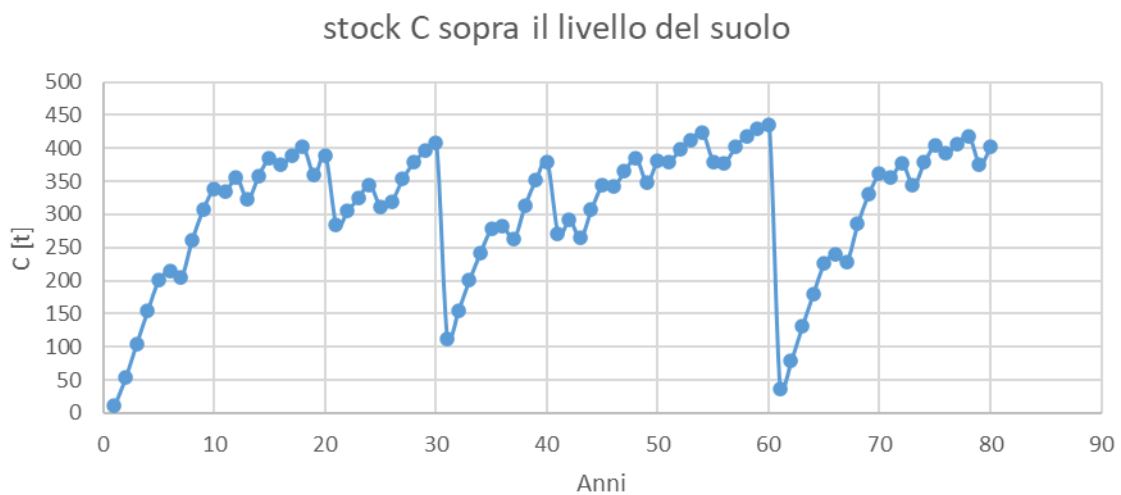


Fig. 28: Andamento temporale del contenuto di carbonio sopra il livello del suolo nel sistema di agroforestazione proposto



Fig. 29: Andamento temporale del contenuto di carbonio sotto il livello del suolo nel sistema di agroforestazione proposto

Come si può notare dalla Fig. 28 l'andamento del carbonio nella biomassa sopra il livello del suolo è altalenante, ciò è dovuto alle differenze tra i cicli di raccolto delle diverse specie. Si può notare infatti, come esempio, come tra l'anno 60 e 61 vi sia una riduzione netta del contenuto di carbonio nella biomassa. Questo andamento è dovuto al fatto che in quell'anno coincidono le conclusioni dei cicli di raccolta di tutte le specie presenti nel sistema tranne per le piante di cocco che hanno un ciclo di 80 anni. Più in generale tutti gli scalini che si vedono nel grafico sono da attribuire alla fine del ciclo di qualche specie del sistema.

Anche nell'andamento del contenuto di carbonio sotto il livello del suolo, Fig. 29, si possono notare degli scalini dovuti alla fine del ciclo produttivo delle diverse specie che comporta la sostituzione della pianta con un nuovo esemplare il cui apparato radicale ha un contenuto di

carbonio minore. Il valore di carbonio sotto il livello del suolo è dato dalla somma di due componenti, il carbonio nella biomassa delle radici, mostrato in Fig.30 e lo stock di carbonio non proveniente da biomassa nel suolo, mostrato in Fig.31.

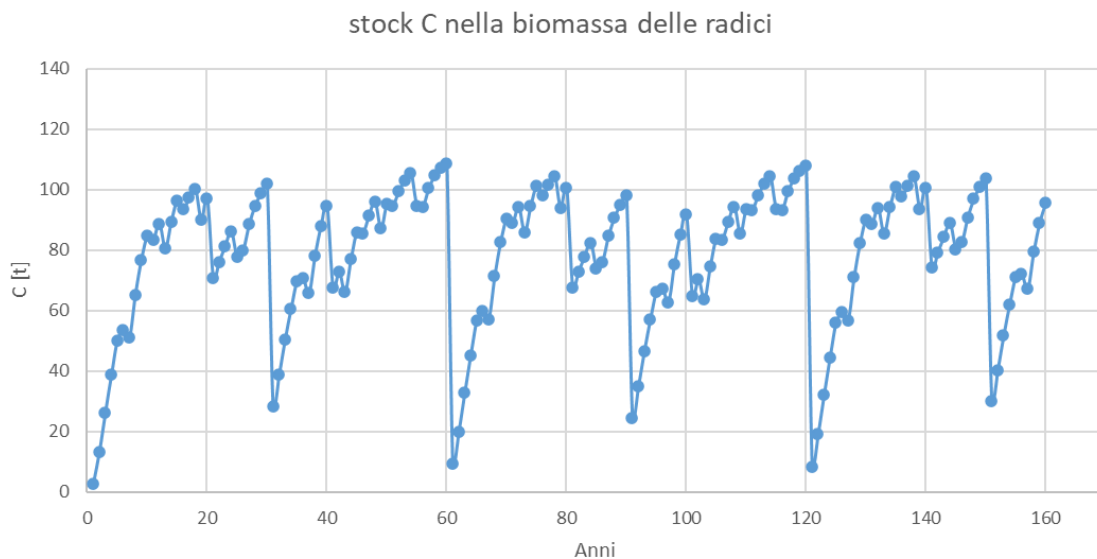


Fig.30: andamento dello stock di C nella biomassa delle radici nel sistema di agroforestazione

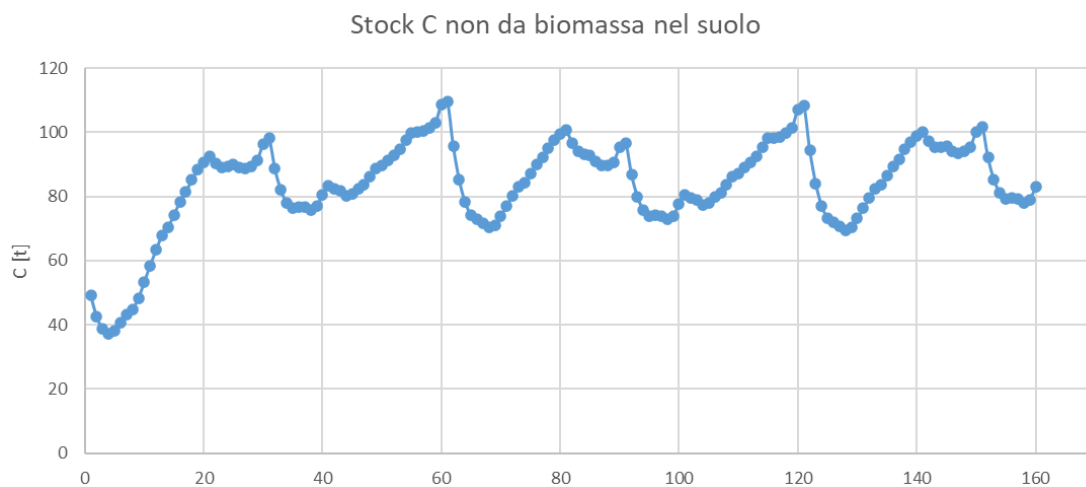


Fig.31: Andamento dello stock di C non proveniente da biomassa nel suolo nel sistema di agroforestazione

Lo stock di carbonio non da biomassa viene calcolato attraverso l'equazione 7.3

$$C_{t+1} = C_t(1 - d) + C_{pacc} + C_{riz} \quad (7.3)$$

Dove:

- C_t : stock di carbonio non da biomassa al tempo t [t/ha]
- d : tasso di decomposizione del carbonio organico nel suolo [-]
- $C_{pacc} = C_{ep\ t+1} * 0.05$: carbonio in ingresso nel suolo per pacciamatura [t/ha]
- $C_{riz} = C_{ip\ t} * 0.15$: carbonio nel suolo per rizodeposizione [t/ha]

Il carbonio per rizodeposizione viene calcolato come il 15% della biomassa ipogea e il carbonio per pacciamatura come il 5% della biomassa epigea. Il tasso di decomposizione del carbonio organico nel suolo rappresenta invece la percentuale di carbonio perso ogni anno dal suolo per decomposizione. Il valore di decomposizione utilizzato in questa analisi è pari a 14% di carbonio perso ogni anno.

Per quantificare il valore di decomposizione del carbonio organico nel suolo, il primo approccio è stato la ricerca del dato nella letteratura scientifica. I tassi ricavati dalla letteratura per foreste pluviali erano troppo alti e risultavano in andamenti del carbonio nel suolo per l'agroforestazione non compatibili con i valori di stock di carbonio a Nosy Mitsio ricavati dall'analisi descritta nel capitolo 4. L'approccio che è stato quindi utilizzato è stato quello di ricavare il tasso di decomposizione della foresta partendo dai dati a disposizione riguardanti la foresta tropicale secca dell'isola. Poiché si ipotizza che la foresta sia all'equilibrio, se si conoscono tutti gli altri dati si può ricavare il tasso di decomposizione del carbonio organico nel suolo. Il valore di carbonio nella biomassa epigea è noto e ricavato dallo studio di Vielledent et al. (2016), e da questo valore si ricava la biomassa ipogea da cui dipende la rizodeposizione. Per il valore di biomassa morta e humus si utilizza il valore proposto da Giweta (2020) di 6 tC/ha y. Una volta noti questi valori si ricava il tasso di decomposizione come la percentuale di biomassa persa ogni anno che permette alla foresta di raggiungere un valore di stock di carbonio nel suolo all'equilibrio che sia uguale al dato di 57 t/ha ricavato dall'analisi sullo stock di carbonio nel suolo di Nosy Mitsio. Il valore che si ottiene è pari a 14% per cui $d=0.14$ nell'equazione 7.3.

Il valore di decomposizione è stato ipotizzato uguale anche per gli scenari di *slash and burn* e orti multifamiliari.

7.4 Risultati indicatori ambientali per il confronto degli scenari

I risultati degli indicatori presentati nel paragrafo 7.2 per quanto riguarda le prestazioni ambientali nei diversi scenari sono presentati in tabella 7, 8 e 9. Gli indicatori relativi ai servizi ecosistemici del ciclo del carbonio sono stati valutati su tre intervalli temporali diversi, 40, 60 e 80 anni per verificare la velocità con cui si raggiungono gli obiettivi prefissati con le diverse opzioni agricole.

Tabella 7: Risultati dei diversi indicatori di servizi ecosistemici del ciclo del carbonio per i quattro scenari analizzati dopo 40 anni

SCENARIO	STOCK DI CARBONIO [T/HA]	SEQUESTRO DI CARBONIO TOTALE [T/HA ANNO]	SEQUESTRO DI CARBONIO NEL SUOLO [T/HA ANNO]	EMISSIONI EVITATE CUMULATE [TCO₂EQ]
foresta	122.8	0	0	190.7
orto kukula	7.4	-1.2	-1.22	190.7
slash and burn	0.14	-3.0	-1.7	
agroforestazione	432.7	12.4	0.59	190.7

Tabella 8: Risultati dei diversi indicatori di servizi ecosistemici del ciclo del carbonio per i quattro scenari analizzati dopo 60 anni

SCENARIO	STOCK DI CARBONIO [T/HA]	SEQUESTRO DI CARBONIO TOTALE [T/HA ANNO]	SEQUESTRO DI CARBONIO NEL SUOLO [T/HA ANNO]	EMISSIONI EVITATE CUMULATE [TCO₂EQ]
foresta	122.8	0	0	190.7
orto kukula	7.3	-0.81	-0.81	190.7
slash and burn	0.05	-2.0	-1.1	0
agroforestazione	472.1	9.9	0.86	190.7

Tabella 9: Risultati dei diversi indicatori di servizi ecosistemici del ciclo del carbonio per i quattro scenari analizzati dopo 80 anni

SCENARIO	STOCK DI CARBONIO [T/HA]	SEQUESTRO DI CARBONIO TOTALE [T/HA ANNO]	SEQUESTRO DI CARBONIO NEL SUOLO [T/HA ANNO]	EMISSIONI EVITATE CUMULATE [TCO₂EQ]
foresta	122.8	0	0	190.7
orto kukula	7.2	-0.61	-0.61	190.7
slash and burn	0.02	-1.5	-0.86	0
agroforestazione	468.3	6.8	0.53	190.7

Come si può notare dalle tre tabelle il valore di stock di carbonio della foresta è uguale per tutti i tre intervalli di tempo considerati: ciò è dovuto alla procedura, spiegata nel paragrafo 7.3, utilizzata nel calcolo dell'indicatore e all'ipotesi di base che la foresta sia in stato di equilibrio. Lo stock di carbonio è quindi costante e uguale a 122.8 t/ha per tutti gli intervalli. Come conseguenza del valore di stock di carbonio costante si ottiene che il sequestro di carbonio è nullo nel caso della foresta con le ipotesi utilizzate in questa analisi.

Per quanto riguarda lo scenario di slash and burn, come si vede dalle tabelle 8,9 e 10, il valore di stock di carbonio è prossimo allo zero per tutti i tre intervalli di tempo considerati. Questo valore è il risultato di una doppia azione, la deforestazione e successiva combustione della biomassa che ha fatto perdere il carbonio nella biomassa epigea e la perdita per decomposizione, negli anni, della quasi totalità del carbonio rimasto nel suolo e del carbonio della biomassa ipogea morta.

I valori di sequestro annuale di carbonio totale e di sequestro annuale di carbonio nel suolo sono entrambi negativi e differiscono tra loro solo perché il primo considera anche la perdita delle 52 tC/ha nella biomassa epigea per la deforestazione. Invece, la differenza tra gli indicatori di sequestro annuale tra i diversi periodi è quasi unicamente legata alla differente lunghezza del periodo che si considera; infatti, dopo 40 anni lo stock residuo nel suolo è già sceso a circa 0.15 t/ha.

Per quanto riguarda l'indicatore di emissioni da deforestazione evitate, nel caso dello slash and burn il suo valore è ovviamente pari a 0 in quanto la deforestazione avviene normalmente allo stesso ritmo dello scenario di deforestazione 'business as usual'.

Più differenziati sono invece i risultati legati agli scenari di agroforestazione e orti, mostrati in un confronto tra i tre diversi intervalli di tempo in Fig. 32 per l'agroforestazione e in Fig. 33 per gli orti.

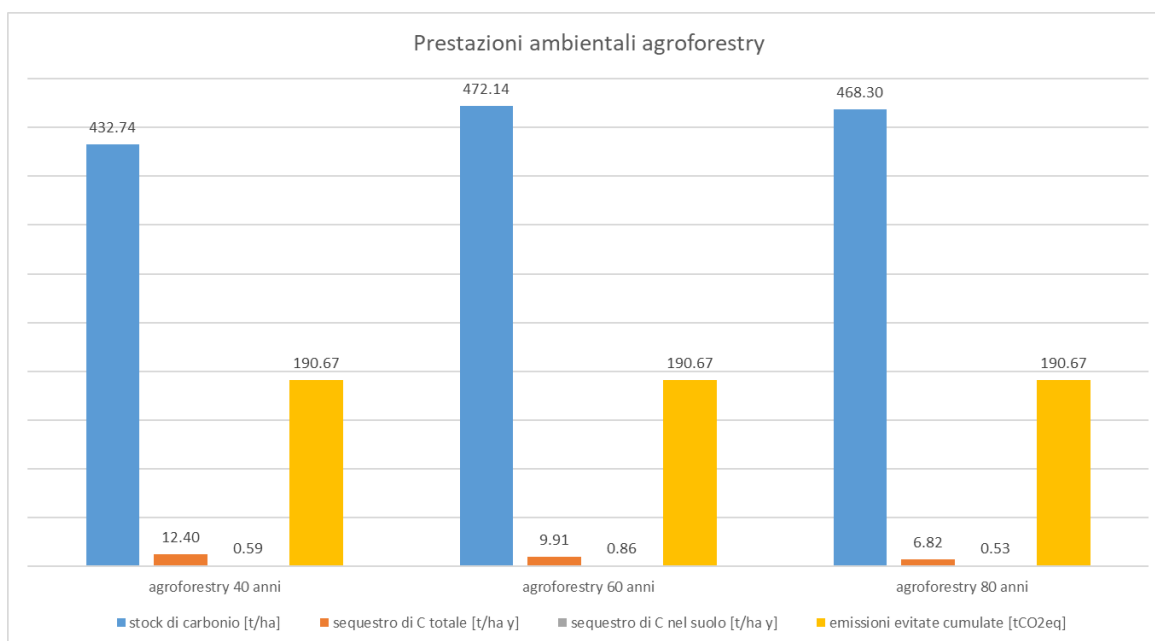


Fig. 32: Valori degli indicatori ambientali per lo scenario di agroforestazione a 40, 60 e 80 anni

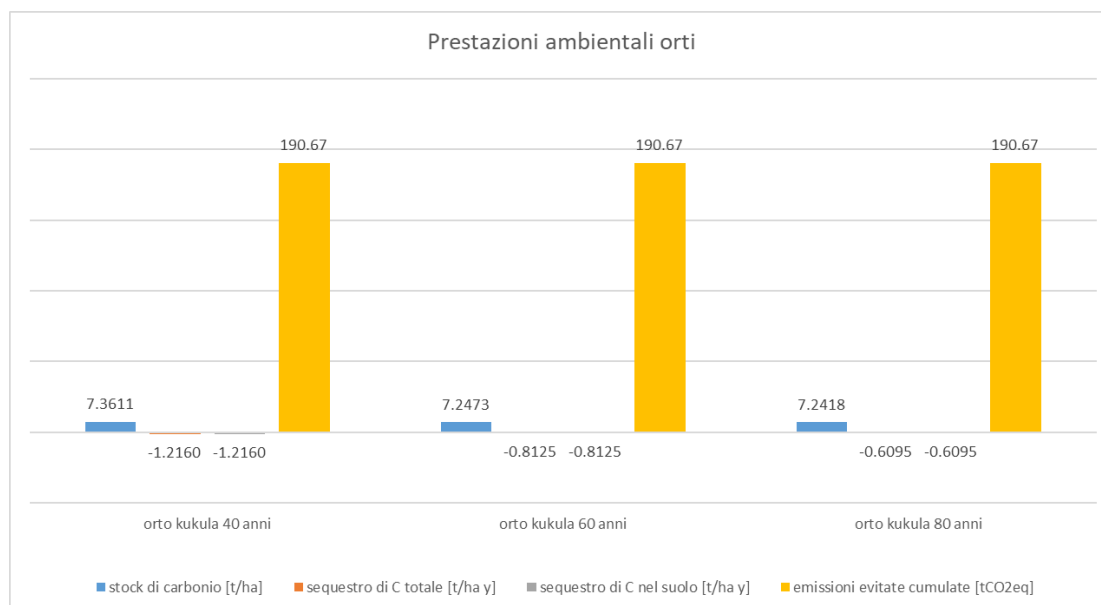


Fig. 33: Valori degli indicatori ambientali per lo scenario degli orti a 40, 60 e 80 anni

Lo stock di carbonio del sistema di agroforestazione è variabile negli anni ed è dipendente dai cicli produttivi delle diverse specie come mostrato in Fig. 28. In tabella 10 sono mostrati i valori medi di stock di carbonio nella biomassa del sistema di agroforestazione in un ciclo di 240 anni. Il ciclo di 240 anni è il minimo comune multiplo dei cicli produttivi delle specie utilizzate nel sistema.

Tabella 10: Stock di carbonio medio nella biomassa nel sistema di agroforestazione calcolato su un ciclo di 240 anni

STOCK DI C MEDIO NELLA BIOMASSA EPIGEA [T]	STOCK DI C MEDIO NELLA BIOMASSA IPOGEA [T]	STOCK DI C MEDIO NELLA BIOMASSA [T]
317	79	396

Data la variabilità dello stock, si è deciso, per l'agroforestazione, di calcolare l'indicatore di stock di carbonio come valore medio lungo il periodo di interesse. È stato calcolato quindi lo stock medio di carbonio in 40, 60 e 80 anni. Il valore più alto, pari a 472.1 t/ha, è quello relativo al valore medio dei 60 anni e questo è un ulteriore segnale di come le variazioni dovute alla fine dei cicli produttivi influenzino fortemente il calcolo dello stock di carbonio nel sistema di agroforestazione.

Guardando i valori in Fig. 32 relativi al sequestro di carbonio annuo totale si può notare come il valore più alto sia quello relativo ai 40 anni, e decresce per i 60 e 80 anni. Questo è dovuto al fatto che nei primi anni di un sistema di agroforestazione la biomassa segue un andamento di crescita più rapido per poi rallentare e stabilizzarsi con il proseguire degli anni.

Per quanto riguarda il sequestro di carbonio nel suolo invece, il valore maggiore è quello relativo ai 60 anni. Questo significa che nel tempo cambia la distribuzione del carbonio all'interno del

sistema, con la quantità di carbonio che viene sequestrata nel suolo che aumenta rispetto a quella sequestrata nella biomassa.

Il carbonio stoccato nella biomassa delle piante è uno stock temporaneo mentre il carbonio che viene sequestrato nel suolo ha un tempo di permanenza molto maggiore. Il sistema di agroforestazione ottiene quindi l'obiettivo prefissato di fungere da stock permanente di carbonio mantenendo una produzione locale di cibo adeguata.

Considerando gli orti invece, come si può vedere dalla Fig. 33, i valori di carbonio stoccato e sequestrato sono molto minori. Infatti, l'obiettivo con cui sono pianificati gli orti è puramente nutrizionale e di produzione di ortaggi e frutta in grado di garantire una dieta più bilanciata alla popolazione locale. Il valore di stock di carbonio è quasi uguale per i tre periodi di tempo considerati e pari a 7.3 t/ha, poiché una gran parte del carbonio nel suolo viene perso per decomposizione e gli input generati dalla biomassa delle piante degli orti non sono sufficienti a compensare questa perdita. Per questo motivo i valori di sequestro annuo di carbonio sono negativi sia guardando il sequestro totale sia guardando il sequestro nel suolo.

Il valore di emissioni da deforestazione evitate è uguale per tutti gli scenari tranne per lo scenario di slash and burn.

Il valore è uguale anche considerando i tre diversi intervalli temporali. Infatti, il tasso di deforestazione annuo di Nosy Mitsio, ricavato dall'analisi delle coperture di suolo della regione Diana mostrate in Fig. 27 e 28, è pari a 0.18 ha/y. Con un tale tasso di deforestazione, la perdita di foresta nei tre diversi intervalli temporali è maggiore dell'ettaro preso come unità di riferimento. Per tutti e tre gli scenari e intervalli temporali, il valore è quindi l'equivalente in emissioni di CO₂ delle 52 t/ha presenti in un singolo ettaro di foresta che, se rimasto intatto, non viene deforestato per dare spazio a coltivazioni di riso.

7.5 Risultati indicatori di dieta e alimentazione per il confronto degli scenari

Per le prestazioni di produzione alimentare e diversificazione della dieta, solo gli scenari relativi agli orti e all'agroforestazione sono considerabili.

Gli orti del progetto 'Tany Vao' sono progettati per garantire un bilanciamento dell'alimentazione e una dieta più sana per la popolazione locale. Dalle indicazioni del team di nutrizionisti coinvolti nel progetto, il consumo di ortaggi deve coprire il 20% circa del fabbisogno giornaliero per una dieta bilanciata.

È stato quindi calcolato il fabbisogno medio annuale di carboidrati e proteine, mostrato in tabella 11, relativo alla parte di ortaggi della dieta per un singolo abitante del villaggio per poter quantificare il numero di abitanti il cui fabbisogno potrebbe essere coperto da un ettaro di orti.

Tabella 11: Fabbisogno calorico medio giornaliero e fabbisogno medio annuale di proteine e carboidrati per una dieta in cui gli ortaggi coprono il 20% del fabbisogno

FABBISOGNO		
MEDIO	CARBO	PROT
ABITANTE	KG/ANNO	KG/ANNO
(CAL/GIORNO)		
2357	24	6.5

Per quanto riguarda lo scenario di agroforestazione sono state considerate due diverse possibilità per la dieta della popolazione locale. Oltre ad una dieta bilanciata con gli ortaggi che forniscono il 20% del fabbisogno è stata valutata anche una possibile dieta sbilanciata verso il consumo di ortaggi dove questi ultimi garantiscono il 50% del fabbisogno medio. I dati di fabbisogno medio annuale di carboidrati e proteine relativi a questa seconda dieta sono mostrati in tabella 12.

Tabella 12: Fabbisogno calorico medio giornaliero e fabbisogno medio annuale di proteine e carboidrati per una dieta in cui gli ortaggi coprono il 50% del fabbisogno

FABBISOGNO		
MEDIO	CARBO	PROT
ABITANTE	KG/ANNO	KG/ANNO
(CAL/GIORNO)		
2357	59	16

La proposta della seconda dieta nasce dalla considerazione delle difficoltà legate sia alla scarsità delle risorse alimentari in loco sia all'importazione di beni che avviene attraverso un viaggio di oltre 6 ore in barca a vela verso la città di Ambilobe e che comporta un aumento dei costi del 30% circa. Nasce quindi una necessità molto forte di produzione locale di cibo.

Utilizzando i dati di produzione delle diverse specie presentati nei capitoli 5 e 6 è stata calcolata la produzione totale dei due sistemi e dai dati di fabbisogno medio sono stati ricavati gli abitanti il cui fabbisogno medio sarebbe coperto da un ettaro di orti o dal sistema di agroforestazione. I risultati ricavati sono mostrati in Fig. 34. Viene segnato nel grafico come riferimento il numero di abitanti del villaggio di Ampanitsoa pari a 250.

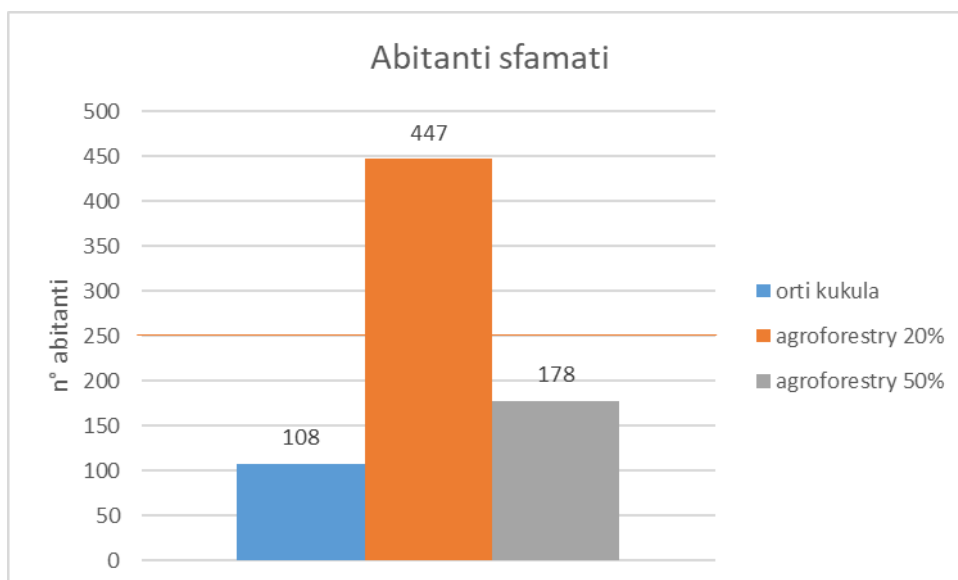


Fig. 34: Numero di abitanti il cui fabbisogno medio sarebbe coperto da un ettaro di terreno coltivato nei diversi scenari analizzati per il villaggio di Ampanitsoa

Lo scenario che garantisce una produzione per il numero maggiore di abitanti è il sistema di agroforestazione nel caso di dieta con ortaggi al 20%, che porterebbe ad avere un surplus di produzione in quanto il numero di abitanti coperti sarebbe pari a 447 contro i 250 abitanti del villaggio con un solo ettaro di terreno utilizzato. Questo surplus di produzione aprirebbe un ulteriore scenario possibile, cioè quello di commercializzare questi prodotti in eccesso nei viaggi verso la città di Ambilobe nell'entroterra per rientrare dei costi del viaggio ed eventualmente aumentare i beni alimentari da importare. Questa possibilità è sostenuta anche dal fatto che le tecniche di conservazione del cibo nell'isola sono praticamente nulle.

Nel caso dell'agroforestazione con dieta con ortaggi al 50% invece, il numero di abitanti è pari a 178 cioè circa il 71% della popolazione del villaggio di Ampanitsoa sempre considerando gli eventuali limiti nutrizionali legati a questo tipo di dieta che sono da approfondire.

Un ettaro di orti garantirebbe una produzione di cibo che coprirebbe il fabbisogno di 108 abitanti, circa il 43% del villaggio.

Questi numeri dimostrano come il terreno necessario per la produzione di cibo dell'intero villaggio possa potenzialmente essere limitato e la conservazione della foresta sia un obiettivo raggiungibile se si abbandona la tecnica dell'agricoltura tramite slash and burn che ha un utilizzo del suolo non ottimale e necessita continuamente di nuovi terreni sfruttabili a scapito della foresta originaria.

8 CONCLUSIONI E FUTURI MIGLIORAMENTI

Il continuo aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera e l'acuirsi degli effetti dei cambiamenti climatici quali l'aumento della siccità e la desertificazione di terreni rendono ancora più vulnerabili aree del mondo già in difficoltà come il continente africano e in particolare l'Africa subsahariana.

In aree geografiche dove la malnutrizione e la denutrizione sono tuttora un problema, l'uso di pratiche agricole inadeguate e non sostenibili può portare ad un peggioramento ulteriore delle condizioni di vita. Per questi motivi e per l'importanza che il settore agricolo ricopre nelle emissioni globali occorre cercare delle nuove soluzioni che apportino dei cambiamenti all'attuale sistema agricolo e di produzione del cibo.

In questo elaborato, seguendo questa direzione, è stato messo in atto un confronto tra diverse pratiche agricole applicabili nell'isola di Nosy Mitsio in Madagascar. Le tre pratiche agricole studiate sono il cosiddetto *slash and burn*, la pratica agricola prevalentemente utilizzata nell'isola, un progetto di orti tri-familiari e un sistema di agroforestazione. Il confronto è stato effettuato rispetto a due dimensioni principali: servizi ecosistemici legati al ciclo del carbonio e aspetto nutrizionale e di bilanciamento della dieta. Gli scenari considerati sono stati quindi confrontati e valutati mediante l'uso di indicatori che ne quantificassero le prestazioni nelle due dimensioni.

Per quanto riguarda la capacità di fornire servizi ecosistemici, lo scenario più virtuoso risulta essere l'agroforestazione, con valori di stock di carbonio medio che ai 60 anni raggiunge il valore di 472 t/ha circa. Mentre per i valori di sequestro annuo di carbonio si ottengono, ai 60 anni, un valore pari a 9.9 t/ha y per il sequestro totale e di 0.86 t/ha y per il sequestro nel suolo. Il valore medio dello stock di carbonio nel suolo (quindi senza considerare la biomassa epigea ed ipogea) lungo tutto il ciclo colturale di 240 anni è di circa 85 t/ha.

Quest'ultimo è il valore più importante poiché il carbonio sequestrato nel suolo ha un tempo di permanenza molto alto e si può considerare permanentemente sequestrato dall'atmosfera. La tendenza di contenuto di carbonio nel suolo è quindi crescente e ciò è dovuto principalmente all'azione di rizodeposizione delle radici.

I livelli di carbonio stoccato e sequestrato nello scenario degli orti sono molto minori in quanto le specie orticole non sono adatte a questo scopo, poiché la biomassa è concentrata principalmente nella parte della pianta che viene poi raccolta.

Sia lo scenario di agroforestazione sia lo scenario degli orti garantiscono una riduzione di emissioni da deforestazione in quanto aumentano la produzione locale di cibo riducendo la necessità di sfruttare la pratica dello *slash and burn*.

Per il sistema di agroforestazione, i valori di stock di carbonio e di carbonio sequestrato sono sovrastimati, poiché influenzati dai valori di biomassa ricavati dalle equazioni allometriche. Queste ultime, infatti, dati i valori di biomassa risultanti per le diverse specie, tendono a sovrastimare la biomassa delle piante poiché si ottiene un valore molto maggiore per

l'agroforestazione rispetto al valore trovato in letteratura per la foresta. Nonostante questo errore di sovrastima, che non permette un confronto reale tra agroforestazione e foresta, l'obiettivo di questa analisi di confronto tra le diverse pratiche agricole viene comunque raggiunto. Anche considerando l'errore di sovrastima, l'agroforestazione rimane la pratica migliore in base alle prestazioni nei servizi ecosistemici legati al ciclo del carbonio, seguita dal sistema di orti multifamiliari e infine dallo *slash and burn*.

Per quanto riguarda l'aspetto nutrizionale e di bilanciamento della dieta, le prestazioni dei diversi scenari sono state valutate considerando il numero di abitanti il cui fabbisogno medio potesse essere soddisfatto dalla produzione di un ettaro di orti o di agroforestazione. Il bilanciamento ottimale della dieta prevede che gli ortaggi coprano il 20% circa del fabbisogno medio, per l'agroforestazione è stato però considerato uno scenario aggiuntivo in cui gli ortaggi coprono il 50% del fabbisogno.

A livello di abitanti sfamati in media gli orti raggiungono il valore di 108 abitanti contro i 447 del sistema di agroforestazione a parità di percentuale di ortaggi nella dieta. Bisogna però sottolineare come gli orti, per come è stato articolato lo schema del sistema di agroforestazione proposto, garantiscano un bilanciamento della dieta maggiore poiché il numero di specie orticole utilizzate è maggiore. Se invece si considera solo la produzione totale di carboidrati e proteine per il fabbisogno alimentare allora è l'agroforestazione a farsi preferire con la copertura del fabbisogno di 447 abitanti con un solo ettaro di terreno utilizzato. Considerando che il numero di abitanti del villaggio di Ampanitsoa è di 250, il sistema di agroforestazione garantirebbe un surplus di produzione che aprirebbe interessanti scenari ancora da esplorare, quali la possibilità di commerciare questo eccesso di produzione nei viaggi verso l'entroterra che gli abitanti del villaggio devono già saltuariamente sostenere. Un altro aspetto da valutare è il fatto che la proposta della seconda dieta, con il 50% del fabbisogno soddisfatto dal consumo di ortaggi e frutta, viene considerata nell'analisi come approfondimento ma per completezza e correttezza di procedimento andrebbe sottoposta ad un gruppo di esperti nutrizionisti per valutare se e quanto lo sbilanciamento della dieta verso il consumo di ortaggi possa essere salutare.

Entrambe le tecniche agricole sembrano essere delle valide alternative alla pratica attuale dello *slash and burn* per la produzione locale di cibo nell'isola di Nosy Mitsio, con l'agroforestazione che garantisce prestazioni ambientali migliori e il sistema di orti tri-familiari che garantisce invece una maggiore stabilità nella produzione di cibo e nel bilanciamento della dieta.

Le due tecniche non sono una l'alternativa dell'altra, ma possono essere implementate in parallelo massimizzando quindi i risultati in entrambi i campi.

Un possibile sviluppo futuro di questo elaborato potrebbe quindi essere la valutazione e la quantificazione dei risultati ottenibili implementando un sistema di orti più complesso, come quello degli orti tri-familiari del progetto 'Tany Vao', all'interno dello schema dell'agroforestazione proposto e mostrato in Fig.25.

Ulteriori miglioramenti a questo lavoro possono essere apportati raccogliendo ulteriori dati relativi a specie utilizzabili in progetti di agroforestazione nei tropici, in modo da poter espandere e rendere più preciso possibile il database che si è iniziato a creare con questo elaborato. Dati relativi a caratteristiche della pianta, capacità e velocità di produzione sono necessari per poter considerare una determinata specie tra le candidate ad essere inserita in un sistema di agroforestazione. Anche un approfondimento su equazioni allometriche specifiche per le diverse specie e con una maggiore precisione nella stima porterebbero un miglioramento importante al processo di creazione di un sistema di agroforestazione.

Altri miglioramenti futuri possibili, infine, riguardano i flussi di carbonio considerati e la precisione con cui si riescono a stimarne i valori. Una maggiore comprensione delle dinamiche di degradazione del carbonio nel suolo, del ruolo che ricopre l'uso della biomassa per la pacciamatura e una quantificazione del carbonio perso dal terreno nella sostituzione delle piante nel passaggio tra due cicli produttivi renderebbero l'analisi ancora più precisa, garantendo quindi la possibilità di studiare e progettare dei sistemi di agroforestazione sempre più complessi e dai risultati meno incerti e rendendoli così dei validi strumenti per l'adattamento ai cambiamenti climatici, un aspetto che sarà di vitale importanza negli anni a venire per tutti i settori, e per quello agricolo in particolare.

Bibliografia

Adhikari, B. «Structure and Function of High-Altitude Forests of Central Himalaya I. Dry Matter Dynamics». *Annals of Botany* 75, n. 3 (marzo 1995): 237–48. <https://doi.org/10.1006/anbo.1995.1017>.

Analogforestry database: <http://www.analogforestry.org/resources/database/>.

Andriamananjara, A., N. Ranaivoson, T. Razafimbelo, J. Hewson, N. Ramifehiarivo, A. Rasolohery, R. H. Andrisoa, et al. «Towards a Better Understanding of Soil Organic Carbon Variation in Madagascar: Soil Organic Carbon Variation in Madagascar». *European Journal of Soil Science* 68, n. 6 (novembre 2017): 930–40. <https://doi.org/10.1111/ejss.12473>.

Andriamananjara, Andry, Jennifer Hewson, Herintsitohaina Razakamanarivo, Riana Hary Andrisoa, Ntsoa Ranaivoson, Nantenaina Ramboatiana, Mieja Razafindrakoto, et al. «Land Cover Impacts on Aboveground and Soil Carbon Stocks in Malagasy Rainforest». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 233 (ottobre 2016): 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.030>.

Arias-Ortiz, Ariane, Pere Masqué, Leah Glass, Lisa Benson, Hilary Kennedy, Carlos M. Duarte, Jordi Garcia-Orellana, et al. «Losses of Soil Organic Carbon with Deforestation in Mangroves of Madagascar». *Ecosystems* 24, n. 1 (gennaio 2021): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00500-z>.

Bennett, Elena M., Garry D. Peterson, e Line J. Gordon. «Understanding Relationships among Multiple Ecosystem Services: Relationships among Multiple Ecosystem Services». *Ecology Letters* 12, n. 12 (dicembre 2009): 1394–1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>.

Bernal, Blanca, Lara T. Murray, e Timothy R. H. Pearson. «Global Carbon Dioxide Removal Rates from Forest Landscape Restoration Activities». *Carbon Balance and Management* 13, n. 1 (dicembre 2018): 22. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>.

Bhagwat, Shonil A., Katherine J. Willis, H. John B. Birks, e Robert J. Whittaker. «Agroforestry: A Refuge for Tropical Biodiversity?» *Trends in Ecology & Evolution* 23, n. 5 (maggio 2008): 261–67. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.01.005>.

Bonner, Mark T.L., Susanne Schmidt, e Luke P. Shoo. «A Meta-Analytical Global Comparison of Aboveground Biomass Accumulation between Tropical Secondary Forests and Monoculture Plantations». *Forest Ecology and Management* 291 (marzo 2013): 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.024>.

Brady, Nyle C. «Alternatives to Slash-and-Burn: A Global Imperative». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 58, n. 1 (giugno 1996): 3–11. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(96\)00650-0](https://doi.org/10.1016/0167-8809(96)00650-0).

Brown, Sandra. «Measuring, Monitoring, and Verification of Carbon Benefits for Forest-Based Projects». A cura di Ian R. Swingland, Eric C. Bettelheim, John Grace, Ghilleen T. Prance, e Lindsay S. Saunders. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 360, n. 1797 (15 agosto 2002): 1669–83. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1026>.

Budiharta, Sugeng, Erik Meijaard, Peter D Erskine, Carlo Rondinini, Michela Pacifici, e Kerrie A Wilson. «Restoring Degraded Tropical Forests for Carbon and Biodiversity». *Environmental Research Letters* 9, n. 11 (1 novembre 2014): 114020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/114020>.

Burgess, Paul J., e Adolfo Rosati. «Advances in European Agroforestry: Results from the AGFORWARD Project». *Agroforestry Systems* 92, n. 4 (agosto 2018): 801–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0261-3>.

Cardinael, Rémi, Zhun Mao, Claire Chenu, e Philippe Hinsinger. «Belowground Functioning of Agroforestry Systems: Recent Advances and Perspectives». *Plant and Soil* 453, n. 1–2 (agosto 2020): 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04633-x>.

Casierra-Posada, Fánor, Christian Ulrichs, e Cristian Pérez. «Growth of Spinach Plants (*Spinacia Oleracea* L.) Exposed to Excess Zinc and Manganese», 2012, 7.

Celentano, Danielle, Guillaume Xavier Rousseau, Larissa Santos Paixão, Francisneide Lourenço, Ernesto Gómez Cardozo, Thiago Oliveira Rodrigues, Hulda Rocha e Silva, et al. «Carbon Sequestration and Nutrient Cycling in Agroforestry Systems on Degraded Soils of Eastern Amazon, Brazil». *Agroforestry Systems* 94, n. 5 (ottobre 2020): 1781–92. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4>.

Chatterjee, Nilovna, P.K.Ramachandran. Nair, Saptarshi Chakraborty, e Vimala D. Nair. «Changes in Soil Carbon Stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture Continuum in Various Agroecological Regions: A Meta-Analysis». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 266 (novembre 2018): 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.014>.

Chave, Jérôme, Maxime Réjou-Méchain, Alberto Búrquez, Emmanuel Chidumayo, Matthew S. Colgan, Wellington B.C. Delitti, Alvaro Duque, et al. «Improved Allometric Models to Estimate the Aboveground Biomass of Tropical Trees». *Global Change Biology* 20, n. 10 (ottobre 2014): 3177–90. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>.

Chazdon, R. L. «Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands». *Science* 320, n. 5882 (13 giugno 2008): 1458–60. <https://doi.org/10.1126/science.1155365>.

Costanza, Robert, Rudolf de Groot, Paul Sutton, Sander van der Ploeg, Sharolyn J. Anderson, Ida Kubiszewski, Stephen Farber, e R. Kerry Turner. «Changes in the Global Value of Ecosystem Services». *Global Environmental Change* 26 (maggio 2014): 152–58. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>.

Davidson, Eric A., Tatiana Deane De ABREU SÁ, Claudio J. Reis Carvalho, Ricardo De OLIVEIRA FIGUEIREDO, MARIA do SOCORRO A. Kato, Osvaldo R. Kato, e Françoise Yoko Ishida. «An Integrated Greenhouse Gas Assessment of an Alternative to Slash-and-Burn Agriculture in Eastern Amazonia: SLASH-AND-BURN GREENHOUSE GASES». *Global Change Biology* 14, n. 5 (maggio 2008): 998–1007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01542.x>.

De Leijster, V., M.J. Santos, M.W. Wassen, J.C. Camargo García, I. Llorca Fernandez, L. Verkuil, A. Scheper, M. Steenhuis, e P.A. Verweij. «Ecosystem Services Trajectories in Coffee Agroforestry in Colombia over 40 Years». *Ecosystem Services* 48 (aprile 2021): 101246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101246>.

De Stefano, Andrea, e Michael G. Jacobson. «Soil Carbon Sequestration in Agroforestry Systems: A Meta-Analysis». *Agroforestry Systems*, 28 ottobre 2017. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>.

Dhandapani, Selvakumar, e Stephanie Evers. «Oil Palm ‘Slash-and-Burn’ Practice Increases Post-Fire Greenhouse Gas Emissions and Nutrient Concentrations in Burnt Regions of an Agricultural Tropical Peatland». *Science of The Total Environment* 742 (novembre 2020): 140648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140648>.

Fagerholm, Nora, Mario Torralba, Paul J. Burgess, e Tobias Plieninger. «A Systematic Map of Ecosystem Services Assessments around European Agroforestry». *Ecological Indicators* 62 (marzo 2016): 47–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.016>.

Farrar, John, Martha Hawes, Davey Jones, e Steven Lindow. «HOW ROOTS CONTROL THE FLUX OF CARBON TO THE RHIZOSPHERE». *Ecology* 84, n. 4 (aprile 2003): 827–37. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[0827:HRCTFO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[0827:HRCTFO]2.0.CO;2).

Fisher, Brendan, R. Kerry Turner, e Paul Morling. «Defining and Classifying Ecosystem Services for Decision Making». *Ecological Economics* 68, n. 3 (gennaio 2009): 643–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>.

Friggens, Nina L., Alison J. Hester, Ruth J. Mitchell, Thomas C. Parker, Jens-Arne Subke, e Philip A. Wookey. «Tree Planting in Organic Soils Does Not Result in Net Carbon Sequestration on Decadal Timescales». *Global Change Biology* 26, n. 9 (settembre 2020): 5178–88. <https://doi.org/10.1111/gcb.15229>.

Food Plants:: https://fms.cmsvr.com/fmi/webd/Food_Plants_World

Gaeta, Giuseppe. *Modelli matematici in biologia*. Milano: Springer, 2007.

Gay-des-Combes, J.M., B.J.M. Robroek, D. Hervé, T. Guillaume, C. Pistocchi, R.T.E. Mills, e A. Buttler. «Slash-and-Burn Agriculture and Tropical Cyclone Activity in Madagascar: Implication for Soil Fertility Dynamics and Corn Performance». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 239 (febbraio 2017): 207–18. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.01.010>.

Giweta, Mekonnen. «Role of Litter Production and Its Decomposition, and Factors Affecting the Processes in a Tropical Forest Ecosystem: A Review». *Journal of Ecology and Environment* 44, n. 1 (dicembre 2020): 11. <https://doi.org/10.1186/s41610-020-0151-2>.

Global Forest Resources Assessment 2020. FAO, 2020. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.

Groot, Rudolf S de, Matthew A Wilson, e Roelof M.J Boumans. «A Typology for the Classification, Description and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services». *Ecological Economics* 41, n. 3 (giugno 2002): 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7).

Huete, A.R. «REMOTE SENSING FOR ENVIRONMENTAL MONITORING». In *Environmental Monitoring and Characterization*, 183–206. Elsevier, 2004. <https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50013-8>.

Iannucci, Anna, Loredana Canfora, Franca Nigro, Pasquale De Vita, e Romina Beleggia. «Relationships between Root Morphology, Root Exudate Compounds and Rhizosphere Microbial Community in Durum Wheat». *Applied Soil Ecology* 158 (febbraio 2021): 103781. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103781>.

«Improving slash-and-burn agriculture in Central Menabe, Madagascar», s.d., 208.

IPCC Good Practice Guidance for LULUCF, Chapter 3: LUCF Sector Good Practice Guidance, Forest Land

IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 2: Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories

IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Chapter 4: Forest Land

IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner,

K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jones, D. L., C. Nguyen, e R. D. Finlay. «Carbon Flow in the Rhizosphere: Carbon Trading at the Soil–Root Interface». *Plant and Soil* 321, n. 1–2 (agosto 2009): 5–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9925-0>.

Jose, Shibu. «Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview». *Agroforestry Systems* 76, n. 1 (maggio 2009): 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>.

Kareiva, Peter M., a c. di. *Natural Capital: Theory & Practice of Mapping Ecosystem Services*. New York: Oxford University Press, 2011.

Kassa, Henok, Stefaan Dondeyne, Jean Poesen, Amaury Frankl, e Jan Nyssen. «Impact of Deforestation on Soil Fertility, Soil Carbon and Nitrogen Stocks: The Case of the Gacheb Catchment in the White Nile Basin, Ethiopia.» *Agriculture, Ecosystems & Environment* 247 (settembre 2017): 273–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.034>.

Kauffman, J. Boone, D. L. Cummings, D. E. Ward, e R. Babbitt. «Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, Nutrient Pools, and Losses in Slashed Primary Forests». *Oecologia* 104, n. 4 (dicembre 1995): 397–408. <https://doi.org/10.1007/BF00341336>.

Kleinman, P. «The Ecological Sustainability of Slash-and-Burn Agriculture». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 52, n. 2–3 (febbraio 1995): 235–49. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)00531-I](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)00531-I).

Kotto-Same, Jean. «Carbon Dynamics in Slash-and-Bum Agriculture and Land Use Alternatives of the Humid Forest Zone in Cameroon», s.d., 12.

Krinner, G., Nicolas Viovy, Nathalie de Noblet-Ducoudré, Jérôme Ogée, Jan Polcher, Pierre Friedlingstein, Philippe Ciais, Stephen Sitch, e I. Colin Prentice. «A Dynamic Global Vegetation Model for Studies of the Coupled Atmosphere-Biosphere System: DVGM FOR COUPLED CLIMATE STUDIES». *Global Biogeochemical Cycles* 19, n. 1 (marzo 2005). <https://doi.org/10.1029/2003GB002199>.

Kumar, Rajeew, Sharad Pandey, e Apurv Pandey. «Plant Roots and Carbon Sequestration», 2021, 7.

Kuyah, Shem, Cory W. Whitney, Mattias Jonsson, Gudeta W. Sileshi, Ingrid Öborn, Catherine W. Muthuri, e Eike Luedeling. «Agroforestry Delivers a Win-Win Solution for Ecosystem Services in Sub-Saharan Africa. A Meta-Analysis». *Agronomy for Sustainable Development* 39, n. 5 (ottobre 2019): 47. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>.

Laskar, Sabina Yasmin, Gudeta Weldesemayat Sileshi, Karabi Pathak, Nirmal Debnath, Arun Jyoti Nath, Kaynath Yasmin Laskar, Pator Singnar, e Ashesh Kumar Das. «Variations in Soil Organic Carbon Content with Chronosequence, Soil Depth and Aggregate Size under Shifting Cultivation». *Science of The Total Environment* 762 (marzo 2021): 143114. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143114>.

Lewis, Simon L., Bonaventure Sonké, Terry Sunderland, Serge K. Begne, Gabriela Lopez-Gonzalez, Geertje M. F. van der Heijden, Oliver L. Phillips, et al. «Above-Ground Biomass and Structure of 260 African Tropical Forests». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, n. 1625 (5 settembre 2013): 20120295. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0295>.

Ma, Zilong, Han Y. H. Chen, Edward W. Bork, Cameron N. Carlyle, e Scott X. Chang. «Carbon Accumulation in Agroforestry Systems Is Affected by Tree Species Diversity, Age and Regional Climate: A Global Meta-analysis». A cura di Josee Fortin. *Global Ecology and Biogeography* 29, n. 10 (ottobre 2020): 1817–28. <https://doi.org/10.1111/geb.13145>.

Magat, Severino. «Department of Agriculture», s.d., 14.

Mapanda, F., J. Mupini, M. Wuta, J. Nyamangara, e R. M. Rees. «A Cross-Ecosystem Assessment of the Effects of Land Cover and Land Use on Soil Emission of Selected Greenhouse Gases and Related Soil Properties in Zimbabwe». *European Journal of Soil Science* 61, n. 5 (ottobre 2010): 721–33. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01266.x>.

McNeely, Jeffrey A., e Götz Schroth. «Agroforestry and Biodiversity Conservation – Traditional Practices, Present Dynamics, and Lessons for the Future». *Biodiversity and Conservation* 15, n. 2 (febbraio 2006): 549–54. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-2087-3>.

Meinshausen, Malte, Elisabeth Vogel, Alexander Nauels, Katja Lorbacher, Nicolai Meinshausen, David M. Etheridge, Paul J. Fraser, et al. «Historical Greenhouse Gas Concentrations for Climate Modelling (CMIP6)». *Geoscientific Model Development* 10, n. 5 (31 maggio 2017): 2057–2116. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2057-2017>.

Montagnini F, e P K R Nair. «Carbon Sequestration: An Underexploited Environmental Benefit of Agroforestry Systems», s.d., 15.

Muchane, Mary N., Gudeta W. Sileshi, Sofia Gripenberg, Mattias Jonsson, Lorena Pumariño, e Edmundo Barrios. «Agroforestry Boosts Soil Health in the Humid and Sub-Humid Tropics: A Meta-Analysis». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 295 (giugno 2020): 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>.

Mutuo, Patrick K., G. Cadisch, A. Albrecht, C. A. Palm, e L. Verchot. «Potential of Agroforestry for Carbon Sequestration and Mitigation of Greenhouse Gas Emissions from Soils in the Tropics».

Nutrient Cycling in Agroecosystems 71, n. 1 (gennaio 2005): 43–54.
<https://doi.org/10.1007/s10705-004-5285-6>.

Nair, P.K. Ramachandran, Vimala D. Nair, B. Mohan Kumar, e Solomon G. Haile. «Soil Carbon Sequestration in Tropical Agroforestry Systems: A Feasibility Appraisal». *Environmental Science & Policy* 12, n. 8 (dicembre 2009): 1099–1111. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.01.010>.

Neugarten, Rachel A., Kevin Moull, Natalia Acero Martinez, Luciano Andriamaro, Curtis Bernard, Curan Bonham, Carlos Andres Cano, et al. «Trends in Protected Area Representation of Biodiversity and Ecosystem Services in Five Tropical Countries». *Ecosystem Services* 42 (aprile 2020): 101078. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101078>.

Neyra-Cabatac, Neyrma M., Juan M. Pulhin, e Daylinda B. Cabanilla. «Indigenous Agroforestry in a Changing Context: The Case of the Erumanen Ne Menuvu in Southern Philippines». *Forest Policy and Economics* 22 (settembre 2012): 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.01.007>.

Niether, Wiebke, Johanna Jacobi, Wilma J Blaser, Christian Andres, e Laura Armengot. «Cocoa Agroforestry Systems versus Monocultures: A Multi-Dimensional Meta-Analysis». *Environmental Research Letters* 15, n. 10 (7 ottobre 2020): 104085. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab053>.

Oloyede, F M, G O Agbaje, e I O Obisesan. «Analysis of Pumpkin (*Cucurbita Pepo* Linn.) Biomass Yield and Its Components as Affected by Nitrogen, Phosphorus and Potassium (NPK) Fertilizer Rates». *African Journal of Agricultural Research* 8, n. 37 (26 settembre 2013): 4686–92. <https://doi.org/10.5897/AJAR12013.6794>.

Palm, C. A., e Alternatives to Slash-and-Burn (Programme), a c. di. *Slash-and-Burn Agriculture: The Search for Alternatives*. New York: Columbia University Press, 2005.

Pfund, Jean-Laurent, John Daniel Watts, Manuel Boissière, Amandine Boucard, Renee Marie Bullock, Andree Ekadinata, Sonya Dewi, et al. «Understanding and Integrating Local Perceptions of Trees and Forests into Incentives for Sustainable Landscape Management». *Environmental Management* 48, n. 2 (agosto 2011): 334–49. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9689-1>.

Plants for a future: <https://pfaf.org/user/DatabaseSearchResult.aspx>.

Poorter, Hendrik, Andrzej M. Jagodzinski, Ricardo Ruiz-Peinado, Shem Kuyah, Yunjian Luo, Jacek Oleksyn, Vladimir A. Usoltsev, Thomas N. Buckley, Peter B. Reich, e Lawren Sack. «How Does Biomass Distribution Change with Size and Differ among Species? An Analysis for 1200 Plant Species from Five Continents». *New Phytologist* 208, n. 3 (novembre 2015): 736–49. <https://doi.org/10.1111/nph.13571>.

Poorter, Hendrik, Ülo Niinemets, Achim Walter, Fabio Fiorani, e Uli Schurr. «A Method to Construct Dose–Response Curves for a Wide Range of Environmental Factors and Plant Traits by

Means of a Meta-Analysis of Phenotypic Data». *Journal of Experimental Botany* 61, n. 8 (maggio 2010): 2043–55. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp358>.

Power, Alison G. «Ecosystem Services and Agriculture: Trade-offs and Synergies». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365, n. 1554 (27 settembre 2010): 2959–71. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>.

Proctor, Cameron, e Yuhong He. «Modeling Root Exudate Accumulation Gradients to Estimate Net Exudation Rates by Peatland Soil Depth». *Plants* 10, n. 1 (6 gennaio 2021): 106. <https://doi.org/10.3390/plants10010106>.

Rakotovao, Narindra H., Tantely M. Razafimbelo, Stephan Rakotosamimanana, Zafyson Randrianasolo, Josoa R. Randriamalala, e Alain Albrecht. «Carbon Footprint of Smallholder Farms in Central Madagascar: The Integration of Agroecological Practices». *Journal of Cleaner Production* 140 (gennaio 2017): 1165–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.045>.

Ramachandran Nair, P. K., B. Mohan Kumar, e Vimala D. Nair. «Agroforestry as a Strategy for Carbon Sequestration». *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172, n. 1 (febbraio 2009): 10–23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>.

Ramifehiarivo, Nandrianina, Michel Brossard, Clovis Grinand, Andry Andriamananjara, Tantely Razafimbelo, Andriambolantsoa Rasolohery, Hery Razafimahatratra, et al. «Mapping Soil Organic Carbon on a National Scale: Towards an Improved and Updated Map of Madagascar». *Geoderma Regional* 9 (giugno 2017): 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.12.002>.

«Root Architectural Trait Diversity in Aubergine (*Solanum Melongena* L.) and Related Species and Correlations with Plant Biomass». *Crop Breeding, Genetics and Genomics*, 2019. <https://doi.org/10.20900/cbagg20190011>.

Rumpel, Cornelia, e Ingrid Kögel-Knabner. «Deep Soil Organic Matter—a Key but Poorly Understood Component of Terrestrial C Cycle». *Plant and Soil* 338, n. 1–2 (gennaio 2011): 143–58. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0391-5>.

Sarto, Marcos V. M., Wander L. B. Borges, Jaqueline R. W. Sarto, Charles W. Rice, e Ciro A. Rosolem. «Deep Soil Carbon Stock, Origin, and Root Interaction in a Tropical Integrated Crop–Livestock System». *Agroforestry Systems* 94, n. 5 (ottobre 2020): 1865–77. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00505-6>.

Shi, Lingling, Wenting Feng, Jianchu Xu, e Yakov Kuzyakov. «Agroforestry Systems: Meta-Analysis of Soil Carbon Stocks, Sequestration Processes, and Future Potentials». *Land Degradation & Development* 29, n. 11 (novembre 2018): 3886–97. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>.

Simelton, Elisabeth, Jeremy Carew-Reid, Miguel Coulier, Beau Damen, John Howell, Chloe Pottinger-Glass, Hung Viet Tran, e Marlies Van Der Meiren. «NBS Framework for Agricultural

Landscapes». *Frontiers in Environmental Science* 9 (5 agosto 2021): 678367. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.678367>.

Styger, Erika, Harivelo M. Rakotondramasy, Max J. Pfeffer, Erick C.M. Fernandes, e David M. Bates. «Influence of Slash-and-Burn Farming Practices on Fallow Succession and Land Degradation in the Rainforest Region of Madagascar». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119, n. 3–4 (marzo 2007): 257–69. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.012>.

Takimoto, Asako, P.K. Ramachandran Nair, e Vimala D. Nair. «Carbon Stock and Sequestration Potential of Traditional and Improved Agroforestry Systems in the West African Sahel». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 125, n. 1–4 (maggio 2008): 159–66. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.010>.

TEEB (2015) *TEEB for Agriculture & Food: an interim report*, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland

Thomas, Amy, e Catharina Schulp. «Greenhouse Gas Storage and Sequestration Function». In *Landscape Planning with Ecosystem Services*, a cura di Christina von Haaren, Andrew A. Lovett, e Christian Albert, 24:205–19. Landscape Series. Dordrecht: Springer Netherlands, 2019. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1681-7_14.

Thong, Pentile, Uttam Kumar Sahoo, Uttam Thangjam, e Rocky Pebam. «Pattern of Forest Recovery and Carbon Stock Following Shifting Cultivation in Manipur, North-East India». A cura di Gerhard Hartwig Buck-Sorlin. *PLOS ONE* 15, n. 10 (8 ottobre 2020): e0239906. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239906>.

Thornley, John H.M., e James France. «An Open-Ended Logistic-Based Growth Function». *Ecological Modelling* 184, n. 2–4 (giugno 2005): 257–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.10.007>.

Torralba, Mario, Nora Fagerholm, Paul J. Burgess, Gerardo Moreno, e Tobias Plieninger. «Do European Agroforestry Systems Enhance Biodiversity and Ecosystem Services? A Meta-Analysis». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230 (agosto 2016): 150–61. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>.

Useful Tropical Plants: <http://tropical.theferns.info>.

Vieilledent, Ghislain, Oliver Gardi, Clovis Grinand, Christian Burren, Mamitiana Andriamanjato, Christian Camara, Charlie J. Gardner, et al. «Bioclimatic Envelope Models Predict a Decrease in Tropical Forest Carbon Stocks with Climate Change in Madagascar». A cura di Emily Lines. *Journal of Ecology* 104, n. 3 (maggio 2016): 703–15. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12548>.

Vieilledent, Ghislain, Clovis Grinand, Fety A. Rakotomalala, Rija Ranaivosoa, Jean-Roger Rakotoarijaona, Thomas F. Allnut, e Frédéric Achard. «Combining Global Tree Cover Loss Data with Historical National Forest Cover Maps to Look at Six Decades of Deforestation and Forest

Fragmentation in Madagascar». *Biological Conservation* 222 (giugno 2018): 189–97. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.008>.

Vieilledent, Ghislain, Clovis Grinand, e Romuald Vaudry. «Forecasting Deforestation and Carbon Emissions in Tropical Developing Countries Facing Demographic Expansion: A Case Study in Madagascar». *Ecology and Evolution* 3, n. 6 (giugno 2013): 1702–16. <https://doi.org/10.1002/ece3.550>.

Wang, Shaojun, Qianqian Zuo, Qianbin Cao, Ping Wang, Bo Yang, Shuang Zhao, Run Cao, e Minkun Chen. «Acceleration of Soil N₂O Flux and Nitrogen Transformation during Tropical Secondary Forest Succession after Slash-and-Burn Agriculture». *Soil and Tillage Research* 208 (aprile 2021): 104868. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104868>.

Williams, M., C.M. Ryan, R.M. Rees, E. Sambane, J. Fernando, e J. Grace. «Carbon Sequestration and Biodiversity of Re-Growing Miombo Woodlands in Mozambique». *Forest Ecology and Management* 254, n. 2 (gennaio 2008): 145–55. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.07.033>.

Yesuf, Gabriel, Kerry A. Brown, e Nigel Walford. «Assessing Regional-scale Variability in Deforestation and Forest Degradation Rates in a Tropical Biodiversity Hotspot». A cura di Nathalie Pettorelli e Martin Wegmann. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 5, n. 4 (dicembre 2019): 346–59. <https://doi.org/10.1002/rse2.110>.

Yin, X. «A Flexible Sigmoid Function of Determinate Growth». *Annals of Botany* 91, n. 3 (1 febbraio 2003): 361–71. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg029>.