



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali

**Corso di Laurea Magistrale in Scienze Agrarie e del Territorio
Produzione e Protezione delle Colture**

*FRAZIONAMENTO DELLA SOSTANZA ORGANICA E CONTENUTO DI
CARBONIO ORGANICO IN OXISOLS SOTTOPOSTI ALLA PRATICA
DELLO SLASH AND BURN, MOZAMBICO.*

*ORGANIC MATTER FRACTIONATION AND ORGANIC CARBON
CONTENT IN OXISOLS SUBMITTED TO SLASH AND BURN
PRACTICE, MOZAMBIQUE.*

Relatore:

Prof.ssa Stefania Cocco

Studente:

Giovanni Pasquini

Matricola n. 1092277

Correlatore:

Dott.ssa Dominique Serrani

Anno Accademico 2020/2021

Alla mia famiglia,
che mi è sempre vicina
nei momenti lieti e difficili
della vita.

A coloro che amo,
che sono per me un dono di Dio
e danno senso alla mia vita.

INDICE

1	Introduzione	3
1.1	Slash and burn.....	3
1.2	Caso di studio: il Mozambico.....	5
1.3	Gli Oxisols.....	5
1.4	La sostanza organica nel suolo	6
2	Scopo della ricerca	7
3	Materiali e metodi	9
3.1	Caratteristiche del Mozambico	9
3.2	Aree di studio.....	11
3.2.1	Vanduzi	12
3.2.2	Sussundenga	13
3.2.3	Macate	13
3.3	Metodo di campionamento.....	14
3.4	Le analisi fisicochimiche.....	17
3.4.1	Il frazionamento densitometrico della sostanza organica....	18
3.4.2	Il carbonio organico totale (TOC)	19
4	Risultati e discussione	23
5	Conclusioni	28
6	Ringraziamenti	30
7	Bibliografia	31

INDICE DELLE FIGURE E DELLE TABELLE

Figure

Figura 1: Ubicazione della provincia di Manica in Mozambico.

Figura 2: Classificazione climatica di Köppen del Mozambico.

Figura 3: Localizzazione dei Distretti di Vanduzi, Sussundenga e Macate, con individuazione dei siti di campionamento.

Figura 4: Filtrazione della WEOM.

Figura 5: Pesatura della POM < 1 g/cm³.

Figura 6: Reazione di ossidazione della S.O.

Figura 7: Viraggio della soluzione titolata.

Figure 8: Total organic carbon (TOC) and subdivision into organic carbon fractions for the soils under charcoal kiln, crop field, and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique.

Tabelle

Table 1: General features and morphology of the soils under crop field and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique. For symbols see legend.

Table 2: Mean values of physicochemical properties for the A and Bo horizons of the soils under crop field and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique.

Table 3: Mean values of total organic carbon (TOC) and subdivision into organic carbon fractions for the A and Bo horizons of the soils under charcoal kiln, crop field, and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique.

1 Introduzione

1.1 Slash and burn

Lo *slash and burn* è un'antica pratica agroforestale itinerante, che prevede il taglio e la bruciatura della foresta per far spazio ad aree coltivabili. Questo sistema di rotazione è stato definito come uno dei più complessi e diversificati al Mondo (Brookfield e Padoch, 1994; Thrupp et al., 1997), attuato già nel 10.000 a.C. in condizioni socioeconomiche ed ecologiche ben distinte, dagli ecosistemi montani a quelli di pianura, dai tropici alle praterie (Spencer, 1966). I paleoecologi collocano l'origine dello *slash and burn* all'epoca delle popolazioni precolombiane del bacino amazzonico (Arroyo-Kalin, 2012), ma è stato rilevato anche nelle aree rurali tropicali dell'Asia e dell'Africa, dove tutt'ora occupa un ruolo importante nell'identità culturale delle comunità locali (Brady, 1996; Desbureaux et al., 2015; Jarosz, 1993; Mertz et al., 2009b; Mukul et al., 2016; van Vliet et al., 2012). Alcuni studi hanno stimato che circa 300-500 milioni di persone, diffuse in 64 paesi di 3 continenti (Li et al., 2014) utilizzano lo *slash and burn* come pratica di gestione del bosco e del suolo da destinare a coltura (Andriess e Schelhaas, 1987; Dalle et al., 2011; Lanly, 1985). Lo *slash and burn* consiste nel tagliare, bruciare e coltivare ciclicamente una porzione di foresta (Brady, 1996; Brown, 2006; Riahtam et al., 2018). Quando la resa del raccolto non soddisfa più i fabbisogni familiari, circa dopo tre/quattro anni, l'area viene abbandonata e lasciata rivegetare spontaneamente, mentre nuove aree forestali vengono convertite in aree coltivabili (Raharimalala et al., 2010; Styger et al., 2007). Il legname tagliato viene spesso utilizzato per realizzare le carbonaie ed ottenere così il carbone (Ickowitz, 2006), mentre le ceneri prodotte dalla combustione vengono utilizzate come ammendante, dato il loro effetto alcalinizzante particolarmente utile in presenza di suoli acidi, in grado di ridurre la tossicità di Al e Mn (Demeyer et al., 2001; Gay-des-Combes et al., 2017). Nonostante la pratica comune della rotazione, lo *slash and burn* è estremamente variegata e diversificata, in termini di successioni colturali, durata del periodo di rotazione, gestione del maggese e della foresta, utilizzo del fuoco, etc. (Ickowitz, 2006).

Per molti anni questo tipo di agricoltura è stato considerato uno dei pochi sistemi agricoli sostenibili, in grado di preservare i processi ecologici e garantire le produzioni senza ricorrere a fertilizzanti e pesticidi chimici (Kleinman et al. 1995). Secondo Rerkasem et al. (2009) infatti, coltivare un'area per un breve periodo e poi lasciarla incolta per decenni favorirebbe la conservazione del pool di semi in grado di garantire il ripristino di un ecosistema forestale complesso, nonché il recupero della fertilità del suolo. Al contrario, la riduzione del periodo di maggese e quindi la contrazione del periodo di rotazione può alterare gli equilibri del sistema e ridurre la sostenibilità (Coomes et al., 2000; Schmidt-Vogt et al., 2009). Negli ultimi decenni però questa pratica agronomica ha subito numerosi cambiamenti, trainati dalle trasformazioni socioeconomiche dei paesi in cui è diffusa, ad esempio la crescita demografica, l'aumento della domanda di colture da reddito e i cambiamenti nelle politiche economiche (Mertz et al. 2009; Padoch, 2010). Tutto ciò ha spinto gli agricoltori ad abbandonare tale pratica (Padoch et al., 2007) o ad utilizzare superfici coltivabili più ampie, a ridurre il periodo di rotazione e a convertire le colture tradizionali in colture da reddito (Van Vliet et al., 2012; Wood et al., 2016), causando una riduzione della sostenibilità dello *slash and burn* (The World Bank; World Statistics; Ickowitz, 2011). Nelle regioni tropicali è stato valutato che a seguito di tali cambiamenti lo *slash and burn* è diventato responsabile fino al 60% della deforestazione totale ed è considerato una causa indiretta delle emissioni di gas serra (Davidson et al., 2008; Geist e Lambin, 2002). Inoltre, a seguito della riduzione del periodo di rotazione e dell'intensificazione delle pratiche di taglio e bruciatura, la fertilità del suolo tende a decrescere più rapidamente nel tempo. La sostanza organica e i nutrienti si esauriscono velocemente e il loro accumulo è rallentato a seguito della riduzione del periodo di maggese (Nye e Groenlandia, 1964; Jordan et al., 1983; Holscher et al., 1997), ne consegue la diminuzione delle rese colturali (Arnason, 1982; Runyan et al., 2012) e l'aumento delle erbe infestanti in campo (de Rouw, 1995; Dingkuhn et al., 1999). Risulta quindi molto importante analizzare tutti gli aspetti, oltre al periodo di rotazione, che contribuiscono alla sostenibilità dello *slash and burn*, ad esempio le proprietà intrinseche del suolo, il tipo di vegetazione, le tecniche agronomiche e le colture, così come l'utilizzo di ammendanti e fertilizzanti (Kleinman et al., 1995; Brown, 2006; Mertz et al., 2008; Kilawe et al., 2018).

1.2 Caso di studio: il Mozambico

Come anticipato nel precedente paragrafo, le trasformazioni socioeconomiche avvenute negli ultimi decenni in alcuni Paesi in via di sviluppo, tra i quali il Mozambico, hanno portato ad un maggiore sfruttamento ed impoverimento dei suoli coltivati con la pratica dello *slash and burn*. In Mozambico, come in molte regioni dell'Africa sub-sahariana, la conversione di aree forestali a colture intensive, unite a pratiche agronomiche inappropriate e a tecnologie inadeguate, ha avuto un enorme impatto negativo sull'ambiente e sullo stile di vita dei produttori locali (Desanker et al., 1997; Guto et al. 2011). Nkala et al. (2011) hanno rilevato che oltre l'80% dei piccoli agricoltori mozambicani si affida ancora a semplici attrezzature e sistemi agronomici tradizionali e in questo contesto allo *slash and burn* è attribuito oltre il 65% della perdita di foreste in tutto il paese (The World Bank, 2018). Il Gestore dei Fondi di Investimento Alternativi (GEFIA) ha proposto degli obiettivi nell'ambito delle politiche forestali, ponendo l'attenzione sulla necessità di valutare e monitorare l'estensione, lo stato e i cambiamenti delle foreste del Mozambico in modo tempestivo ed accurato, al fine di spiegare la tipologia e i cambiamenti della copertura del suolo e degli ecosistemi forestali; valutare le ripercussioni sull'uomo e sulla fauna selvatica e studiare le misure volte a mitigare l'impatto negativo e migliorare le condizioni di vita della popolazione locale (Jansen et al., 2008).

1.3 Gli Oxisols

Il Mozambico rientra tra i Paesi in cui la pratica dello *slash and burn* sta diventando insostenibile poiché fortemente influenzata anche dalle difficili condizioni pedoclimatiche. Secondo la *Soil Taxonomy* gli ordini di suoli più presenti sono gli *Oxisols* e gli *Ultisols* (Soil Survey Staff, 2015). La prima definizione di *Oxisols* si basava in gran parte sul concetto di *Latosol*, per questo motivo l'ordine includeva molti degli attuali *Andisols*, alcuni *Inceptisols* e alcuni degli *Alfisols* e *Ultisols* (Soil Survey Staff, 1938). Nel 1960 lo United States Department of Agriculture (USDA) ha identificato più precisamente gli *Oxisols* e così la loro definizione e classificazione sono state gradualmente modificate e perfezionate fino all'ultimo aggiornamento nella *Soil Taxonomy* del 1975 (Soil Survey Staff, 1975). I suoli compresi in questo ordine

sono caratteristici delle regioni tropicali piuttosto umide e calde. Il pedoambiente molto aggressivo, dato dal susseguirsi di piogge intense e da periodi secchi, provoca un'intensa e rapida alterazione dei minerali primari e della sostanza organica, con un intenso dilavamento dei cationi derivanti dall'alterazione chimica dei minerali primari (Soil Survey Staff, 1975). Si rinvencono quindi principalmente quarzo, caolinite, ossi-drossidi di ferro e alluminio, responsabili del colore giallo-rosso tipico dell'orizzonte diagnostico *Oxic*. Il contenuto in sostanza organica è piuttosto basso, così come la capacità di scambio cationico (CSC) e la ritenzione idrica, la tessitura è prevalentemente sabbiosa e il pH oscilla tra moderatamente e fortemente acido; quindi il risultato è un suolo con fertilità fisica e chimica piuttosto basse. I processi pedogenetici, di cui la ferrallizzazione è il più importante, proseguono pressoché indisturbati da migliaia di anni, data la stabilità complessiva degli ambienti tropicali ed equatoriali; il risultato è che molti Oxisols raggiungono spessori relevantissimi, anche di parecchi metri. Gli Oxisols che al giorno d'oggi si rinvencono in climi troppo aridi sono da ritenersi dei suoli relitti, sviluppatisi in epoche di clima più umido e sottoposti oggi ad altri processi pedogenetici. Tali caratteristiche consentono di comprendere molto bene, ad esempio, le pesanti ripercussioni del taglio sistematico della foresta equatoriale (Soil Survey Staff, 1975). Questo è un ecosistema fragile, che si regge per intero su pochi centimetri di suolo fertile: la sua messa a nudo provoca in breve tempo un fortissimo depauperamento degli orizzonti più ricchi in nutrienti, magari seguito da indurimento del suolo che li rende poco indicati per l'agricoltura, a meno di continui ammendamenti.

1.4 La sostanza organica nel suolo

La sostanza organica del suolo (SOM - *Soil Organic Matter*) è l'insieme dei composti organici presenti nel suolo, sia di origine animale che vegetale. In particolare la SOM è costituita dalla biomassa vivente, dai residui in decomposizione (identificabili) e dall'humus (non identificabile) che include una frazione più labile e una più recalcitrante, ovvero la parte non umica e quella umica (Sequi, 1989). La SOM è la principale responsabile del miglioramento delle caratteristiche fisicochimiche e biologiche del suolo e quindi della sua fertilità. In particolare, ha effetti migliorativi

sulla struttura, creando complessi organo-minerali, protegge il suolo dall'erosione, migliora l'infiltrazione dell'acqua piovana in profondità, stocca il carbonio prelevandolo dall'atmosfera, contribuendo così alla riduzione dei gas serra, è fonte di elementi nutritivi utili alla crescita delle piante e ne riduce la lisciviazione e la perdita per ruscellamento superficiale, stimola la biodiversità microbica e della pedofauna (Tiessen et al., 1994). Per quanto riguarda l'influenza dello *slash and burn* sulla SOM, studi recenti hanno evidenziato che il taglio della foresta e la bruciatura dei residui vegetali portano alla degradazione della sostanza organica stabile e alla sua rapida mineralizzazione, impoverendo ulteriormente questi suoli già intrinsecamente poco fertili (Rumpel et al, 2005). La presenza della foresta migliora il contenuto della frazione stabile di SOM, dato dall'accumulo di biomassa vegetale ed animale nel tempo, ciò contribuisce al mantenimento della fertilità nel lungo periodo (Rumpel et al, 2005). Non essendo praticata alcun tipo di fertilizzazione chimica, l'unico apporto diretto di nutrienti è fornito dalle ceneri, distribuite a seguito dell'utilizzo della carbonaia, che arricchiscono il suolo di sali minerali disponibili nel breve periodo. Come conseguenza del rapido impoverimento dei suoli, anche le produzioni colturali decrescono nel giro di qualche anno, così gli agricoltori sono costretti a spostarsi in una nuova area boschiva scelta per la conversione (Laskar et al, 2020).

2 Scopo della ricerca

Uno degli indicatori suggeriti dalla FAO nel "Protocol for the assessment of Sustainable Soil Management" per monitorare l'efficacia delle pratiche di gestione del suolo per un'agricoltura sostenibile, è rappresentato dal suo contenuto in carbonio organico. Lo scopo del presente studio è il monitoraggio delle caratteristiche di suoli del Mozambico sottoposti a *slash e burn*, per valutare l'impatto di questa pratica sulla loro fertilità. Nello specifico non ci si è limitati a considerare solo il contenuto di carbonio organico, ma è stato condotto un frazionamento della sostanza organica, utilizzando il metodo densitometrico. Questo approccio di studio fornisce informazioni più dettagliate sul destino della sostanza organica, che viene monitorata nelle diverse frazioni, più o meno labili. In questo caso sono state confrontate le

variazioni di queste frazioni, nei suoli di diversi siti, con differenti periodi di maggese. Infatti, secondo gli studi condotti da Brady (1996), Mertz (2002), Nye e Greenland (1960), un periodo di rotazione/maggese più breve può ridurre la fertilità del suolo e favorire la presenza delle infestanti. In questi suoli fortemente minacciati da condizioni climatiche che li rendono naturalmente poco fertili e che sono ulteriormente impoveriti dalla pratica dello *slash and burn*, è necessario introdurre una pratica di gestione del suolo sostenibile, volta a preservare la SOM e a garantire un sufficiente livello di fertilità e di produzione. Per questo motivo risulta essenziale studiare le caratteristiche del suolo, in relazione ai diversi usi che ricorrono nella pratica dello *slash and burn*. In questo studio sono presentate tre località: Vanduzi, Sussundenga e Macate; nelle quali lo *slash and burn* è storicamente utilizzato come sistema agroforestale di sussistenza. Tali aree ricadono nei Distretti amministrativi di Vanduzi, Sussundenga e Macate, situati nella provincia di Manica, Mozambico centrale. Le località differiscono per la durata del periodo di rotazione dello *slash and burn*, ovvero del periodo di maggese, che corrisponde all'età della foresta: Vanduzi \approx 25 anni, Sussundenga \approx 35 anni e Macate \approx 50 anni. Per ogni località i siti di campionamento sono stati selezionati in base ai diversi usi del suolo: sotto carbonaia, nel campo coltivato e sotto foresta.

Il progetto è stato realizzato grazie alla collaborazione tra l'Università Politecnica delle Marche (Ancona, Italia), l'Universidade Eduardo Mondlane (Maputo, Mozambico) e l'Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM).

3 Materiali e metodi

3.1 Caratteristiche del Mozambico



Figura 1: Ubicazione della provincia di Manica in Mozambico

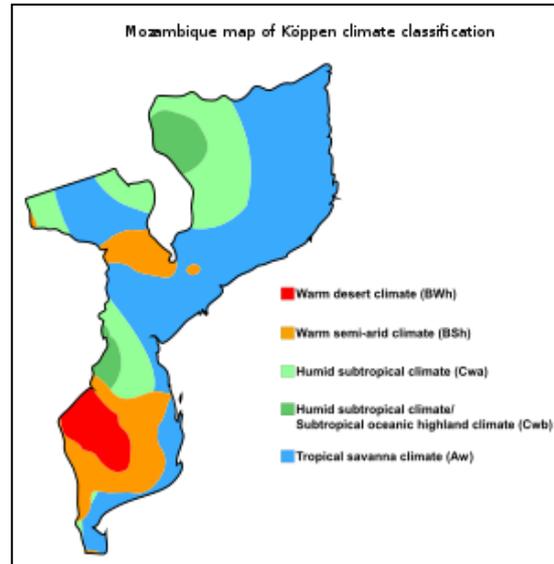


Figura 2: Classificazione climatica di Köppen del Mozambico.

Lo studio è stato condotto nella provincia di Manica, Mozambico centrale (Figura 1). Secondo la classificazione climatica mondiale di Köppen (Figura 2) le aree di studio sono incluse nel clima umido sub-tropicale (Cwa), che indica un clima temperato caldo, con stagione secca da aprile a settembre e stagione calda da ottobre a marzo. La zona settentrionale e meridionale di Manica ha delle temperature che oscillano tra i 25° e i 28 °C, mentre nella zona centrale tra i 22° e i 25 °C (The World Bank). Le piogge sono concentrate da novembre a marzo, accumulando tra gli 800 e i 1000 mm l'anno. La catena montuosa lungo il confine tra Mozambico e Zimbabwe, che ricade anche all'interno di Manica, riceve oltre 1400 mm di pioggia all'anno (IFC, 2003). In particolare, nel periodo 1991-2015 sono stati registrati i seguenti dati per la Provincia d'interesse: precipitazione media annua di 979 mm, temperatura media annua di 22,3 °C, temperatura media invernale di 18,7 °C, temperatura media primaverile di 23,5 °C, temperatura media estiva di 24,9 °C e temperatura media autunnale di 22,3 °C (The World Bank). La vegetazione varia a seconda del clima, essendo sempreverde nelle

zone ad alta piovosità e decidua nelle aree più aride. Le foreste aride e i boschi che coprono molta parte dell'entroterra mozambicano sono costituiti prevalentemente da piante appartenenti alla sottofamiglia delle leguminose *Caesalpinioideae*, in particolare da tre generi: *Brachystegia* spp., *Julbernardia* spp. e *Isoberlinia* spp., in consociazione con molte altre specie (White, 1983). La Provincia di Manica presenta questo tipo di cenosi, che in lingua locale viene identificata con il nome di *miombo*, ovvero “foresta aperta” (Jansen et al., 2008; Nhantumbo et al., 2001). Il *miombo* è composto da uno strato superiore di vegetazione arborea appartenente alla famiglia delle *Fabaceae*, come *Brachystegia spiciformis* Benth., *Brachystegia tamarindoides* Benth. e *Julbernardia globiflora* Benth., e da uno strato inferiore costituito da specie erbacee come *Themeda triandra* Forssk., *Panicum maximum* Jacq., *Hyparrhenia filipendula* (Hochst.) Stapf e *Andropogon gayanus* Kunth.

L'economia del Mozambico si basa principalmente sul settore primario ed in particolare l'agricoltura riveste un ruolo fondamentale (PEDSA, 2011). Il settore agricolo apporta il 24,2% del Prodotto Interno Lordo (PIL) e contribuisce per l'81% alla forza lavoro (Jansen et al., 2008). Come nella maggior parte dell'Africa subsahariana una parte significativa della popolazione vive nelle aree rurali. Studi demografici hanno attestato che nel 2017 circa il 66% della popolazione viveva nelle campagne e il trend demografico mostrava un incremento maggiore nelle aree rurali rispetto a quelle urbane (INE, 2017). È stato stimato che esistono 4,0 milioni di aziende agricole in tutto il paese di cui circa 3,9 milioni (99%) sono classificate come piccole aziende (circa il 29% guidate da donne), con un nucleo familiare medio di 5 membri (IAI, 2015). Le colture più diffuse nel Paese sono mais, riso, sorgo, arachide, fagiolo, manioca, cotone e canna da zucchero; nella provincia di Manica sono presenti anche miglio e sesamo (IAI, 2015). Nonostante sia uno dei settori economici principali, l'agricoltura è maggiormente di sussistenza, limitata da condizioni climatiche rigide, suoli difficili da coltivare, scarse conoscenze tecniche degli agricoltori, difficoltà di stoccaggio e trasporto dei prodotti e prezzi dei fertilizzanti troppo alti (FAO, 2015). In questo contesto, lo *slash and burn* è un sistema praticato da molto tempo quasi in tutto il Paese, con variazioni che riguardano la durata del periodo di maggese, il tipo di coltura, le tecniche agronomiche etc. Secondo Ickowitz (2006) questa pratica avrà

impatti ambientali diversi a seconda delle caratteristiche fisicochimiche dei suoli, del clima e delle pratiche di gestione attuate.

3.2 Aree di studio

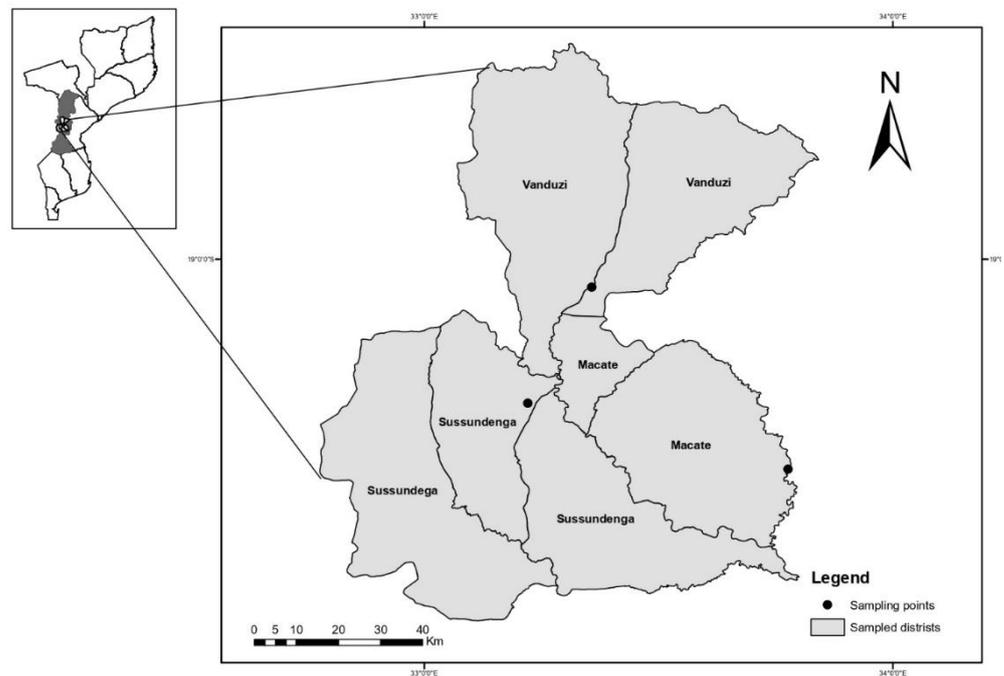


Figura 3: Localizzazione dei Distretti di Vanduzi, Sussundenga e Macate, con individuazione dei siti di campionamento.

Le aree di indagine si trovano all'interno della provincia di Manica, nei tre distretti di Vanduzi ($19^{\circ}04'002''\text{S} - 33^{\circ}21'45''\text{E}$), Sussundenga ($19^{\circ}18'45.328''\text{S} - 33^{\circ}13'21.050''\text{E}$) e Macate ($19^{\circ}41'405''\text{S} - 33^{\circ}51'513''\text{E}$) (Figura 3). Tali località sono state selezionate in quanto lo *slash and burn* viene praticato da tempo immemore, come testimoniato dagli agricoltori e proprietari delle aree. I suoli dei tre siti di interesse sono stati classificati come Oxisols (Soil Survey Staff, 2015) e si sono originati da rocce metamorfiche e/o rocce ignee intrusive dell'unità lito-tettonica della Cintura di Irumide Sud risalente al Mesoproterozoico (950-1060 Ma) (Chaúque et al., 2019). Nello specifico i suoli di Vanduzi e Sussundenga si sono originati da granitoidi (graniti gneissici) (Chaúque et al., 2019; Wijnhoud, 1997), mentre a Macate da migmatiti paragneissici (Chaúque et al., 2019). Le informazioni relative alla gestione attuale e pregressa, così come l'età della foresta sono state ricostruite a seguito di interviste orali

con gli utilizzatori delle aree e, nel caso di Sussundenga, anche grazie a documenti ufficiali forniti dall'*Instituto de Investigação Agrária de Moçambique* (IIAM – Chimoio). Gli agricoltori locali hanno affermato che gli alberi e la biodiversità erano più prosperi 60-70 anni fa e che le foreste derivano da vecchie aree coltivate rimboschite (come testimoniato dalla presenza dei resti di carbonaie). Nelle tre località la foresta presenta le specie tipiche del *miombo*, con alcune variazioni, ad esempio a Vanduzi sono presenti piante di *Mangifera indica* L. a seguito di un frutteto di mango abbandonato. Le foreste vengono utilizzate come fonte di legname da costruzione, legna da ardere, cibo, medicinali, aree di pascolo, per la lettiera e per cacciare animali selvatici (Brigham et al., 1996; Dewees et al., 2011). I campi adiacenti al bosco sono coltivati con colture annuali tipiche del sistema *slash and burn*, ovvero mais, ortaggi e fagioli.

3.2.1 Vanduzi

I siti di campionamento a Vanduzi sono stati selezionati in un'area pianeggiante, ad un'altitudine di 658 m. La carbonaia è stata realizzata nel 2014 e poi rimaneggiata, come dimostrato dalla presenza di ceneri. La vegetazione principale comprende cespugli di *Vangueria infausta* Burch. e piante di *Panicum spp.* L. Il campo coltivato è un orto-frutteto di banane realizzato nel 2015 senza irrigazione, concimazione e utilizzo di macchine. La vegetazione spontanea è caratterizzata da piante invasive di *Panicum spp.* L., *Euphorbia sp.* L. e *Convolvulus arvensis* L. La foresta ha più di 27 anni ed è moderatamente vigorosa con la presenza di lacune e rinnovamenti; viene bruciata con fuoco a bassa intensità ed utilizzata per ottenere legna da ardere, legname e carbone. Le principali specie arboree appartengono alla famiglia delle *Fabaceae* con piante residuali di mango. Lo strato arbustivo è formato principalmente da *Lantana Camara* L., *Psidium guajava* L. e *Vangueria infausta* Burch., mentre le essenze erbacee più comuni sono *Panicum sp.* L., *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight & Arn. e *Combretum sp.* Loefl.

3.2.2 Sussundenga

I siti di campionamento a Sussundenga sono stati selezionati in una zona pianeggiante a un'altitudine di 649 m. Le carbonaie sono state costruite nel 2017 utilizzando la legna da ardere della foresta tagliata. La vegetazione comprende piante sparse di *Apocinaceae spp.* Il campo è stato coltivato con il mais per due anni senza irrigazione e concimazione; in particolare prima della semina è stata fatta un'aratura superficiale con trazione bovina. Nel campo sono presenti alberi sparsi di *Apocinaceae spp.* ed essenze erbacee di *Panicum miliaceum* L. e *Mucuna pruriens* DC. Il bosco ha circa 35 anni, è moderatamente vigoroso e presenta delle chiarie e rinnovamento; viene utilizzato come fonte di legname. La principale vegetazione arborea è *Burkea Africana* Hook. Lo strato arbustivo è costituito da *Annona senegalensis* Pers., *Parinari curatellifolia* Planch. e *Brackenridgea zanguebarica* Oliv.; le specie erbacee presenti sono *Cynodon spp.*, *Hyparrhenia variables* Stapf. e *Trichilia capitata* Klotzsch.

3.2.3 Macate

A Macate i siti di campionamento sono stati selezionati in un'area pianeggiante a un'altitudine di 555 m. La carbonaia è stata costruita dopo l'ultimo taglio del bosco effettuato nel 2002 e mostra segni di lavorazione recente. Nel campo coltivato è stato seminato mais (*Zea mays* L.) dal 2002 senza irrigazione o concimazione chimica. Nel 2018 per la prima volta è stato utilizzato un fuoco di bassa intensità durante la stagione delle piogge per ridurre le infestanti di *Mucuna pruriens* DC, altrimenti è sempre stata effettuata la pacciamatura con i residui colturali. La foresta ha più di 50 anni ed è fortemente vigorosa, senza zone lacunose e senza zone di rimboschimento; viene usata come fonte di legname, legna da ardere e per cacciare piccoli animali. Le principali specie arboree sono *Albitia versicolor* Welw., *Acacia nilotica* (L.) Willd. e *Brachystegia microphylla* Harms. *Psidium guajava* L., *Zanthoxylum sp.*, *Senna petersiana* (Bolle) Lock e *Lantana camara* L. costituiscono lo strato arbustivo, mentre *Cassia sp.* L. e *Maytenus senegalensis* Lam. (Exell) formano la copertura erbacea.

3.3 Metodo di campionamento

Nel marzo del 2017 e nel novembre del 2017 sono state condotti due rilievi geomorfologici e pedologici in ciascuna delle tre aree di indagine, con l'obiettivo di selezionare un sito rappresentativo per la foresta, il campo coltivato e la carbonaia. Per ogni località sono stati aperti 6 profili pedologici (12 in totale), nei tre usi del suolo, all'interno di una superficie di 1 ha circa, con pendenza ed esposizione simili. Sono stati raccolti in totale 64 campioni, ovvero 32 campioni per ogni campionamento. Nella foresta i profili sono stati aperti a circa 1 m dall'albero più grande presente nel sito, mentre nei campi agricoli e nelle carbonaie i profili sono stati aperti approssimativamente a metà della loro estensione. La distanza massima tra i siti di campionamento è di circa 30 m a Macate e Sussundenga, mentre la foresta e il campo a Vanduzi distano tra loro circa 700 m. I profili sono stati aperti e descritti secondo Schoeneberger et al. (2012), campionati per orizzonti genetici (Table 1) e classificati come Oxisols, caratterizzati da orizzonti A brunastri e orizzonti Bo (oxic) rossastri. I campioni di suolo sono stati conservati all'interno di un frigorifero portatile e, una volta in laboratorio, essiccati all'aria, setacciati a 2 mm, per rimuovere lo scheletro, e conservati a temperatura ambiente in contenitori di plastica ben chiusi.

Table 1. General features and morphology of the soils under crop field and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique. For symbols see legend.

Average data for the period 1982-2012 – Mean annual precipitation: 1036 mm. Mean annual air temperature: 21.2°C; winter (J-J-A) mean air temperature: 16.9°C; spring (S-O-N) mean air temperature: 22.5°C; summer (D-J-F) mean air temperature: 24.1°C; autumn (M-A-M) mean air temperature: 22.5°C.

Horizon ^a	Depth cm	Thickness cm	Boundary ^b	Colour ^c	Texture ^d	Rock fragments %, by weight	Structure ^e	Consistence ^f	Roots ^g	Other observations ^h
----------------------	-------------	-----------------	-----------------------	---------------------	----------------------	--------------------------------------	------------------------	--------------------------	--------------------	---------------------------------

VANDUZI (37S 19°04'002" S, 033°21'45" E WGS84). Altitude: 658 m; parent rock: granitoid rock (possibly gneissic-granite).

In the charcoal kiln area. Slope: 3%; Exposure: W. Management: 4 years old charcoal kiln. Vegetation – Bushes: *Vangueria infausta* Burch.; herbaceous: *Panicum* L. spp..

Soil: Typic Eutrotrolox (Soil Survey Staff, 2014).

A	0-63	59-64	C, W	10YR2/1	ls	0	0sg to 2,3f,m,co abl-sbk	m(fr)	0	CH 30%, burned grass, popping and crunchy
Bo1	63-88	20-28	C, W	10YR4/2	ls	0	2m,co abk	m(fr)	0	Popping and crunchy
Bo2	88-104	13-18	C, W	10YR4/3	ls	0	2f,m abk	m(fi), m(fr)	0	Popping and crunchy, VH (excavation difficulty)

Crop field. Slope: 3%; Exposure: N-NW. Management: intercropping with different varieties of *Musa paradisiaca* L., *Moriga oleifera* Lam., *Sorghum vulgare* Pers.. Vegetation - herbaceous: *Panicum* sp, *Euphorbia* sp., *Convolvulus arvensis* L.. Drainage class: well-drained.

Soil: fine, mixed, thermic Typic Eutrotrolox (Soil Survey Staff, 2014).

Ap	0-40	36-43	C, W	7.5YR 3/4	sl	0	2f gr & f,m,co abk- sbk	m(fr)	3vf, 2f, 1m	CH (<1%), TU (termites)
Bo1	40-55	11-18	C, W	7.5YR 4/6	l	0	3m,co sbk	m(fr)	2f, 1m	FMN, TU (termites)
Bo2	55-100+	-	-	5YR 3/4	l	0	3m,co sbk	m(fr)	1f	FMN, TU (termites)

Forest. Slope: 3%; Exposure: NW. Management: 27 years old spontaneous forest with patches that have been burnt by low fire and occasionally pastured and used to obtain firewood, timber, and charcoal. Vegetation ("open miombo" forest with rests of previous cultivation) – Trees: *Brachystegia spiciformis* Benth., *Brachystegia tamarindoides* Benth., *Julbernardia globiflora* (Benth.) Troupin, *Mangifera indica* L.; bushes: *Psidium guajava* L., *Lantana camara* L., *Vangueria infausta* Burch; herbaceous: *Themeda triandra* Forssk., *Panicum maximum* Jacq., *Hyparrhenia filipendula* (Hochst.) Stapf, *Andropogon gayanus* Kunth, *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight & Arn., *Combretum* spp.. Drainage class: well-drained.

Soil: coarse-loamy, mixed, thermic Typic Eutrotrolox (Soil Survey Staff, 2014).

A	0-34	30-35	C, W	7.5YR 2.5/3	ls	0	2m,co abk	m(fr)	2vf, 1f	
Bo1	34-47	10-16	D, S	7.5YR 4/3	ls	0	2f,m abk	m(fr)	2vf, 1f,m	Rare CH
Bo2	47-100+	-	-	7.5YR 4/4	sl	0	2f,m abk	m(fr)	2vf 2f, 3m,co	FMN

SUSSUNDEGA (37S 19°18'45.328"S, 33°13'21.050"E WGS84). Altitude: 649 m; parent rock: granitoid rock (possibly gneissic-granite).

In the charcoal kiln area. Slope: 2-4%; Exposure: E. Management: 1 year old charcoal kiln. Vegetation - Trees: sparse plants of *Apocinaceae* spp..

Soil: Typic Eutrotrolox (Soil Survey Staff, 2014).

ZO	0-19	16-20	C, W	5YR2.5/2	ls	0	0sg	-	0	Medium gravelly CH 40%
Bo1	19-73	52-56	C, W	5YR5/6	scl	0	2f,m,co abk- sbk	m(fr)	1mi,vf,f,m,co	Crunchy, dead roots, fine gravelly FMN
Bo2	73-94+	-	-	5YR5/8	scl	0	2f,m abk-sbk	m(fr)	1mi,vf,f, 2m,co	Fine gravelly FMN

Crop field. Slope: 2 %; Exposure: NE; Management: 2 years old crop field (*Zea Mais* L.) Vegetation – Trees: sparse plants of *Apocinaceae* sp.; herbaceous: *Panicum miliaceum* L., *Panicum maximum* Jacq., *Mucuna pruriens* DC. Drainage class: well-drained. Soil: coarse-loamy, mixed, thermic Typic Eutrotorrox (Soil Survey Staff, 2014).

Ap	0-18	15-19	C, W	7.5YR 2.5/1	ls	0	1 to 2f,m,co sbk-abk	m(fr)	2-3vf,f, 2- 3m, 2co	CH (1-2%)
Bo1	18-69	48-52	C, W	7.5YR 4/2	ls	0	2m,co sbk- abk	m(vfr)	2vf, 2f,m	Fine FMN <5%, leopard skin features 15%
Bo2	69-93+	-	-	7.5YR 3/4	ls	0	0sg & 2m sbk	m(fr)	2vf, 2f,m	Rare CH, fine FMN ≈3%, leopard skin features 20-25%, popping

Forest. Slope: 3%; Exposure: NW. Management: 35 years old spontaneous forest with burnt patches, occasionally pastured and used to obtain firewood and timber. Vegetation: “open miombo” forest – Trees: *Brachystegia spiciformis* Benth., *Brachystegia tamarindoides* Benth., *Julbernardia globiflora* (Benth.) Troupin, *Burkea africana* Hook.; bushes: *Annona senegalensis* Pers., *Parinari curatellifolia* Planch. ex Benth., *Brackenridgea zanguibarica* Oliv.; herbaceous: *Cynodon* sp., *Themeda triandra* Forssk., *Panicum maximum* Jacq., *Hyparrhenia filipendula* (Hochst.) Stapf, *Trichilia capitata* Klotzsch., *Andropogon gayanus* Kunth. Drainage class: well-drained. Soil: coarse-loamy, mixed, thermic Typic Eutrotorrox (Soil Survey Staff, 2014).

Oi	3-0	2-6	C, W	-	-	0	-	-	0	Leaves and twigs, panicum stems
A	0-34	31-36	C, W	7.5YR 3/2	ls	0	2co gr & 2f,m abk-sbk	m(fr)	3vf, 2f, 3m,co	FMN, TU (termites)
Bo1	34-74	36-42	C, W	7.5YR 5/3	ls	0	2m,co abk- sbk	m(fr)	2vf, 1f, 2m, 1co	Rare CH, friable FMN, TU (termites)
Bo2	74-100+	-	-	7.5YR 5/4	ls	0	2f,m abk-sbk	m(fr)	2vf, 1f,m,co	Firm FMN, TU (termites)

MACATE (37S 19°41'405" S, 33°51'513" E WGS84). Altitude: 555 m; parent rock: migmatitic paragneiss.

In the charcoal kiln area. Slope: 3%; Exposure: W. Management: 16 years old charcoal kiln. Vegetation - herbaceous: absent. Soil: Typic Eutrotorrox (Soil Survey Staff, 2014).

ZO	0-47	47-49	C, W	-	sl	0	3f,m,co sbk	m(fr), m(vfr)	1 to 2mi,vf,f	CH and SED 30%; salt&pepper; dead WO
Bo1	47-59	10-15	C, W	5YR3/3	sl	5	2f,m sbk	m(fr)	1mi,vf,f; 2m,co	CH residues
Bo2	59-83	24-25	C, W	2.5YR3/6	scl	5	2m,f sbk-abk	m(fr), m(fi)	1mi,vf,f,m,co	Fine gravelly QUA; soot traces

Crop field. Slope: 3%; Exposure: W. Management: 16 years old crop field in preparation (*Zea mays* L.) Vegetation - herbaceous: *Mucuna pruriens* DC. Drainage class: well-drained. Soil: coarse-loamy, mixed, thermic Typic Eutrotorrox (Soil Survey Staff, 2014).

Ap	0-22	18-23	C, W	5YR 3/2	sl	0	3f,m,co vc sbk	m(fr), m(fi)	0	CH (<1%), dead roots; QUA
Bo1	22-37	15-19	C, W	2.5YR 3/6	l	0	2f,m sbk	m(fr)	0	Dead roots
Bo2	37-96+	-	-	2.5YR 3/4	sl	0	2f,m abk,	m(fr)	0	Dead roots

Forest. Slope: 3%; Exposure: W. Management: 50 years old spontaneous forest with burnt patches, occasionally pastured and used to obtain firewood and timber and for hunting small animals. Vegetation: “open miombo” forest – Trees: *Brachystegia spiciformis* Benth., *Julbernardia globiflora* (Benth.) Troupin, *Albitia versicolor* Welw. ex Oliv., *Brachystegia tamarindoides* Benth., *Acacia nilotica* (L.) Willd. ex Del., *Brachystegia microphylla* Harms; bushes: *Psidium guajava* L., *Zanthoxylum* sp., *Senna petersiana* (Bolle) Lock, *Lantana camara* L.; herbaceous: *Cassia* sp., *Themeda triandra* Forssk., *Panicum maximum* Jacq., *Hyparrhenia filipendula* (Hochst.) Stapf, *Andropogon gayanus* Kunth, *Maytenus senegalensis* Lam. (Exell). Drainage class: well-drained. Soil: coarse-loamy, mixed, thermic Typic Eutrotorrox (Soil Survey Staff, 2014).

Oi	4.5-1.5	1-3	C, W	-	-	-	-	-	0	Leaves and twigs; ants
Oe&Oa	1.5-0	1-2	C, W	-	-	-	-	-	0	Mycelia

A	0-18	15-18	C, W	5YR 3/2	scl	4	3f,m sbk	m(fr), m(fi)	2vf, 1f, 2m,co	QUA
Bo1	18-55	36-39	C, W	2.5YR 3/6	l	1	3f,m sbk	m(fi)	2vf, 1f, 2m,co	Rare CH, strong biological activity, QUA, F3M ≈1%
Bo2	55-91+	-	-	2.5YR 4/6	scl	0	2f,m sbk-abk	m(fr)	2vf, 1f, 2m,co	Mica flakes

^a horizons' designation according to Schoeneberger et al. (2012).

^b C=clear, D=diffuse; S=smooth, W=wavy

^c moist and crushed, according to the Munsell Soil Color Charts.

^d ls=loamy sand; sl=sandy loam, scl=sandy clay loam, l=loam.

^e 0=structureless, 1=weak, 2=moderate, 3=strong; f=fine, m=medium, co=coarse, vc=very coarse; abk=angular blocky, sbk=sub-angular blocky.

^f m(vfr)=very friable with moist soil, m(fr)=friable with moist soil, m(fi)=firm with moist soil.

^g 0=absent, 1=few, 2=common, 3=many; vf=very fine, f=fine, m=medium, co=coarse.

^h CH=charcoal fragments; QUA= quartz fragments; F3M= masses of oxidized iron Fe⁺³; FMN= iron-manganese nodules; TU=tunnels/tubular pores produced by ants/termites.

3.4 Le analisi fisicochimiche

Con il presente lavoro di tesi è stato effettuato il frazionamento densitometrico della sostanza organica del suolo - *Soil Organic Matter* (SOM), che prevede la separazione in frazioni della sostanza organica e la determinazione del loro contenuto in carbonio organico – *Organic Carbon* (OC). Le frazioni sono state separate, in successione, a partire dalla componente più attiva e labile fino a quella più stabile e intrappolata fisicamente all'interno degli aggregati organo-minerali. Le frazioni analizzate sono le seguenti: la *Water-Extractable Organic Matter* (WEOM) disciolta in soluzione acquosa, la *Particulate Organic Matter* (POM) con densità inferiore a 1 g/cm³ che galleggia in soluzione acquosa (POM-free), la POM con densità compresa tra 1,6 e 1 g/cm³ estratta con il politungstato (POM-free) e infine la POM intrappolata negli aggregati (POM-occluded), con densità inferiore a 1,6 g/cm³ sonicata ed estratta con il politungstato (Porcu, 2010). Le altre analisi fisicochimiche del suolo (tessitura, struttura, pH, Humic C, ecc.) erano già disponibili da precedenti studi.

3.4.1 Il frazionamento densitometrico della sostanza organica

Il metodo del frazionamento densitometrico (Cerli et al., 2012) si basa sulla differenza di densità tra la sostanza organica ($d = 1,4 \text{ g/cm}^3$) e la fase minerale ($2,65 \text{ g/cm}^3$) ed è affiancato da dispersione fisica e/o chimica. Utilizzando un liquido di appropriata densità è possibile separare la POM che rimane libera e quindi galleggia, dalle frazioni che interagiscono fisicamente e/o chimicamente con la fase minerale. Le frazioni della SOM analizzate nel presente lavoro di tesi, che sono state prima separate con il metodo appena citato e poi pesate con una bilancia di precisione, sono le seguenti: WEOM, $\text{POM} < 1 \text{ g/cm}^3$, $1 \text{ g/cm}^3 < \text{POM} < 1,6 \text{ g/cm}^3$ (con politungstato), $\text{POM-occluded} < 1,6 \text{ g/cm}^3$ (con politungstato e sonicata). Le diverse soluzioni acquose raccolte sono state conservate in congelatore per l'analisi successiva del carbonio organico totale.

Prima di determinare le varie frazioni della sostanza organica è necessario preparare i seguenti reagenti:

- Soluzione di sodio politungstato (NaPT) $1,6 \text{ kg/dm}^3 \rightarrow$ in un beaker da 2L pre-pesato aggiungere 741g di NaPT e 859 mL di H₂O deionizzata al fine di ottenere una soluzione del volume di 1 L. Agitare su agitatore magnetico fino a solubilizzare completamente il sale. Pesare il beaker con la soluzione e verificare che la soluzione sia $1,6 \text{ kg}$ ed eventualmente aggiungere acqua o NaPT per raggiungere la densità appropriata.
- Filtri Whatman 42 ($\varnothing 42.5 \text{ mm}$).

Per ogni orizzonte pedologico è stata prelevata una quantità di 4 g di suolo a cui sono stati aggiunti 20 mL di acqua distillata (rapporto 1:5). Ciascun campione è stato centrifugato a 2500 rpm per 5 minuti e la soluzione è stata filtrata utilizzando i filtri Whatman 42 per raccogliere il particolato organico surnatante bloccato nel filtro (Figura 4). La soluzione filtrata, la WEOM, è stata conservata in congelatore, mentre il particolato ($\text{POM} < 1 \text{ g/cm}^3$) è stato pesato con una bilancia di precisione (Figura 5). Il precipitato presente nel contenitore da centrifuga è stato lasciato asciugare, in seguito sono stati aggiunti 20 mL di NaPT ed agitato prima manualmente per 1 minuto e poi con lo shaker per un altro minuto. Dopo aver centrifugato il campione a 2500

rpm per 5 minuti il surnatante è stato filtrato e il particolato intrappolato nel filtro ($1 \text{ g/cm}^3 < \text{POM} < 1,6 \text{ g/cm}^3$) pesato con la bilancia di precisione. La soluzione filtrata di politungstato è stata nuovamente addizionata al precipitato per l'ultima fase del processo. Ciascun campione è stato sonicato per 3 minuti con intervalli di sonicazione 10 secondi, e successivamente centrifugato a 2500 rpm per 5 minuti. Il surnatante è stato filtrato e il particolato intrappolato nel filtro ($\text{POM-occluded} < 1,6 \text{ g/cm}^3$) è stato pesato con la bilancia di precisione.



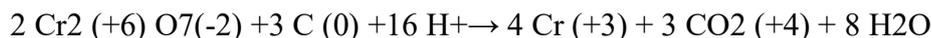
Figura 4: Filtrazione della WEOM



Figura 5: Pesatura della POM $< 1 \text{ g/cm}^3$

3.4.2 Il carbonio organico totale (TOC)

Il contenuto di carbonio organico nel suolo è in stretta relazione con quello della sostanza organica, anche se la composizione di quest'ultima presenta un'elevata variabilità. Il TOC (Total Organic Carbon) misura la quantità di carbonio organico totale presente nel suolo, il quale costituisce per il 58% la sostanza organica. Per la determinazione del TOC sono stati utilizzati i campioni ottenuti dalla precedente analisi di frazionamento della sostanza organica (WEOM, $\text{POM} < 1 \text{ g/cm}^3$, $1 \text{ g/cm}^3 < \text{POM} < 1,6 \text{ g/cm}^3$, $\text{POM-occluded} < 1,6 \text{ g/cm}^3$). Il metodo (Allison, 1960) prevede l'ossidazione del carbonio organico ad anidride carbonica a seguito della reazione che coinvolge il potassio bicromato e l'acido solforico. Per favorire la reazione ossidativa del carbonio organico si pone il campione in stufa a 160°C per 30 minuti. Il bicromato, riducendosi, ossida il carbonio della sostanza organica, il quale passa da un numero di ossidazione pari a 0 (valore medio) al +4 della CO (forma più ossidata), secondo la reazione:



La quantità di bicromato che non ha reagito con la sostanza organica viene successivamente quantificata mediante titolazione con una soluzione di ferro ammonio solfato (Sale di Mohr), in presenza di acido fosforico e dell'indicatore difenilammina (1 g di difenilammina in 100 mL di acido solforico concentrato). La reazione è la seguente:



Prima di determinare il contenuto di carbonio organico delle varie frazioni della sostanza organica precedentemente separate è necessario preparare i seguenti reagenti:

- Potassio bicromato soluzione 1/6 mol/L → in un matraccio tarato da 1000 ml contenente 600 mL di acqua distillata sciogliere 49,032 g di potassio bicromato essiccato in stufa a 130-140°C; portare a volume con acqua e omogenizzare.
- Ferro ammonio solfato esaidrato $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ soluzione 0,5 N → in un matraccio tarato da 1000 ml contenente 600 ml di acqua sciogliere 196,06 g di $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2 (\text{SO}_4)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. Aggiungere 15 mL di H_2SO_4 , portare a volume con acqua ed omogenizzare.

Per prima cosa è stata prelevata una quantità di 20 mL per ogni campione analizzato. Poi i campioni sono stati trasferiti nei becher in Pirex, all'interno dei quali sono stati aggiunti 10 ml di $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1 N e 20 ml di H_2SO_4 al 96% per far avvenire la reazione di ossidazione della sostanza organica (Figura 6). I becher sono stati messi in stufa a 160-170°C per 30 minuti, dopodiché la reazione è stata bloccata tramite l'aggiunta di 200 mL di acqua deionizzata. La quantità di potassio bicromato che non ha reagito è stata determinata per titolazione volumetrica, che prevede l'aggiunta di 5 mL di H_3PO_4 , 0.5 mL di difenilammina e della soluzione di ferro ammonio solfato esaidrato 0,5 N mantenendo il campione in agitazione. La titolazione termina con il viraggio della soluzione dalla colorazione blu a verde (Figura 7).



Figura 6: Reazione di ossidazione della S.O.

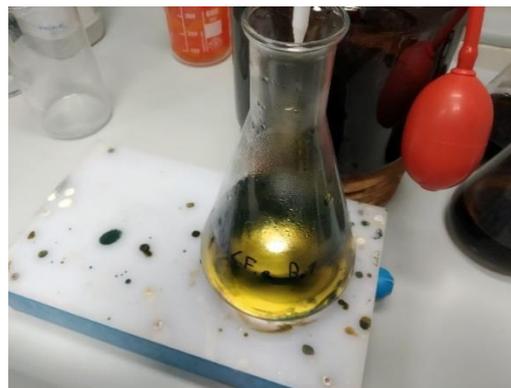


Figura 7: Viraggio della soluzione titolata

Parallelamente è stata eseguita la prova in bianco senza la presenza del campione per determinare il valore zero di riferimento del viraggio. Una volta ottenuto il volume di ferro ammonio solfato esaidrato impiegato nella titolazione, il contenuto di carbonio organico si ricava dall'equazione:

$$TOC = \frac{100 \cdot (B-B1) \cdot 10 \cdot 0.003}{B \cdot P \cdot 0.77}$$

TOC = contenuto di carbonio organico totale (g/kg)

B = ml di ferro ammonio solfato esaidrato consumati per titolare la prova in bianco

B1 = ml di ferro ammonio solfato esaidrato consumati per titolare il campione

10 = ml di bicromato di potassio consumati per la reazione

0,003 = peso del carbonio considerato a valenza zero (g)

0,77 = fattore di correzione

3.5 Strumenti statistici

È stata eseguita un'unica determinazione per ciascun orizzonte dei 18 profili per entrambe le analisi di laboratorio. I valori dei 18 profili sono stati quindi mediati per orizzonti replicati ($n = 2$), utilizzando la media aritmetica. In tutti i casi la deviazione standard è stata calcolata per $n = 2$. Le analisi statistiche sono state eseguite utilizzando il sistema R (R Core Team 2014). I dati sono stati testati per la normalità della distribuzione e l'omogeneità delle varianze rispettivamente con lo Shapiro-Wilk test e il Levene test, e trasformati in logaritmi se necessario. La trasformazione logaritmica è stata selezionata dalla procedura di massima vero-somiglianza ideata da Box e Cox (1964), ed implementata nella funzione Box-Cox del pacchetto MASS (Venables e Ripley 2002). Nel caso in cui le due assunzioni fondamentali siano risultate rispettate è stata applicata l'ANOVA a una via (OneWayANOVA) e l'ANOVA a due vie (TwoWayANOVA) seguite dal test post-hoc di Tukey HSD ($P < 0,05$). In caso di eteroschedasticità è stata applicata l'ANOVA unidirezionale di Welch con il test post-hoc Games-Howell ($P < 0,05$). In caso di non normalità ed eteroschedasticità è stato applicato il test non parametrico di Kruskal Wallis.

4 Risultati e discussione

Table 2. Mean values of physicochemical properties for the A and Bo horizons of the soils under charcoal kilns, crop field and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique. Numbers in parentheses are the standard deviations. For each column within land use and location, mean values with different letters significantly differ for $P < 0.05$ (n=2).

Horizons		Particle-size distribution			Main mineralogical composition*	pH	TOC	Humic C	Total N	Available P
		Sand	Silt	Clay						
Vanduzi										
Charcoal kiln	A	856(54)	78(20)	66(74)	Q(90), P(7), CM(2), K(1)	7.2(0.3)	7.5(0.3)	7.1(0.5)	0.5(0.1)	20(7)
	Bo1	859(66)	73(2)	68(68)	Q(88), P(9), CM(2), K(1)	7.0(0.0)	2.9(0.5)	2.2(1.3)	0.2(0.0)	11(12)
	Bo2	847(85)	50(17)	103(102)	Q(88), P(9), CM(2), K(1)	7.1(0.1)	2.0(0.5)	0.9(0.3)	0.2(0.0)	13(7)
Crop field	Ap	687(195)	100(5)	213(190)	Q(89), P(6), CM(4)	6.4(0.2)	6.6(0.5)	6.2(0.1)	0.5(0.1)	8(4)
	Bo1	617(253)	86(12)	297(241)	Q(83), P(8), CM(9)	6.4(0.4)	4.3(1.2)	3.6(0.6)	0.4(0.2)	3(1)
	Bo2	550(217)	89(7)	361(209)	Q(80), P(11), CM(7)	6.3(0.0)	3.1(1.1)	2.3(0.7)	0.3(0.1)	3(0)
Forest	A	848(48)	79(11)	73(59)	Q(88), P(5), O(1), CM(6)	6.5(0.3)	11.8(0.9)	9.5(2.8)	0.6(0.0)	15(3)
	Bo1	853(44)	94(16)	53(27)	Q(80), P(8), O(1), CM(10), K(1)	6.8(0.2)	3.6(0.1)	2.6(0.6)	0.2(0.0)	9(2)
	Bo2	626(120)	85(26)	290(146)	Q(76), P(8), O(1), CM(12), K(3)	6.3(0.1)	3.1(0.3)	1.2(0.2)	0.3(0.1)	7(3)
Sussundenga										
Charcoal kiln	ZO	881(110)	55(27)	64(84)	Q(95), P(1), K(4)	7.8(0.2)	18.0(6.0)	10.4(2.4)	0.8(0.2)	22(22)
	Bo1	672(249)	88(33)	239(283)	Q(92), K(8)	6.5(0.8)	6.1(1.1)	4.0(3.5)	0.5(0.0)	3(3)
	Bo2	647(233)	77(42)	276(275)	Q(92), K(8)	5.8(0.5)	3.3(0.1)	1.6(1.8)	0.3(0.0)	2(0)
Crop field	Ap	810(70)	74(26)	117(95)	Q(95), CM(1), K(4)	5.8(0.6)	7.1(0.1)	6.3(0.1)	0.6(0.0)	3(1)
	Bo1	828(43)	40(31)	132(73)	Q(94), CM(1), K(5)	5.3(0.7)	3.9(0.1)	3.0(0.2)	0.2(0.0)	2(0)
	Bo2	800(67)	42(37)	158(104)	Q(94), P(1), CM(1), K(4)	5.0(0.1)	3.1(0.8)	2.6(0.5)	0.3(0.1)	2(0)
Forest	A	856(29)	44(32)	101(62)	Q(91), P(4), CM(1), K(4)	5.5(0.1)	6.7(0.2)	5.5(0.8)	0.4(0.0)	6(1)
	Bo1	830(83)	43(12)	128(95)	Q(90), P(5), CM(1), K(4)	5.5(0.3)	3.8(0.6)	2.7(0.7)	0.3(0.0)	2(0)
	Bo2	834(69)	45(20)	122(89)	Q(93), P(3), CM(1), K(4)	5.2(0.0)	3.4(0.0)	2.6(0.8)	0.3(0.1)	3(1)

Horizons	Particle-size distribution			Main mineralogical composition*	pH	TOC	Humic C	Total N	Available P	
	Sand	Silt	Clay							
			g kg ⁻¹			g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹	
Macate										
Charcoal kiln	ZO	712(71)	188(27)	100(98)	Q(79), P(10), CM(1), M(1), K(10)	6.8(0.9)	20.8(2.4)	19.6(2.9)	1.4(0.1)	9(1)
	Bo1	609(114)	217(36)	174(150)	Q(77), P(12), CM(1), M(1), K(12)	5.7(0.2)	13.9(2.2)	13.6(2.6)	1.1(0.1)	3(3)
	Bo2	508(53)	260(120)	232(173)	Q(69), P(15), CM(1), M(1), K(15)	5.0(0.2)	10.3(0.5)	8.2(0.9)	0.7(0.1)	4(5)
Crop field	Ap	631(57)	210(33)	160(90)	Q(79), P(10), CM(1), M(1), K(9)	5.6(0.5)	17.8(1.4)	16.7(2.0)	1.3(0.1)	3(2)
	Bo1	497(29)	272(143)	231(114)	Q(74), P(10), CM(1), M(1), K(14)	5.4(0.2)	10.9(0.1)	10.6(0.4)	0.8(0.1)	1(1)
	Bo2	581(101)	126(126)	292(227)	Q(74), P(12), CM(1), M(1), K(12)	5.2(0.3)	8.8(1.6)	8.4(1.8)	0.7(0.1)	2(3)
Forest	A	597(36)	256(45)	147(82)	Q(78), P(2), CM(4), M(1), K(15)	5.8(0.3)	19.5(2.5)	14.9(1.8)	1.4(0.2)	1(0)
	Bo1	491(18)	223(130)	286(148)	Q(70), P(6), CM(4), M(1), K(20)	5.6(0.2)	9.3(3.4)	8.0(3.1)	0.7(0.2)	1(0)
	Bo2	460(52)	285(96)	256(147)	Q(67), P(7), CM(6), M(1), K(19)	5.3(0.4)	6.8(3.6)	5.9(3.9)	0.6(0.3)	1(0)

* In parentheses the percentage content of each mineral (semi-quantitative estimation). Q=quartz, P=plagioclases, O=orthoclase, M=micas, CM=2:1 clay minerals, K=kaolinite.

Lowercase normal letters = comparison between crop field soils of the three locations.

Lowercase bold letters = comparison between forest soils of the three locations.

Capital letters = comparison between soils under crop field and forest within each location.

Table 3. Mean values of total organic carbon (TOC) and subdivision into organic carbon fractions for the A and Bo horizons of the soils under charcoal kiln, crop field, and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique. Numbers in parentheses are the standard deviations (n=2). For each column within land use and location, mean values with different letters significantly differ for $P < 0.05$.

Horizons	TOC	WEOC		POC			Humic Substances						
				$\rho < 1$	$1 < \rho < 1.6$	$\rho < 1.6$ occluded							
g kg ⁻¹													
Vanduzi													
Char. kiln	A	7.49(0.26)		0.26(0)		0.17(0.15)		0.31(0.09)		0.04(0.01)		6.70(0.49)	
	Bo1	2.87(0.50)	bA	0(0)	aA	0.04(0.03)	aA	0.02(0)	aA	0(0)	aA	2.81(0.53)	bA
	Bo2	1.96(0.48)		0.17(0.14)		0.01(0)		0(0)		0(0)		1.78(0.62)	
Crop field	Ap	6.64(0.68)		0.05(0.06)		0.04(0.03)		0.08(0.02)		0.02(0)		6.45(0.62)	
	Bo1	4.25(1.65)	bA	0.10(0.06)	aA	0.03(0.04)	aA	0.01(0)	aA	0(0)	aA	4.12(1.66)	bA
	Bo2	3.11(1.51)		0.11(0.04)		0.02(0.03)		0(0)		0(0)		2.97(1.44)	
Forest	A	11.83(1.22)		0.27(0.17)		0.22(0.03)		0.78(0.69)		0.18(0.20)		10.38(0.13)	
	Bo1	3.63(0.15)	aA	0.17(0.24)	aA	0.01(0)	aA	0.05(0.06)	aA	0.01(0.01)	aA	3.39(0.46)	abA
	Bo2	3.08(0.41)		0.20(0.08)		0.03(0.04)		0.03(0.01)		0(0)		2.82(0.44)	
Sussundenga													
Char. kiln	ZO	17.97(6.05)		0.12(0.04)		1.10(0.95)		1.39(0.04)		0.07(0.06)		15.30(5.07)	
	Bo1	6.10(1.06)	abA	0.10(0.03)	aA	0.11(0.02)	aA	0.12(0.09)	aA	0.02(0.02)	aA	5.75(1.11)	abA
	Bo2	3.27(0.07)		0.11(0.15)		0.03(0.01)		0.08(0.08)		0(0)		3.05(0.15)	
Crop field	Ap	7.09(0.21)		0.13(0.08)		0.06(0.04)		0.16(0.06)		0.01(0.01)		6.73(0.03)	
	Bo1	3.91(0.18)	bA	0.10(0.01)	aA	0.02(0.02)	aA	0.01(0.01)	aA	0(0)	aA	3.77(0.15)	bA
	Bo2	3.09(1.13)		0.04(0.05)		0.02(0.02)		0(0)		0(0)		3.03(1.06)	
Forest	A	6.72(0.29)		0.24(0.02)		0.28(0.30)		0.26(0.13)		0.04(0)		5.92(0.70)	
	Bo1	3.79(0.86)	aA	0.09(0.13)	aA	0.08(0.10)	aA	0.03(0.04)	aA	0.01(0)	aA	3.58(1.05)	bA
	Bo2	3.40(0)		0.21(0.09)		0.03(0.02)		0.01(0)		0.01(0)		3.14(0.07)	
Macate													
Char. kiln	A	20.83(2.42)		0.16(0.23)		0.61(0.19)		1.05(0.44)		0.27(0.15)		18.74(1.79)	
	Bo1	13.92(2.21)	aA	0.13(0.19)	aA	0.22(0.19)	aA	0.50(0.21)	aA	0.05(0.06)	aA	13.02(1.94)	aA
	Bo2	10.31(0.45)		0.23(0.32)		0.17(0.17)		0.04(0.02)		0.01(0.01)		9.86(0.97)	
Crop field	Ap	17.79(1.99)		0.25(0.13)		0.14(0.06)		0.24(0.08)		0.06(0.05)		17.09(2.19)	
	Bo1	10.91(0.17)	aA	0.32(0.45)	aA	0.04(0.01)	aB	0.06(0.03)	aA	0.02(0.02)	aA	10.47(0.69)	aA
	Bo2	8.77(2.33)		0.29(0.04)		0.01(0.01)		0.02(0.02)		0.01(0.01)		8.44(2.24)	
Forest	A	19.46(3.60)		0.20(0.06)		0.23(0.13)		0.52(0.39)		0.05(0.03)		18.45(2.98)	
	Bo1	9.27(4.78)	aA	0.13(0.08)	aA	0.05(0.02)	aAB	0.07(0.09)	aA	0.02(0.02)	aA	9.01(4.58)	aA
	Bo2	6.78(5.04)		0.16(0.09)		0.02(0.01)		0.03(0.03)		0(0)		6.57(5.10)	

Lowercase letters = comparison among soils under the same land use.

Capital letters = comparison among charcoal kiln, crop field, and forest soils within each location

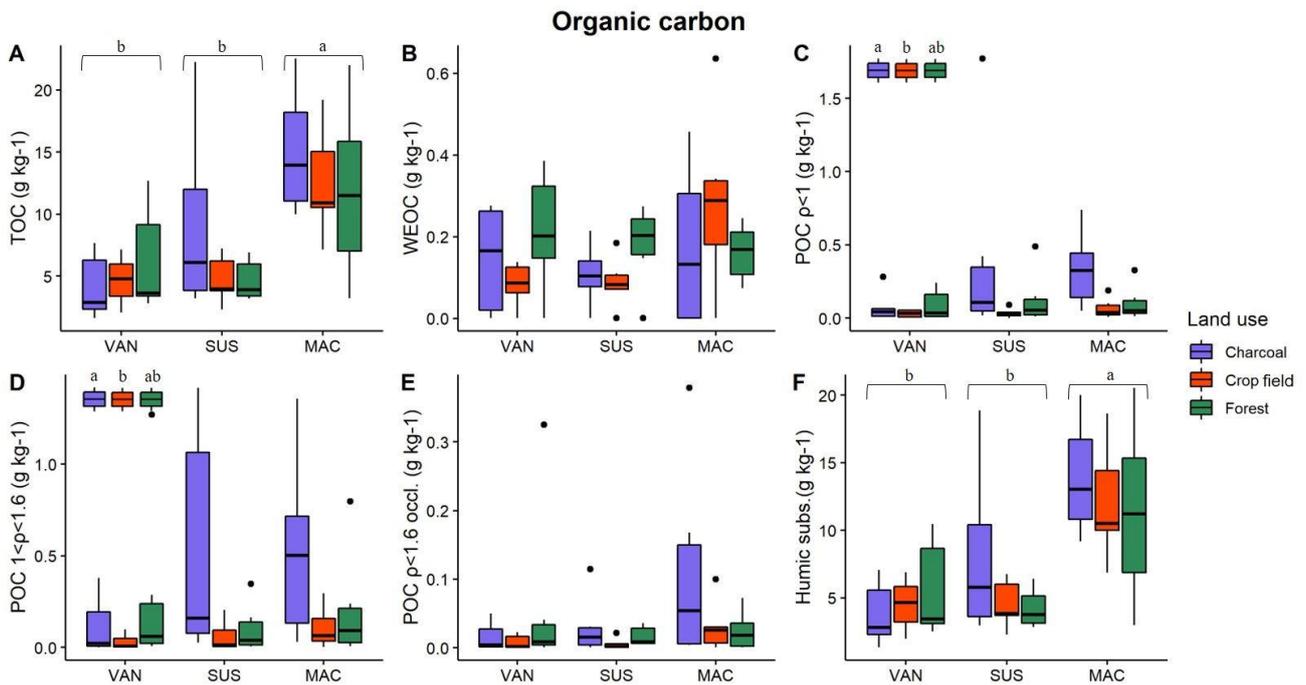


Figure 8: Total organic carbon (TOC) and subdivision into organic carbon fractions for the soils under charcoal kiln, crop field, and forest in the three locations of Vanduzi, Sussundenga, and Macate Districts, Manica province, central Mozambique. Boxplots from two-way ANOVA significantly differ for $P < 0.05$, specifically: i) whiskers with letters point out differences among locations; ii) mini box plot with letters point out differences among land uses.

I risultati ottenuti forniscono importanti informazioni riguardo il contenuto di carbonio organico totale e le sue frazioni (Table 3). Se si mettono a confronto le località di Vanduzi, Sussundenga e Macate è possibile osservare come le uniche differenze significative siano imputabili al TOC e, in particolare, alla sua componente delle Humic Substances, ovvero la frazione di sostanza organica più recalcitrante e di difficile formazione, costituita da acidi fulvici, acidi umici e umina (Belsito et al, 1988). Per le loro caratteristiche intrinseche le Humic Substances sono fondamentali per avere un suolo in buona salute e capace di garantire una fertilità stabile nel tempo. Infatti, la loro presenza incide positivamente sulla fertilità fisicochimica e biologica del suolo, migliorando la struttura, con la formazione di aggregati organo-minerali più stabili, fornendo un lento apporto di elementi nutritivi alle piante e stimolando la comunità microbica e la pedofauna (Sequi, 1989). Nel dettaglio si nota che entrambi i parametri, TOC e Humic Substances, sono più alti nella località di Macate, mentre sia a Vanduzi che a Sussundenga sono più bassi (Table 3). Come ulteriore osservazione, i suoli studiati hanno struttura da fortemente a mediamente sviluppata e stabile a Macate, mentre risulta essere meno sviluppata e prevalentemente friabile nei siti di Vanduzi e Sussundenga (Table 1). Queste differenze sono imputabili principalmente al tipo di gestione del suolo, che differisce, seppur lievemente, in tutti

e tre gli usi considerati (Rumpel et al., 2005). A Macate, infatti, i residui colturali vengono lasciati nel campo coltivato, favorendo l'accumulo di materiale organico e contemporaneamente le foreste e le carbonaie sono poco sfruttate e rimaneggiate, favorendo il ristabilirsi di un equilibrio naturale, nel caso della foresta, che viene mantenuto più a lungo. A Vanduzi e a Sussundenga i residui colturali vengono bruciati e le ceneri ottenute vengono sparse sul campo coltivato come ammendante, ricche in sali minerali a rapido rilascio. Le carbonaie sono utilizzate periodicamente e le foreste sono sottoposte a bruciatura frequente e sfruttate per ottenere legname, con conseguenti ripercussioni sul processo di formazione della sostanza organica (Jansen et al., 2008). In questo contesto va data particolare attenzione all'utilizzo del fuoco, soprattutto nei campi coltivati e nelle foreste. La combustione dei residui colturali e della cenosi forestale comporta un rapido e forte deperimento della sostanza organica formatasi nel lungo periodo. In questo modo, oltre ad eliminare la sostanza organica presente, vengono continuamente alterati gli equilibri tra flora, pedo-fauna e pool microbico, componenti fondamentali per la formazione della SO e responsabili della qualità del suolo (González-Pérez, 2004). Tutte le altre frazioni analizzate (WEOC, $POC < 1 \text{ g/cm}^3$, $1 \text{ g/cm}^3 < POC < 1,6 \text{ g/cm}^3$, $POC\text{-occluded} < 1,6 \text{ g/cm}^3$) non hanno evidenziato differenze statistiche significative.

Mettendo a confronto gli usi del suolo all'interno di ciascuna località (Table 3), non sono state rilevate differenze significative. Da ciò si potrebbe dedurre che a determinare il contenuto di sostanza organica non è tanto l'età delle foreste (Vanduzi ≈ 25 anni, Sussundenga ≈ 35 anni e Macate ≈ 50 anni), quanto il tipo di gestione del suolo (Laskar et al., 2020).

Per comprendere ancora meglio i dati ottenuti è necessario osservare la loro variazione considerando nel loro insieme le località e gli usi del suolo (Figure 9). Le distribuzioni dei boxplots confermano quanto fin ora verificato, ovvero che il TOC e le Humic Substances sono maggiormente presenti a Macate e meno a Vanduzi e Sussundenga. Per quanto riguarda la WEOC e la $POC\text{-occluded} < 1,6 \text{ g/cm}^3$, esse non presentano differenze statisticamente significative e la $POC < 1 \text{ g/cm}^3$ e la $1 \text{ g/cm}^3 < POC < 1,6 \text{ g/cm}^3$, sono presenti in piccolissime quantità. La motivazione risiede nel fatto che questi suoli hanno una tessitura prevalentemente sabbiosa (Table 2), una struttura quasi assente e una consistenza friabile (Table 1), quindi la sostanza organica labile e con essa il carbonio (WEOC) viene velocemente utilizzato o lisciviato; allo stesso tempo la frazione occlusa negli aggregati è di modesta entità a causa della struttura poco stabile (Chantigny, 2002). Infine, si osserva che in tutte e tre le località sia la $POC < 1 \text{ g/cm}^3$ che la $1 \text{ g/cm}^3 < POC < 1,6 \text{ g/cm}^3$ sono significativamente più elevate nelle carbonaie rispetto al campo coltivato, mentre nelle foreste si distribuiscono a un livello intermedio rispetto ai due precedenti usi del suolo.

5 Conclusioni

Il suolo è una risorsa non rinnovabile che va preservata per permettere alle generazioni attuali e future di poter vivere dignitosamente, soprattutto in un contesto mondiale di crescita demografica, particolarmente concentrata nei paesi in via di sviluppo, come nel caso del Mozambico.

In questo contesto i suoli sono fortemente minacciati dall'acidificazione, dall'erosione e dalla forte riduzione del contenuto in sostanza organica che riducono notevolmente le produzioni agricole. Sono necessarie pratiche di gestione del suolo conservative della sua fertilità fisica, chimica e biologica, e che favoriscano un'agricoltura rispettosa dell'ambiente in grado di soddisfare il fabbisogno alimentare.

La pratica dello *slash and burn*, diffusa in molti paesi in via di sviluppo, rientra fra quei sistemi agricoli che necessitano di particolare attenzione perché favorisce gravi processi di degradazione del suolo.

In questa tesi in particolare sono stati studiati gli effetti di questa pratica, sulla la fertilità fisica e chimica di suoli (Oxisols) mozambicani, monitorando il contenuto di sostanza organica e carbonio organico.

Le analisi di frazionamento hanno evidenziato che:

il TOC e le Humic Substances sono maggiormente presenti nel sito di Macate e meno in quelli di Vanduzi e Sussundenga;

per quanto riguarda la frazione solubile in acqua (WEOC) e quella occlusa negli aggregati (POC-occluded $< 1,6 \text{ g/cm}^3$), non presentano differenze statisticamente significative, mentre la POC $< 1 \text{ g/cm}^3$ e la $1 \text{ g/cm}^3 < \text{POC} < 1,6 \text{ g/cm}^3$, sono presenti in piccolissime quantità;

la tessitura prevalentemente sabbiosa di questi suoli, la struttura quasi assente e una consistenza friabile (Table 1), favoriscono evidentemente la lisciviazione della sostanza organica labile e con essa il carbonio (WEOC);

la frazione occlusa negli aggregati è di modesta entità a causa della struttura poco stabile;

nelle tre località sia la POC $< 1 \text{ g/cm}^3$ che la $1 \text{ g/cm}^3 < \text{POC} < 1,6 \text{ g/cm}^3$ sono significativamente più elevate nelle carbonaie rispetto al campo coltivato, mentre nelle foreste si distribuiscono a un livello intermedio rispetto ai due precedenti usi del suolo;

l'età diversa delle foreste non sembrerebbe essere determinante quindi ai fini dell'accumulo di sostanza organica, di carbonio organico e quindi del miglioramento della fertilità;

in ogni caso, la frazione che determina il più alto valore di TOC è rappresentata dalle Humic Substances, ovvero la parte più recalcitrante, che ha bisogno di più tempo per formarsi e per essere utilizzata;

il sito di Macate sembrerebbe essere quello con la gestione migliore perché i residui colturali lasciati nel campo coltivato favoriscono l'accumulo di materiale organico, e contemporaneamente le foreste e le carbonaie sono poco sfruttate e rimaneggiate.

Le informazioni acquisite con il presente studio sono importanti per poter migliorare l'applicazione e la gestione della pratica dello *slash and burn*, rendendola più sostenibile e adeguata ai cambiamenti climatici e sociali in atto ormai da diversi decenni. Risulta però necessario continuare ad approfondire le caratteristiche e l'evolversi di questo tipo di sistema, per permettere un costante miglioramento della tecnica, nel tentativo di migliorare la qualità della vita di tutti coloro che tutt'ora la utilizzano come mezzo di sostentamento.

6 Ringraziamenti

I miei ringraziamenti vanno coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro, in particolare la Prof.ssa Stefania Cocco e la Dott.ssa Dominique Serrani, che con la loro professionalità e dedizione mi hanno costantemente seguito e aiutato nelle varie scelte e fasi che la stesura di una tesi sperimentale comporta.

Ringrazio l'Universidade Eduardo Mondlane (Maputo, Mozambico) per la preziosa collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche.

Con la stesura della presente tesi ho potuto osservare da vicino e operare personalmente nel campo della pedologia agraria, aumentando così le mie conoscenze sia teoriche che pratiche del settore.

Voglio ringraziare in modo particolare i miei genitori Maria e Maurizio, mia sorella Margherita e la mia fidanzata Claudia, che con il sostegno e la preghiera mi hanno sempre incoraggiato e consolato quando sentivo di essere ancora lontano dal traguardo della laurea, e mi hanno consigliato nelle scelte del percorso di studi.

Un pensiero va anche alle mie due nonne Fernanda e Lina che, oltre ad essere state una presenza significativa nella mia vita e per la mia crescita, continuano ad accompagnarmi spiritualmente dal cielo.

Dedico questa tesi alla mia famiglia e a tutti coloro che la leggeranno, compresi i non operatori del settore, sperando che la lettura sia piacevole e interessante, perché è importante che il tema trattato sia approfondito da tutti per capire che la nostra Terra va salvaguardata e rispettata come dono per vivere in salute e per trasmetterla alle future generazioni.

7 Bibliografia

- L.E., 1965. Organic carbon. In: *Methods of soil analysis, Part 2* C.A. Black et al., cap. 9: 1367-1378.
- Arnason, T. (1982): Decline of soil fertility due to intensification of land use by shifting agriculturists in Belize, Central America. *Agro-ecosystems* 8, 27–37.
- Almeida, R.F.; Machado, H.A.; Martins, F.P.; Queiroz, I.D.S.; Teixeira, W.G.; Mikhael, J.E.R.; Borges, E.N. 2014. Correlação do tamanho e distribuição dos agregados em Latossolos amarelo da região do triângulo mineiro em diferentes ambientes. *Biosci. J.* 30, 1325–1334.
- Almeida, R.F., Silveira, C.H., Mikhael, J.E.R., Franco, F.O., Ribeiro, B.T., Ferreira, A.S., Mendonça, E.S., Wendling, B., 2014. CO₂ emissions from soil incubated with sugarcane straw and nitrogen fertilizer. *Afr. J. Biotechnol.*, 13, 3376–3384.
- Andriessse, J. P., Schelhaas, R. M., 1987. A monitoring study on nutrient cycles in soils used for shifting cultivation under various climatic conditions in tropical Asia. II. Nutrient stores in biomass and soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 19, n. 4, p. 285-310, 1987a.
- Arroyo-Kalin, M., 2012. Slash-burn-and-churn: Landscape history and crop cultivation in pre-Columbian Amazonia. *Quat. Inter.* 249, 4-18.
- Belsito A., Fraticelli A., Salisbury F. B., Ross, C. W., 1988. *Chimica agraria*, Bologna, Zanichelli.
- Box, G.E.P., Cox, D.R., 1964. Analysis of transformations. *J.R. Stat. Soc. Ser. B. Stat. Methodol.* 26, 211–252.
- Brady, N.C., 1996. Alternatives to slash-and-burn: a global imperative. *Agric., Ecos. Environ.* 58, 3-11.
- Brigham, T., Chihongo, A. and Chidumayo, E., 1996. Trade in woodland products from the miombo region. Pp. 137-174 in BM Campbell (ed) *The Miombo in Transition: Woodlands and Welfare in Africa*. Bogor, Indonesia: CIFOR
- Brookfield, H. and C. Padoch, 1994. ‘Appreciating Agrodiversity: A Look at the Dynamism and Diversity of Indigenous Farming Practices’, *Environment* 36(5): 6–21.
- Cronan, C.S., Grigal, D.F., 1995. Use of calcium/aluminium ratios as indicators of stress in forest ecosystems. *J. Environ. Qual.* 24, 209±226.
- Brown, D.R., 2006. Personal preferences and intensification of land use: their impact on southern Cameroon slash-and-burn agroforestry systems, *Agrofor. Syst.* 68, 53–67.

- Butnan, S., Deenik, J. L., Toomsan, B., Antal, M. J., & Vityakon, P., 2015. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma*, 237–238, 105–116.
- Carrière, S.M., Letourmy, P., McKey, D.B., 2002. Effects of remnant trees in fallows on diversity and structure of forest regrowth in a slash-and-burn agricultural system in southern Cameroon. *J. Trop. Ecol.* 18, 375–396.
- Chantigny M. H., 2002. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. *Geoderma* 113, 357– 380.
- Chen, L. H., Dong, T. F. & Duan, B. L. 2014. Sex-specific carbon and nitrogen partitioning under N deposition in *Populus cathayana*. *Trees* 28, 793–806, <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0992-3> .
- Chhabra R., Singh A., Abrol I.P., 1980. Fluorine in sodic soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 33.
- Choubert, G., Faure-Muret, A., Simpson, E. S. W., Shackleton, L., Segoufin, J., Seguin, C., 1986. International Geological Map of Africa, scale 1:5.000.000. Originating organization: Commission for the Geological Map of the World, UNESCO.
- Chowdhury, R.R., Turner, B.L., 2006. Reconciling agency and structure in empirical analysis: smallholder land use in the Southern Yucatan, Mexico. *Annals of the Association of American Geographers* 96, 302–322.
- City Population, 2017. <https://www.citypopulation.de/en/mozambique/cities/>
- Coomes, O.T., Grimard, F., Burt, G.J., 2000. Tropical forests and shifting cultivation: secondary forest fallow dynamics among traditional farmers of the Peruvian Amazon. *Ecol. Econ.* 32, 109–124.
- Dalle, S.P.; Pulido, M.T.; de Blois, S., 2011. Balancing shifting cultivation and forest conservation: lessons from a “sustainable landscape” in southeastern Mexico. *Ecol. Appl.* 21, 1557–1572.
- Davidson, E.A., de Abreusa, T.D., Carvalho, C.J.R., Figueiredo, R.D.O., Kato, M.D.A., Kato, O.R., Ishida, F.Y., 2008. An integrated greenhouse gas assessment of an alternative to slash-and-burn agriculture in eastern Amazonia. *Glob. Change Biol.* 14, 998–1007.
- Day, P.R., 1965. Particle Fractionation and particle-size analysis. P. 454-567. In C.A. Black et al. (ed) *Methods of Soil Analysis: Part 1.* Agron. Monogr.9. ASA and SSSA. Madison, WI. 9.1.

- Demeyer, A.; Voundi Nkana, J. C.; Verloo, M. G., 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. In: *Bioresource Technology*, 77, pp. 287–295.
- de Rouw, A., 1995. The fallow period as a weed-break in shifting cultivation (tropical wet forests). *Agric. Ecosyst. Environ.* 54, 31–43.
- Desanker, P. V., Frost, P. G. H., Justice, C. O., and Scholes, R. J., 1997. The Miombo Network: Framework for a Terrestrial Transect Study of Land-Use and Land-Cover Change in the Miombo Ecosystems of Central Africa. IGBP Report 41, International Geosphere-Biosphere Programme, Stockholm, Sweden.
- Desbureaux, S., Brimont, L., 2015. Between economic loss and social identity: The multi-dimensional cost of avoiding deforestation in Eastern Madagascar. *Ecol. Econ.* 118, 10–20. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.07.002>
- Deweese, P., Campbell, B. M., Katerere, K., Siteo, A., Cunningham, A. B., Angelsen, A., & Wunder, S., 2011. *Managing the Miombo Woodlands of Southern Africa: Policies, Incentives and Options for the Rural Poor*(Washington, DC: World Bank).
- Dingkuhn, M., Johnson, D.E., Sow, A., Audebert, A.Y., 1999. Relationships between upland rice canopy characteristics and weed competitiveness. *Field Crops Res* 61, 79–95.
- FAO-ITPS 2020. Protocol for the assessment of Sustainable Soil Management. Rome, FAO.
- FAO, 1982. Land and water use planning project FAO/UNPD/MOZ/75/011, assessment of land resources for rainfed crop production in Mozambique; map sheet of field document 35.
- FAO, 2015. Miombo woodlands and HIV/AIDS interactions - Mozambique Country Report, Forestry Policy and Institutions Working Paper 2.
- Fox, R. L., and E. J. Kamprath, 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:902–907.
- Fox, J., Truong, D.M., Rambo, A.T., Tuyen, N.P., Cuc, L.T., Leisz, S., 2000. Shifting cultivation: a new old paradigm for managing tropical forests. *BioScience* 50, 521–528.
- Fuge R., Andrews M.J., 1988. Fluorine in the UK Environ. *Environ, Geochem. Health*, 96: 10.
- Geist, H.J., Lambin, E.F., 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* 52, 143–150.

Glaser, B., Jago Jonathan Birk, J.J., 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82, 39–51.

Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W., 2018. Stability of soil organic matter in Terra Preta soils.

González-Pérez, J.A., Gonzáles-Vila, F.J., Almendros, G., Knicker, H., 2004. The effect of fire on soil organic matter – a review. *Environmental International* 30, 855-870.

Guto, S. N., P. Pypers, B. Vanlauwe, N. de Ridder, and K. E. Giller. 2011. Socio-ecological niches for minimum tillage and crop-residue retention in continuous maize cropping systems in smallholder farms of central Kenya, soil tillage conservation. *Agronomy Journal* 103(3):644–654.

Hass, A., Gonzalez, J.M., Lima, I.M., Godwin, H.W., Halvorson, J.J., Boyer, D.G., 2012. Chicken manure biochar as liming and nutrient source for acid appalachian soil. *Journal of Environment Quality*, 41, 1096-1106.

Holford, I. C. R. 1997. 'Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants', *Australian Journal of Soil Research*, 35(2), pp. 227–239. doi: 10.1071/S96047.

Holscher, D., Möller, R.F., Denich, M., Fölster, H., 1997. Nutrient input-output budget of shifting agriculture in Eastern Amazonia. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 47, 49–57.

IAI, 2015. Inquérito Agrário Integrado, Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar (MASA); <http://www.masa.gov.mz/>.

Ickowitz, Amy 2006. Shifting Cultivation and Deforestation in Tropical Africa: Critical Reflections. In: *Development and Change*, 37, pp. 599–626.

Ickowitz, A., 2011. Shifting Cultivation and Forest Pressure in Cameroon. *Agric. Econ.* 42, 207–220.

Inquérito Agrário Integrado [IAI], 2015.

Instituto Nacional de Estatística Moçambique [INE], 2017. <http://www.ine.gov.mz/>

International Finance Corporation [IFC], 2003. Assessing the competitiveness of the horticultural sector in Manica Province. Mission report. 50 pp

Jakovac, Catarina C.; Peña-Claros, Marielos; Kuyper, Thomas W.; Bongers, Frans, 2015. Loss of secondary-forest resilience by land-use intensification in the Amazon. In: *J. Ecol.* n. 103, pp. 67–77.

- Jakovac, Catarina C.; Peña-Claros, Marielos; Mesquita, Rita C.G.; Bongers, Frans; Kuyper, Thomas W. 2016. Swiddens under transition: Consequences of agricultural intensification in the Amazon. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, pp. 116–125. DOI: 10.1016/j.agee.2015.11.013.
- Jansen, L. J. M., Bagnoli, M., Focacci, M., 2008. Analysis of land-cover/use change dynamics in Manica Province in Mozambique in a period of transition (1990-2004), *Forest Ecology and Management*, 254(2), pp. 308–326. doi: 10.1016/j.foreco.2007.08.017.
- Jarosz, L., 1993. Defining and explaining tropical deforestation: shifting cultivation and population growth in colonial Madagascar (1896–1940). *Econ. Geogr.* 69, 366–379.
- Ji, D. H., Mao, Q. Z., Watanabe, Y., Kitao, M. & Kitaoka, S., 2015. Effect of nitrogen loading on the growth and photosynthetic responses of Japanese larch seedlings grown under different light regimes. *J. Agric. Meteorol.* 71, 232–238, <https://doi.org/10.2480/agrmet.D-14-00027>.
- Jordan, C., Caskey, W., Escalante, G., Herrera, R., Montagnini, R., Uhl, C., 1983. Nitrogen dynamics during conversion of primary Amazonian Rain Forest to slash and burn agriculture. *Oikos* 40, 131–139.
- Juo, A. S. R., and R. L. Fox. 1977. Phosphate sorption characteristics of some bench-mark soils of West Africa. *Soil Sci.* 124: 370–376.
- Kilawe, C.J., Mertz, O., Silayo, D.S.A., Birch-Thomsen, T., Maliondo, S.M., 2018. Transformation of shifting cultivation: Extent, driving forces and impacts on livelihoods in Tanzania. *Applied Geography* 94, 84–94.
- Kjeldahl J. New Method for the Determination of Nitrogen. *Chem. News* 1883, 48 (1240), 101–102; Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Z. Anal. Chem.* 1883, 22, 366–382; En ny Methode til Kvaelstofbestemmelsei organiske Stoeffter. *Medd. Carlsberg Lab.* 1883, 2 (1), 1–27; Sur une Nouvelle Méthode de Dosage de l'Azote dans les Substances Organiques (French summary: Résumé du CR Trav. Lab. Carlsberg; separately paged section) 1883, 2 (Juni), 1–12.
- Kleinman, Peter J. A., Pimentel, D., Bryant, R. B., 1995. The ecological sustainability of slash-and-burn agriculture. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 52, 235–249.
- Kumar B.M., Nair P.K.R., 2012. *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems. Opportunities and Challenges.* Springer.

- Kuo, S., 1996. Phosphorus. In: Sparks DL (ed) *Methods of soil analysis, part 3. Chemical Methods*. SSSA and ASA, Madison, 869–919.
- Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B., Karlen, D.L., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158, 443–449.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22.
- Landon, J.R., 1984. *Booker tropical Soil Manual*. Booker Agricultural International Limited. Pitman Press Bath, England, 450 pp.
- Lanly, J.P., 1985. Defining and Measuring Shifting Cultivation. *Unasyuva* 37, 17–21.
- Laskar S.Y., Sileshi G.W., Pathak K., Debnath N., Nath A. J., Singnar P., Das A. K., 2020. Variations in soil organic carbon content with chronosequence, soil depth and aggregate size under shifting cultivation.
- Li, P., Feng, Z., Jiang, L., Liao, C., Zhang, J., 2014. A Review of Swidden Agriculture in Southeast Asia. *Remote Sens.* 6, 1654-1683; doi:10.3390/rs6021654.
- Liu, N. et al., 2018. Alterations in leaf nitrogen metabolism indicated the structural changes of subtropical forest by canopy addition of nitrogen. *Ecotox environ safe* 160, 134–143, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.037>
- Mapa, R. B. and Kumaragamage, D., 1996. Variability of soil properties in a tropical Alfisol used for shifting cultivation, *Soil Technology*, 9(3), 187–197. doi: 10.1016/S0933-3630(96)00015-3.
- Mekaru, T. and Uehara, G., 1972. Anion Adsorption in Ferruginous Tropical Soils. *Soil Science Society of America Proceeding*, 36, 296-300.
- Mertz, O., 2002. The relationship between fallow length and crop yields in shifting cultivation: a rethinking. *Agroforestry Systems* 55, 149–159.
- Mertz, O., Padoch, C., Fox, J., Cramb, R. A., Leisz, S., Lam, N. T., Vien, T. D., 2009a. Swidden change in Southeast Asia: understanding causes and consequences. In: *Human Ecology*, 37, pp. 259–264.
- Mertz, O., Leisz, S.J., Heinemann, A., Rerkasem, K., Thiha, Dressler, W., Pham, V.C., Vu, K.C., Schmidt-Vogt, D., Colfer, C.J.P., Epprecht, M., Padoch, C., Potter, L., 2009b. Who Counts? Demography of Swidden Cultivators in Southeast Asia. *Hum. Ecol.* 37, 281–289.

Messerli, P., 2004. Alternatives a la culture sur brulis sur la falaise Est de Madagascar: strate'gie en vue d'une gestion plus durable des terres. University of Bern, Bern.

Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar, 2012-2014. Anuário de Estatísticas Agrárias. 2012-2014. https://www.masa.gov.mz/wp-content/uploads/2017/12/Anuario_Estatistico-2012_2014.pdf.

Mitchell, P.J., Simson, A.J., Soong, R., & Simpson, M.J., 2015. Shifts in microbial community and water-extractable organic matter composition with biochar amendment in a temperate forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 81, 244-254.

Mukul, S.A., Herbohn, J., 2016. The impacts of shifting cultivation on secondary forests dynamics in tropics: A synthesis of the key findings and spatio temporal distribution of research. *Environ. Sci. & Poli.* 55, 167–177.

Nath, T.K., Jashimuddin, M., Hasan, M.K., Shahjahan, M., Pretty, J., 2016. The sustainable intensification of agroforestry in shifting cultivation areas of Bangladesh. *Agroforestry Systems* 90, 405-416.

Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. Sparks and al. (ed). Part 3: Chemical Methods. SSSA, Wisconsin USA.

Nguetnkam J.P., Dultz S. 2011. Soil degradation in central north Cameroon: water-dispersible clay in relation to surface charge in Oxisol A and B horizons. *Soil Till. Res.*, 113,38–47.

Nhantumbo, I., Dent, J.B., Kowero, G., 2001. Goal programming: application in the management of the miombo woodland in Mozambique. *Euro. J. Operation. Res.* 133, 310–322.

Nielsen, U.; Mertz, O.; Noweg, G.T., 2006. The rationality of shifting cultivation systems: labor productivity revisited. *Human Ecology* 34, 210–218.

Nkala, P., Mango, N. and Zikhali, P., 2011. Conservation agriculture and livelihoods of smallholder farmers in Central Mozambique, *Journal of Sustainable Agriculture*, 35(7), pp. 757–779. doi: 10.1080/10440046.2011.606492.

Nye, P.H., Greenland, D.J., 1964. Changes in the soil after clearing tropical forest. *Plant Soil* 1, 101–112.

Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S, Dean, L.A., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA circular 939. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C.

- Omuetti J.A.I., Jones R.L., 1980. Fluorine distribution with depth in relation to profile development in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 247-249.
- Padoch, C.; Coffey, K.; Mertz, O.; Leisz, S., Fox, J.; Wadley, R.L., 2007. The demise of swidden in Southeast Asia? Local realities and regional ambiguities. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 107, 29–41.
- Padoch, C., Brondizio, E., Costa, S., Pinedo-Vasquez, M., Sears, R.R., Siqueira, A., 2008. Urban forest and rural cities: multi-sited households, consumption patterns, and forest resources in Amazonia. *Ecology and Society* 1, 3.
- Padoch, C., Pinedo-Vasquez, M., 2010. Saving Slash-and-Burn to Save Biodiversity. In: *Biotropica* n. 5, 42, pp. 550–552. DOI: 10.1111/j.1744-7429.2010.00681.x.
- PEDSA, 2011. Plano estratégico para o desenvolvimento do sector agrário 2011-2020. Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar (MASA); <http://www.masa.gov.mz/>.
- Perroilt K.W., Smith B.F.L., Inkson R.H.E., 1976. The reaction of fluoride with soils and soil minerals. *J. Soil Sci.*, 27: 58.
- Porcu G., 2010. Dinamica del carbon sink in una cronosequenza agro-forestale mediterranea: caratterizzazione delle frazioni di sostanza organica.
- Rafael, R.B.A., Fernandez-Marcos, M.L., Cocco, S., Ruello, M.L., Fornasier, F., Corti, G., 2019. Benefits of Biochars and NPK Fertilizers for Soil Quality and Growth of Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in an Acid Arenosol, *Pedosphere*, 29(3), 311–333. doi: 10.1016/S1002-0160(19)60805-2.
- Porro, R., 2005. Palms, pastures, and swidden fields: the grounded political ecology of agro-extractive/shifting-cultivator peasants in Maranhao, Brazil. *Human Ecology* 33, 17–56.
- Raharimalala, O., Buttler, A., Ramohavelo, C.D., Razanaka, S., Sorg, J.-P., Gobat, J.-M., 2010. Soil-vegetation patterns in secondary slash and burn successions in Central Menabe, Madagascar.
- Reed, E. Y., Chadwick, D. R., Hill, P. W., & Jones, D. L., 2017. Critical comparison of the impact of biochar and wood ash on soil organic matter cycling and grassland productivity. *Soil Biology & Biochemistry*, 110, 134–142.
- Rerkasem, K., Lawrence, D., Padoch, C., Schmidt-Vogt, D., Ziegler, A., Bruun, T.B., 2009. Consequences of swidden transitions for crop and fallow biodiversity in Southeast Asia. *Human Ecology* 37, 347–360.

- Riahtam, N.B., Nongkynrih, J.M., Sarma, K.K., Raju, P.L.N., Mishra, A.R., Lall, D., Kharsahnoh, A.M., Sahkhar, D.J., 2018. Assessment of shifting cultivation dynamics in East Garo Hills District, Meghalaya, India. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 169 012104.
- Rumpel C., Alexis M., Chabbi A., Chaplot V., Rasse D.P., Valentin C., Mariotti A, 2005. Black carbon contribution to soil organic matter composition in tropical sloping under slash and burn agriculture.
- R Core Team, 2014. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Sá, A., Marques, M., Godinho Gouveia, D., 1972. Estado Português de Moçambique. Carta Dos Solos. National Soil Maps (EUDASM).
- Schmidt-Vogt, D., Leisz, S.J., Mertz, O., Heinemann, A., Thiha, T., Messerli, P., Epprecht, M., Cu, P.V., Chi, V.K., Hardiono, M., Dao, T.M., 2009. An assessment of trends in the extent of Swidden in Southeast Asia. *Hum. Ecol.* 37, 269–280.
- Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Sears, R.R., Padoch, C., Pinedo-Vasquez, M., 2007. Amazon forestry transformed: integrating knowledge for smallholder timber management in eastern Brazil. *Human Ecology* 35, 697–707.
- Sequi P., 1989. *Chimica del suolo*, Bologna, Pàtron.
- Spencer, J. E., 1966. *Shifting Cultivation in Southeastern Asia* Berkeley and Los Angeles University of California Press.
- Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. U.S. Department of Agriculture, Agric. Handbook No. 436: 754 pp.
- Soil Survey Staff, 1994. *Keys to Soil Taxonomy*. USDA Natural Resources Conservation Service. Publ. US Govt. Print. Office, 6th. Edition, 306 pp.
- Soil Survey Staff, 2015. *Illustrated guide to soil taxonomy, version 2*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska.
- Stevenson, F.J., 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*, 2nd ed.; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, p. 496.

Styger, E., Rakotondramasy, H.M., Pfeffer, M.J., Fernandes, E.C.M., Bates, D.M., 2007. Influence of slash-and-burn farming practices on fallow succession and land degradation in the rainforest region of Madagascar. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119, 257–269.

Sugihara, S. et al., 2014. Effect of vegetation on soil C, N, P and other minerals in Oxisols at the forest-savanna transition zone of central Africa, *Soil Science and Plant Nutrition*. Taylor & Francis, 60(1), 45–59. doi: 10.1080/00380768.2013.866523.

The World Bank: <http://www.worldbank.org/>

Tiessen H., Cuevas E., Chacon P., 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility.

Thrupp, L. A.; S. Hecht and J. Browder, 1997. *The Diversity and Dynamics of Shifting Cultivation: Myths, Realities, and Policy Implications*. Washington, DC: World Resources Institute.

Unruh J.D., Houghton R.A., Lefebvre P.A., 1993. Carbon storage in agroforestry: an estimate for sub-Saharan Africa. *Climate Res*, 3:39-52

van Vliet, N., Mertz, O., Heinemann, A., Langanke, T., Pascual, U., Schmook, B., et al., 2012. Trends, drivers and impacts of changes in swidden cultivation in tropical forest-agriculture frontiers: A global assessment. In: *Global Environmental Change* n. 2, 22, pp. 418–429. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.10.009.

Venables, W.N., Ripley, B.D., 2002. *Modern applied statistics with S*, 4th edn. Springer, New York.

White, F., 1983. *The Vegetation of Africa*. UNESCO, Paris.

Wilson, G.F. and Akapa, K.L., 1983. Providing mulches for no-tillage in the tropics. In: I.O. Akobundu and A.E. Deutsch (Editors), *No-Tillage Crop Production in the Tropics*. International Plant Protection Center, Oregon State University, Corvallis, pp. 51-65.

Wood, S.L.R., Rhemtulla, J.M., Coomes, O.T., 2016. Intensification of tropical fallow-based agriculture: Trading-off ecosystem services for economic gain in shifting cultivation landscapes. *Agric., Ecos. Environ.* 215, 47–56.

World Statistic. <http://world-statistics.org/index.php>.

Xu, J.C., Lebel, L., Sturgeon, J., 2009. Functional links between biodiversity, livelihoods and culture in a Hani swidden landscape in Southwest China. *Ecology and Society* 14, 20.