

**Mendelova univerzita v Brně**

**Lesnická a dřevařská fakulta**

**Ústav lesnické botaniky, dendrologie a geobiocenologie**

Vliv rozdílných typů zástinu na vybrané vlastnosti plantáží

*Coffea arabica* v okolí města Villa Rica, Peru

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

### ***Čestné prohlášení***

*Prohlašuji, že jsem práci **Vliv rozdílných typů zástinu na vybrané vlastnosti plantáží Coffea arabica v okolí města Villa Rica, Peru** zpracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.*

*Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona. Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladu spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.*

*V Brně, dne:*

*Podpis autorky:*

## **Vliv rozdílných typů zástinu na vybrané vlastnosti plantáží *Coffea arabica* v okolí města Villa Rica, Peru**

### **Abstrakt**

Kávovník náleží mezi velmi důležité plodiny a zároveň je vhodný pro pěstování v agrolesnických systémech. Během pěti let byly studovány čtyři kávové plantáže s různými typy zástinu a bez něj v centrální části podhůří peruánských And. Jednou ze sledovaných veličin bylo vázání uhlíky, kdy nejvíce ho bylo vázáno na plantáži stíněné *Eucalyptus* spp., následoval *Pinus* spp., *Inga* spp. a nejméně na nezastíněné plantáži. Při studiu mikroklimatu bylo zjištěno, že zástin snižoval teplotu vzduchu a půdy a zvyšoval vlhkost vzduchu v porovnání s nezastíněným stanovištěm. Dostupnost vody v půdě byla menší na zastíněné plantáži. Další studovanou charakteristikou byl výskyt kávové rzi, kdy největší vliv na přítomnost této choroby měla odrůda a věk kávovníku. Dle výpočtů v této práci, příjem z prodeje dřeva stínících dřevin může činit 2–72 % příjmů z prodeje kávy.

**Klíčová slova:** agrolesnictví, kávovník, vázání uhlíku, mikroklimatické podmínky, rez kávová, stínící dřeviny

## **Influence of different shade types on properties of *Coffea arabica* plantations in vicinity of Villa Rica town, Peru**

### **Abstract**

Coffee belongs to very important crops in the world and it is traditionally grown in agroforestry systems. During the five years the four coffee plantations with different type of shading were studied in the foothills of the Peruvian Andes. The highest amount of carbon was found in the plantation shaded dominantly by *Eucalyptus* spp., followed by *Pinus* spp., *Inga* spp. and non-shaded site. The microclimatic characteristic measurement shows that shading reduces the mean air and soil temperatures and increases the air humidity, compared to the non-shaded site. It was recorded drier soil conditions at the shaded site. At all plantations, coffee variety and age had a significant effect on Coffee Leaf Rust incidence. The value of the timber stored in shade trees varied significantly. There were different results for different shade trees species (from 2% to 72% of the annual income from coffee production).

**Key words:** agroforestry, coffee, carbon sequestration, microclimatic conditions, *Hemileia vastarix*, Peru, shade trees

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Struktura práce</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Současný stav řešené problematiky</b> .....	<b>8</b>
4.1	Kávovník ( <i>Coffea</i> ) .....	8
4.2	Kávovník arabský ( <i>Coffea arabica</i> ) .....	8
4.2.1	Taxonomické zařazení druhu <i>Coffea arabica</i> L., 1768 .....	9
4.2.2	Rozšíření .....	9
4.2.3	Stanoviště.....	10
4.2.4	Hlavní choroby kávovníku.....	12
4.2.5	Variety a odrůdy kávovníku arabského .....	15
4.3	Agrolesnictví.....	19
4.3.1	Agrolesnický a monokulturní způsob pěstování kávy .....	24
4.3.2	Stínící dřeviny v agrolesnictví .....	28
4.3.3	Pěstování kávy v Peru.....	31
<b>5</b>	<b>Metodika práce</b> .....	<b>34</b>
5.1	Širší územní vztahy.....	34
5.1.1	Peru .....	34
5.1.2	Poloha studovaných plantáží .....	35
5.1.3	Studované plantáže .....	36
5.2	Sběr dat v terénu .....	40
<b>6</b>	<b>Požítá literatura</b> .....	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>Carbon Stock in Agroforestry Coffee Plantations with Different Shade trees in Villa Rica, Peru</b> .....	<b>50</b>
7.1	Abstract .....	50
7.2	Key words .....	50
7.3	Introduction.....	51
7.4	Materials and Methods.....	54
7.4.1	Study area description.....	54
7.4.2	Tree measurement, biomass and carbon stock estimation .....	57
7.4.3	Coffee plant measurement and biomass and carbon stock estimation.....	58
7.4.4	Soil properties .....	59
7.5	Results.....	60
7.5.1	Dendrological and mensurational data .....	60
7.5.2	Biomass and carbon stock.....	61
7.6	Discussion.....	65

7.7	Conclusions.....	69
7.8	Acknowledgments .....	69
7.9	References.....	70
<b>8</b>	<b>Microclimatic differences between shaded and non-shaded parts of a coffee plantation in the Peruvian Amazon .....</b>	<b>76</b>
8.1	Abstract.....	76
8.2	Keywords .....	76
8.3	Acknowledgment .....	76
8.4	Introduction.....	77
8.5	Materials and Methods.....	79
8.6	Results and Discussion .....	80
8.6.1	Air Temperature.....	80
8.6.2	Air humidity.....	84
8.6.3	Soil temperature .....	86
8.6.4	Water availability.....	87
8.7	Conclusions.....	89
8.8	References.....	89
<b>9</b>	<b>Identifying key factors affecting coffee leaf rust incidence in agroforestry plantations in Peru.....</b>	<b>92</b>
9.1	Abstract.....	92
9.2	Keywords .....	92
9.3	Introduction.....	93
9.4	Materials and methods .....	95
9.4.1	Description of study sites.....	95
9.4.2	Data collection .....	97
9.4.3	Statistical analysis.....	99
9.5	Results.....	100
9.5.1	Basic characteristics of coffee plantations.....	100
9.5.2	Influence of coffee variety, shade, age and plant density on CLR incidence. ....	104
9.6	Discussion.....	108
9.7	Conclusions.....	110
9.8	Acknowledgement .....	111
9.9	Supplementary data.....	112
9.10	References.....	113
<b>10</b>	<b>Shade tree timber as a source of income diversification in agroforestry coffee plantations .....</b>	<b>118</b>
10.1	Abstract.....	118

10.2	Key words .....	119
10.3	Introduction.....	119
10.4	Materials and methods .....	121
10.4.1	Study area description.....	121
10.4.2	Tree measurement and allometric equations .....	122
10.4.3	Wood and coffee prices .....	124
10.5	Results.....	125
10.5.1	Timber volume allometric equations .....	125
10.5.2	Economic evaluation of individual trees .....	125
10.5.3	Economic evaluation of plantations.....	126
10.6	Discussion.....	128
10.7	Acknowledgements.....	130
10.8	References.....	130
<b>11</b>	<b>Celkový závěr .....</b>	<b>133</b>
<b>12</b>	<b>Summary.....</b>	<b>137</b>
<b>13</b>	<b>Seznam použitých symbolů, zkratek a převodní faktory .....</b>	<b>140</b>
<b>14</b>	<b>Fotografické a obrázkové přílohy .....</b>	<b>141</b>

# 1 Úvod

Káva se získává z plodů kávovníků (*Coffea* spp.) a je velmi důležitou světově obchodovanou komoditou (O'Brien & Kinnaird 2003), která představuje hlavní zdroj příjmů 25 miliónů lidí (Donald 2004). Kávovníky jsou pěstovány na ploše 100 000 km<sup>2</sup> (Lewin et al. 2004; Leff et al. 2004), a proto má způsob jejich pěstování jak ekonomické, tak i environmentální globální dopady.

Kávovník roste přirozeně v podrostu etiopských lesů, a proto je optimální plodinou pro agrolesnické systémy. Agrolesnictví představuje systém využití půdy, ve kterém je pěstování dřevin a keřů spojeno s pěstováním zemědělských plodin (Nair 1993). Charakteristikou agrolesnických systémů je schopnost optimalizovat a zároveň diverzifikovat produkci daného území, kde stromy poskytují mnoho různých surovin jako je např. dřevo, potrava, píce, otop, organický materiál, léčivé a kosmetické látky, oleje a pryskyřice (Torre 2008). Vzhledem k rozsáhlému odlesňování v oblasti tropického deštného lesa, jsou agrolesnické systémy možností, jak alespoň částečně zachovat podmínky vhodné pro život místních druhů, které na odlesněných plochách nejsou schopny přežít (Perfecto et al. 1996; Moguel a Toledo 1999). Kávovník je možné pěstovat i na monokulturních plantážích bez stínících dřevin (Campanha et al. 2004). Tyto typy plantáží však ochuzují biodiverzitu daného území a také způsobují degradaci tropických půd (Fernandez 2001).

Vzhledem k negativním dopadům změny klimatu je v posledních letech kladen důraz na snížení obsahu skleníkových plynů v atmosféře, a to zejména oxidu uhličitého. Špatné hospodaření s půdou (zejména odlesňování) je druhým největším zdrojem CO<sub>2</sub> v atmosféře (IPCC 2013). Agrolesnictví se přitom jeví jako vhodný systém pěstování plodin, který dokáže vázat CO<sub>2</sub> (Schroth et al. 2002). Kávové plantáže hrají, díky velké rozloze, na které se nacházejí, důležitou roli v koloběhu uhlíku. Aby bylo možné zvolit vhodnou politiku podpory vázání CO<sub>2</sub> pro pěstitele kávy, je zapotřebí kvantifikovat množství tohoto plynu vázaného na agrolesnických kávových plantážích s různými druhy stínících dřevin a na monokulturních kávových plantážích bez zástinu.

Agrolesnictví je považováno za nedestruktivní a finančně dostupný způsob, jak ochránit zemědělské plodiny před budoucími změnami klimatu (Lin 2007). Stínící dřeviny na kávových plantážích zlepšují mikroklimatické poměry tím, že zmírňují teplotní extrémy

vzduchu a listů kávovníku (Siles et al. 2010). Z produkčního i ekologického úhlu pohledu je znalost změn mikroklimatu v zastíněném a nezastíněném porostu kávovníku během různých období roku důležitá pro zavedení trvale udržitelných agronomických postupů (Morais et al. 2006). I přesto, že je Peru jedním z hlavních exportérů kávy, o mikroklimatických poměrech na kávových plantážích v této zemi nalezneme v literatuře pouze velmi málo informací. Přitom sledování mikroklimatu může pomoci pochopit, jaký vliv mají stínící dřeviny na kávovník a zda jej mohou chránit před výkyvy klimatu.

S rozšířením kávovníku do tropů celého světa a jeho pěstováním na plantážích velkých rozloh se rozšířily také choroby a škůdci této plodiny. Jednou z nejzávažnějších chorob kávovníku je rez kávová, způsobená houbou (*Hemileia vastarix* Berk et Br.) (Kushalappa 1989; Prakash et al. 2004; Wintgens 2012). Rez kávová se vyskytuje ve všech zemích pěstujících kávovník a způsobuje velké škody na těchto rostlinách i sklizni kávy (Wintgens 2012). Na výskyt rzi kávové působí mnoho faktorů a doposud není jasné, jak výskyt nemoci ovlivňují. Velmi důležité je zjistit, zda zástin zvyšuje, snižuje, anebo nemá vliv na pravděpodobnost onemocnění kávovou rzí. Toto zjištění může napomoci k volbě vhodných pěstebních postupů a ke stanovení optimální úrovně zástinu na kávových plantážích.

Agrolesnictví je všeobecně vnímáno jako potenciální způsob ke zlepšení socioekonomické a environmentální udržitelnosti v rozvojových zemích (Jiménez-Avila a Martínez 1979; Barradas a Fanjul 1984; Garrett et al. 2000; Alavalapati and Nair 2001; Nair 2001). Výnos z prodeje dřeva stínících dřevin může pomoci pěstitelům kompenzovat ztráty způsobené kolísáním cen kávy na světových trzích. Práce, které se věnují tématice zvýšení výnosů kávových plantáží prostřednictvím prodeje dřeva ze stínících dřevin, vycházejí většinou z dotazníkových šetření. Přitom ověření zásob obchodovatelné dřevní hmoty pro různé druhy stínících dřevin přímo na plantážích může pomoci nejen pěstitelům při volbě pěstebních praktik, ale i různým organizacím podporujícím pěstitele kávy ke správné volbě strategie.

Otázek, kterým se dá věnovat v agrolesnictví, je velmi mnoho. Tato práce si vybrala čtyři hlavní témata naznačená v předchozím textu (vázání uhlíku, rozdíly v mikroklimatu, nemocnost kávovníku a podíl stínících dřevin na výnosech z kávových plantáží), která



autorka zkoumala na agrolesnických kávových plantážích v okolí městečka Villa Rica v Peru. Témata ke studiu nebyla stanovena najednou, ale vyvíjela se postupně studiem literatury a zejména spoluprací s místními pěstiteli kávy.

Pro pěstitele je výzkum na kávových plantážích velmi důležitý. Někteří pěstitelé chtějí začít s agrolesnictvím pod vlivem příspěvků na zalesňování a vázání uhlíku, proto potřebují vědět, pro které stínící dřeviny by mohli dostat největší podporu. Další pěstitelé chtějí zvýšit svoje zisky z produkce kávy prostřednictvím výnosů z prodeje dřeva stínících dřevin. Jiní pěstitelé již vlastní kávovou plantáž a potřebují více znalostí o tom, ve kterých podmínkách bude káva nejlépe vzdorovat obávané rzi kávové. Těm, kteří již kávu pěstují, také poslouží údaj o tom, jak stínící porost ovlivňuje mikroklima a jak docílit optimální teploty a vlhkosti vzduchu a půdy pro kávovník. Výzkum pěstování kávovníku je důležitý také pro jednotlivé státy a organizace věnující se otázce změny klimatu. Mnoho organizací vydává doporučení pro pěstitele a pro tato doporučení potřebují data získaná v terénu. I z tohoto důvodu se autorka rozhodla vytvořit disertační práci složenou ze článků psaných v anglickém jazyce a vydaných v mezinárodních časopisech. Prostřednictvím těchto publikací se výsledky výzkumu dostanou k čtenářům z celého světa. Anglicky psané články tvoří v této disertační práci jednotlivé kapitoly, které jsou uvedeny a zakončeny kapitolami v českém jazyce.

## 2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce bylo porovnání kávových plantáží pěstovaných s různými typy zástinu a bez zástinu z hlediska vázání uhlíku, mikroklimatických charakteristik, výskytu rzi kávové a možnosti diverzifikovat příjmy pěstitelů. Byly vybrány tři reprezentativní kávové plantáže pěstované agrolesnickým způsobem, přičemž na jedné plantáži byl vymezen segment pěstovaný bez zástinu, který charakterizuje monokulturně pěstovanou kávovou plantáž. Po dvou letech byla do výzkumu přiřazena další plantáž z důvodu ukončení pěstování kávovníku na jedné z dříve sledovaných plantáží.

### **Hlavní otázky předkládané práce:**

Kolik uhlíku je vázáno na agrolesnických kávových plantážích stíněných různými druhy dřevin (*Inga* spp., *Eucalyptus* spp., *Pinus* spp.) a na monokulturní kávové plantáži?

Kvantifikace množství uhlíku na rozdílných plantážích nám umožní lépe porozumět roli agrolesnických systémů v koloběhu uhlíku. Toto téma je důležité i pro vlastníky, protože pokud se dostanou do programu podpory vázání uhlíku, bude to pro ně znamenat možnost diversifikace jejich příjmů. Díky kvantifikaci množství uhlíku vázaného v agrolesnických systémech, bude možné lépe porozumět roli těchto ekosystémů v REDD+ programech a následně vytvořit vhodnou strategii pro vázání uhlíku.

Jaký je vliv stínících dřevin na mikroklima kávových plantáží?

Přestože centrální část peruánské Amazonie je pro pěstování kávy důležitým regionem, nejsou zde k dispozici žádné informace o mikroklimatu na kávových plantážích. Mikroklima je ovlivňováno stínícími dřevinami a zároveň má velký vliv na kávovník. Cílem mikroklimatických měření v agrolesnické a monokulturní části plantáže bylo najít odpověď na následující otázky:

*Jaký efekt má zástin na půdní a vzdušnou teplotu a vlhkost na kávových plantážích?*

*Jaká je schopnost stínících dřevin zmírnit mikroklimatické výkyvy a také výkyvy půdního vodního potenciálu?*

Jakou roli hraje odrůda, věk a hustota výsadby kávovníku, množství zástinu a půdní vlastnosti ve výskytu kávové rzi (*Hemileia vastarix*) na kávových plantážích?

Kávová rez je jednou z nejobávanějších onemocnění kávovníku. I přes tuto skutečnost je studií věnujících se vlivu různých faktorů na výskyt kávové rzi odpublikováno relativně

malé množství. Hlavní otázky, které byly vzhledem k výskytu rzi kávové v této práci položeny, jsou následující:

*Jak odrůda kávovníku ovlivňuje výskyt rzi kávové?* V literatuře nalezneme studie o náchylnosti jednotlivých odrůd ke rzi kávové, ale studie věnované testování náchylnosti k onemocnění jednotlivých odrůd kávovníku rzí kávovou, zpracovaných přímo v terénu na plantážích, nebyly nalezeny.

*Jak ovlivňuje zástin výskyt rzi kávové?* Přesvědčení o tom, že se zvyšujícím se zástínem stoupá i náchylnost kávovníku ke kávové rzi, zapříčinila přechod mnoha agrolesnických kávových plantáží na monokulturní pěstování. Přitom z dostupné literatury vyplývá, že vliv zástinu na výskyt kávové rzi je velmi sporný. Testování množství výskytu rzi kávové v závislosti na úrovni zástinu a zároveň dalších faktorech by mohlo přinést odpověď na tuto otázku.

*Mají stáří a hustota výsadby kávovníku a vlastnosti půdy vliv na výskyt kávové rzi?* Taktéž byl zkoumán vliv dalších faktorů, kterým se předchozí studie věnovaly často (hustota výsadby), velmi zřídka (půdní vlastnosti), nebo vůbec (věk kávovníku). Autorka se domnívá, že multikriteriální analýza vlivu různých faktorů na kávovou rez, může objasnit dosud nepředpokládané vztahy mezi různými faktory.

#### Kolik dřevní hmoty poskytují stínící dřeviny a jakou mírou se mohou podílet na příjmech z kávových plantáží?

Káva je tradičně pěstována v agrolesnických systémech, kde stínící dřeviny mohou být zdrojem příjmů pro pěstitele kávy. Informace o hodnotě dřeva stínících dřevin a jeho potenciálním podílu na ekonomice kávových plantáží založená na empirických datech není v současné době k dispozici. Hlavní podotázkou tedy je:

*Může příjem z prodeje dřeva nahradit příjem z prodeje kávy?* K zodpovězení této otázky byly použity výpočty založené na různých kombinacích výše cen a velikosti sklizně kávy.

### **3 Struktura práce**

Disertační práce je předložena ve formě článků v anglickém jazyce (tab. 1), které jsou zařazeny do čtyř kapitol, a je doplněna česky psanými kapitolami: Úvod, Cíl práce, Struktura práce, Teoretické aspekty studované problematiky, Metodika práce, Celkový závěr, Fotografické přílohy a anglicky psaným Summary. Při psaní dvojjazyčné disertační práce byla autorka inspirována disertačními pracemi, které na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně obhájili v roce 2014 Ing. Martin Šenfelder, Ph.D. a v roce 2016 Ing. Irena Hubálková, Ph.D.

Autorka je u všech připojených publikací uvedena jako hlavní autor. Podíl řešitelky disertační práce na zpracovaných článcích je následující:

#### **Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru**

Autorka disertační práce provedla všechny terénní práce, a to buď za pomoci místních pracovníků, nebo studentů Mendelovy univerzity v Brně (MENDELU). Analýzy půd byly zpracovány v laboratoři při univerzitě Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Peru. Většinu výpočtů a grafů, kromě pedologických dat, vyhotovila autorka v programu Microsoft Excel. Autorka napsala textovou část manuskriptu. Spoluautoři poskytli cenné rady při vyhodnocování dat a psaní textové části práce.

#### **Microclimatic differences between shaded and non-shaded parts of a coffee plantation in the Peruvian Amazon**

Autorka nainstalovala čidla pro měření mikroklimatických dat a následně pravidelně tato data stahovala. Autorka také zpracovala mikroklimatická data v programu Microsoft Excel a Statistica a vytvořila grafy, které jsou použity v práci. Manuskript napsala autorka, přičemž spoluautoři jí poskytli cenné rady jak metodického rázu, tak v průběhu zpracování dat a při psaní textu.

#### **Identifying key factors affecting coffee leaf rust incidence in agroforestry plantations in Peru**

Autorka disertační práce provedla všechny terénní práce, a to buď za pomoci místních pracovníků, nebo studentů MENDELU. Analýzy půd byly zpracovány v laboratoři při univerzitě Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Peru. Část tabulek

a grafů zpracovávala autorka sama, složitější analýzy zpracovali spoluautoři. Manuskript psala autorka, přičemž spoluautoři se podíleli na psaní metodické sekce a poskytli jí také cenné rady.

### **Shade tree timber as a source of income diversification in agroforestry coffee plantations**

Autorka použila data z terénních prací, které vedla a také data paní Ing. Zuzany Šeptunové, které byly publikovány v její diplomové práci, u níž autorka figurovala jako konzultant (tato data posloužila k výpočtům alometrických rovnic). Část tabulek a grafů zpracovávala autorka sama a složitější analýzy zpracoval pan Ing. Radim Matula, Ph.D. Manuskript psala autorka, přičemž spoluautoři poskytli cenné rady a připomínky k sepsání textu.

**Tab. 1: Přehled publikací zařazených do disertační práce.**

<b>Název publikace</b>	<b>Typ</b>	<b>Periodikum/sborník</b>	<b>Stav</b>	<b>Autoři</b>
Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru	článek ve vědeckém časopise s impakt faktorem	Agroforest System (2016) 90: 433–445 DOI 10.1007/s10457-015-9865-z	vydáno	Ehrenbergerová L., Cienciala E., Kučera A., Guy L., Habrová H.
Microclimatic differences between shaded and non-shaded parts of a coffee plantation in the Peruvian Amazon	článek ve vědeckém časopise s impakt faktorem	Experimental Agriculture	submitted	Ehrenbergerová L., Šenfěldr M., Habrová H.
Identifying key factors affecting coffee leaf rust incidence in agroforestry plantations in Peru	článek ve vědeckém časopise s impakt faktorem	Agroforestry Systems	submitted	Ehrenbergerová L., Kučera A., Cienciala E., Trochta J., Volařík D.
Shade tree timber as a source of income diversification in agroforestry coffee plantations	článek ve vědeckém časopise s impakt faktorem	Agriculture, Ecosystems & Environment	v recenzním řízení	Ehrenbergerová L., Šeptunová Z., Habrová H., Puerta Tuesta R. H., Matula R.

## 4 Současný stav řešené problematiky

### 4.1 Kávovník (*Coffea*)

Rod *Coffea* L. (kávovník) náleží do čeledi Rubiaceae (mořenovité) pocházející z tropické Afriky (Valíček 2002). Celkem do rodu *Coffea* náleží 70 druhů rostlin (Wintgens 2012). V rámci tohoto rodu jsou nejdůležitější dva druhy, které jsou nejvíce využívány pro výrobu kávy: *Coffea arabica* (káva arabika) a *C. canephora* var. *robusta* (káva robusta). Další dva druhy využívané pro výrobu kávy méně často jsou: *C. liberica* (liberijská káva) a *C. excelsa* (káva excelsa), které jsou pěstovány v západní Africe a v Asii a představují pouze 1–2 % světové produkce kávy (Wintgens 2012). Na druhou stranu 65 % světové produkce kávy činí sklizeň *C. arabica* (Valíček 2002). V této disertační práci bude pod pojmem kávovník popisován pouze druh *C. arabica*, nebude-li uvedeno jinak (obr. 1).



Obr. 1: Ruční sběr kávy na rostlině *Coffea arabica*, Villa Rica, Peru.

### 4.2 Kávovník arabský (*Coffea arabica*)

*Coffea arabica* je stálezelený keř nebo keřovitý strom 2–3 m vysoký s krátce řapíkatými, vstřícnými, eliptickými listy, které jsou 120–150 mm dlouhé, špičaté, tuhé, často zvlněné. Květy jsou přisedlé po dvou až devíti ve svazečcích v úžlabí listů, oboupohlavné, pětičetné, vonné, korunní plátky bílé (obr. 2). Plodem je elipsoidní asi 15 mm dlouhá peckovice na vrcholu se zbytky zaschlého kalichu. V dužnatém mezokarpu a blanitém endokarpu jsou obvykle uložena dvě zelená semena, z jedné strany plochá, s hlubokou rýhou (Valíček 2002).



Obr. 2: Květ kávovníku, Villa Rica, Peru.

#### 4.2.1 Taxonomické zařazení druhu *Coffea arabica* L., 1768

Říše: Plantae (rostliny)

Podříše: Tracheobionta

Oddělení: Magnoliophyta

Třída: Rosopsida

Řád: Gentianales Juss. ex Bercht. & J. Presl

Čeleď: Rubiaceae Juss.

Rod: *Coffea* L.

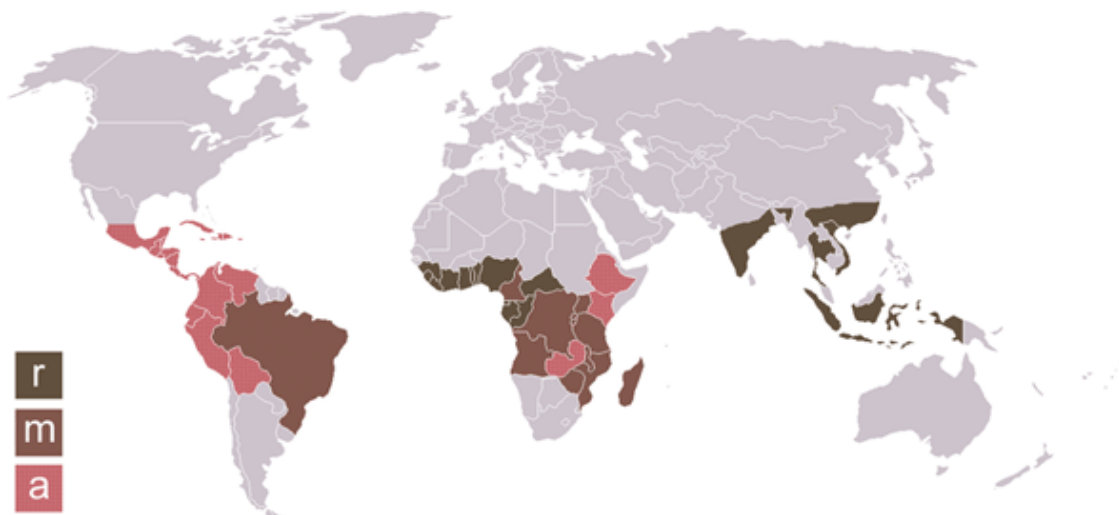
Podsekce: *Erythrocoffea*

Druh: *Coffea arabica* L.

#### 4.2.2 Rozšíření

Kávovník arabský pochází z Etiopie, kde je možné stále nalézt plané rostliny tohoto druhu v podrostu místních lesů (Wintgens 2012). Kávovník byl z Etiopie nejdříve vyvezen do Jemenu, přičemž první zmínky o jeho pěstování v této oblasti pochází z roku 575 (Thorn 1995), kde se pěstoval ve větší míře, a přes přístav Mokka byla exportována pražená kávová zrna i do Evropy (Nowak 2002). K rozšíření pěstování kávovníku z Jemenu do dalších zemí došlo až v 17. století, kdy Dánové založili plantáže v Indonésii. Teprve v roce 1718, když Holanďané dovezli kávovník na severní pobřeží Jižní Ameriky, se tato rostlina poprvé dostala na území, které se mělo brzy stát centrem jejího pěstování (Thorn 1995).

V Africe roste káva (*C. arabica* a *C. robusta*) na kontinentálních náhorních plošinách, na východním pobřeží a na Madagaskaru. V Asii a Oceánii nalezneme tyto druhy ve vyšších nadmořských výškách Jemenu, Indie, Filipín, Papuy Nové Guiney, Mauricia, Reunionu, Nové Kaledonie, Vietnamu a Havaje. V Americe potom na náhorních plošinách tropických oblastí a ve středních nadmořských výškách Jižní Ameriky a karibských oblastí (Wintgens 2012). Nejvíce kávy druhu *C. arabica* se vypěstuje v Latinské Americe, kdežto *C. canephora* je pěstována zejména v Asii (Donald 2004). Káva (*C. arabica* a *C. robusta*) představuje hlavní zdroje příjmů pro 25 miliónů lidí, většinou malých pěstitelů (Donald 2004).



Obr. 3: Rozšíření *Coffea arabica* a *C. canephora* var. *robusta* ve světě. Vysvětlivky: r = *C. canephora* var. *robusta*, m = *C. canephora* var. *robusta* + *Coffea arabica*, a = *C. arabica* [1].

#### 4.2.3 Stanoviště

Kávovník arabský pochází z etiopského tropického lesa, kde roste v nadmořských výškách mezi 1 600–2 800 m n. m. Průměrná roční teplota je zde 20 °C s velkou variabilitou teploty vzduchu během dne. Roční srážky se pohybují mezi 1 600 až 2 000 mm, kdy většina spadne v období od března do října a zbytek roku je suchý (Sylvain 1955).

V současné době se kávovník pěstuje mezi 22. stupněm severní a 26. stupněm jižní zeměpisné šířky (Wintgens 2012). Optimální teplota pro *C. arabica* je dle Alegra (1959) 18–21 °C, Wintgens (2012) uvádí 18 °C přes noc a 22 °C během dne s tolerovanými extrémy 15 °C přes noc a 25–30 °C přes den. Při teplotě vyšší jak 28 °C je urychleno zrání plodů na úkor kvality, naopak nízké teploty zrání plodů zpomalují (Camargo 1985). Vysoké teploty také podporují vznik onemocnění kávovníku způsobené *Hemileia vastarix* nebo rodu *Cecrospora* (Wintgens 2012). Naopak pokles teploty pod -2 °C na dobu delší než 6 hodin způsobí vážné poškození kávovníku, které může vést až k jeho odumření (Wintgens 2012). Průběhy teplot také působí na stav kávovníku – pokud rozdíl v teplotě vzduchu překročí během dne 19 °C, může dojít k vážnému poškození rostliny (Wintgens 2012).

Kávovníku arabskému nejlépe vyhovují dle Alegra (1959) průměrné roční srážky mezi 1 200–1 800 mm, podle Wintgense (2012) je to 1 400–2 000 mm. Intenzivní deště během roku způsobují nerovnoměrnou sklizeň a nižší výnosy (Maestri a Barros 1977). Pokud



klesnou průměrné roční srážky pod 800–1 000 mm, je významně ohroženo kvetení a sklizeň. Naopak roční úhrny srážek mezi 2 500–3 000 mm jsou běžné v mnoha oblastech pěstování kávy a nejsou zdrojem větších poškození kávovníku. V oblastech s ročním úhrnem srážek nad 3 000 mm se pěstování kávovníku nedoporučuje (Wintgens 2012). Důležité je 2 až 4 měsíční období sucha, které hraje významnou roli pro nástup kvetení (Haarer 1958). *Coffea arabica* je schopná bez poškození snést i čtyř až šesti měsíční období sucha (Wintgens 2012). *Coffea arabica* vyžaduje vlhkost 60 % (Wintgens 2012), což je dokonce menší vlhkost, než jaká je běžná na Etiopské vysočině (Haarer 1958; Coste 1992). Vlhkost vzduchu nad 85 % může zhoršit kvalitu kávy.

Jelikož se hlavní část kořenového systému kávovníku vyvíjí v horní vrstvě půdy (do 300 mm), jsou její vlastnosti velmi důležité (Wintgens 2012). Půdy vhodné pro pěstování kávovníku mají mít pórovitost 50–60 %, obsah minerálů 45 % a obsah organických látek 2–5 %. Nejvhodnější půdy pro jeho pěstování jsou původem z lávy, vulkanického popela, bazických hornin a aluviálních usazenin, které poskytují vysokou kapacitu kationtové výměny. Hlavní zásadou je, že půdy, na kterých se káva pěstuje, by neměly obsahovat více než 20–30 % hrubého písku a 70 % jílu v horní vrstvě (300–500 mm). Pro správný růst kávovníku je důležitá hloubka půdy nad překážkou růstu kořenů. Překážkami mohou být tvrdá povrchová kůra (hardpan), vysoká hladina spodní vody nebo matečná hornina blízko povrchu. Hloubka půdy by měla být nejméně 2 m, přičemž kořeny kávovníku mohou prorůst do hloubky až 3 m. Kávovník by neměl být vysazován v místech, kde hladina spodní vody je výše než 1,5 m. Taktéž pro něj nejsou vhodná zaplavovaná území a špatně provzdušněné těžké půdy. Pokud shrneme nároky kávovníku na půdu, ideální vlastnosti má hluboká, propustná, lehce kyselá a pórovitá půda s vysokou retenční schopností. Naopak těžké, málo propustné půdy jsou pro kávovník zcela nevhodné (Wintgens 2012). Ukázka půdy na plantáži Ave Fénix je na obr. 4.

Rovinaté terény a malé sklony svahu jsou nevhodnější pro založení kávových plantáží, protože jsou zde většinou hluboké půdy, dobrá vodní retenční kapacita a lze zde použít mechanizaci. Na druhou stranu může být kávovník pěstován také na svazích, pokud se použije vhodná technologie pěstování, aby bylo zamezeno erozi. Obecně kávové plantáže na svazích se sklonem 20–30 % mohou být obhospodařovány za použití nářadí tažených zvířaty. Větší sklony pak musí být sklizeny ručně (Wintgens 2012).



Obr. 4: Zároveň z plantáže Ave Fénix, Peru.

#### 4.2.4 Hlavní choroby kávovníku

Nadzemní části kávovníku napadají různé choroby, mezi ty nejvýznamnější patří:

**Rez kávová** (španělsky: Roya herrumbe; anglicky Coffee leaf rust)

Rez kávová je jedna z ekonomicky nejvýznamnějších chorob kávovníku na světě (Kushalappa 1989; Prakash et al. 2004). Jedná se o houbovou chorobu způsobenou druhem *Hemilia vastarix* Berk. and Br. z čeledi Puccinaceae. Tato choroba byla poprvé identifikována v roce 1891 na Srí Lance a dlouhou dobu se mělo za to, že se vyskytuje pouze v Asii a Africe. Avšak v roce 1970 byla nalezena malá plocha osázená *Coffea arabica*, která byla nakažena právě rzí kávovou, ve státě Bahia v Brazílii a tím začíná její výskyt ve Střední a Jižní Americe (Wintgens 2012). Rez kávová je považována za nejtěžší známé onemocnění kávovníku, což je zřejmě způsobeno tím, že vedla k ukončení pěstování kávy na Srí Lance pouhých 6 let po objevení této choroby. Zajímavé je, že právě tento fakt vedl k nahrazení plantáží kávovníku čajovými plantážemi, což následně zapříčinilo zvýšení konzumace čaje ve Velké Británii. V rozsahu následků infekce kávovou rzí na Srí Lance samozřejmě hrála důležitou roli také nedostupnost jakýchkoli přípravků pro boj s touto chorobou. Kávová rez nepříznivě ovlivňuje zisky z kávy díky tomu, že *Coffea arabica* je nejvíce napadaným druhem a zároveň je pěstována na

největších rozlohách ze všech kávovníků (Wintgens 2012). Poslední epidemie kávové rzi byla zaznamenána mezi roky 2012–2013 v mnoha zemích Latinské Ameriky (včetně Peru) a způsobila zde ztráty na výnosech v rozmezí 10–70 % (JNC 2014).

První symptomy napadení touto chorobou jsou malé bezbarvé skvrny na spodní straně listů. Do deseti dnů se tyto malé skvrny zvětší a pokryjí list popraškem oranžové barvy, viz. obr. 5 (Wintgens 2012). Střední skvrn způsobených kávovou rzí mohou uschnout a zbarvit se do hněda. Nakažené listy poté předčasně opadávají (Arneson 2000). Rozvoj choroby způsobí kompletní opadání větví, což silně oslabí rostlinu, a u méně vitálních jedinců může mít za následek odumření rostliny. Obecně se předpokládá, že 1% ztráta listů přinese 1% ztrátu na úrodě (Wintgens 2012).

Spory *Hemilia vastarix* klíčí pouze ve vlhkém prostředí s teplotou vzduchu mezi 20 až 25 °C, s největší aktivitou při 22 °C (Nutman et al. 1960). Klíčení sporů bylo navíc zaznamenáno zejména ve tmě (Rayner 1961). Tento fakt nutně neznamená, že spory neklíčí ve dne nebo za nepříznivých teplotních podmínek, hypoteticky jim poskytnete vhodné prostředí také pozice listů uvnitř kávovníku, anebo pod korunami stínících dřevin (Wintgens 2012).



Obr. 5: List kávovníku napadený kávovou rzí. Zleva doprava – postup nákazy (Arneson 2000).

### **„Ojo de Gallo“** (anglicky: American leaf spot)

Toto onemocnění je způsobeno druhem *Mycena citricolor* (Berk. and Curt) Sacc. „Ojo de Gallo“ (v Peru nazýváno „Ojo de Pollo“ – kuří oko) se projevuje skvrnami na listě kávovníku, které jsou pravidelně kulaté a uvnitř tmavší. Napadená tkáň listu často odumírá a list je potom děrovaný. Silné napadení touto chorobou způsobuje úplné opadání listů (Wintgens 2012).

**„Cercospora“** (anglicky: Brown Eye Spot)

Tuto chorobu způsobuje druh *Cercospora coffeicola* Berk and Coke. Cercospora napadá listy všech věkových kategorií, ale nejvíce postihuje listy mladé. Hlavními symptomy jsou kulaté skvrny šedohnědé barvy se světlejší skvrnou uprostřed (obr. 6). I na plodech se objevují hnědé skvrny a opadávají předčasně. Tato choroba však napadá pouze kávovníky, které mají nedostatek dusíku a draslíku, a také ty, které jsou vystaveny přímému slunci (Wintgens 2012).



Obr. 6: List napadený Cercosporou [2].

**„Antracnosis“** (anglicky: Coffee Berry Disease)

Antracnosis je způsobena druhem *Colletotrichum kahawae* Waller and Brifge (Waller et al. 1993). Symptomy této choroby jsou žlutohnědé skvrny s černými tečkami a černé ranky na zelených plodech. Právě tmavé ranky jsou nebezpečné a houba dokáže zničit plod v několika dnech (Wintgens 2012).

**„Tracheomicosis“** (anglicky: Coffee Wild Disease)

Tracheomicosis způsobují následující organismy: *Fusarium xylarioides* Steyaert, *Gibberella xylarioides* Heim and Saccas a *Carbuncularia xylarioides* Heim and Saccas. Listy napadené touto chorobou zežloutnou a následně opadají. Postupně odumřou (v rádech týdnů až měsíců) také větve a následně celá rostlina (Wintgens 2012).

#### 4.2.5 Variety a odrůdy kávovníku arabského

Šlechtění kávovníku umožnilo vznik vysoce plodících odrůd rezistentních vůči chorobám způsobeným *Hemileia vastarix* a *Colletotrichum kahawae*. V současné době pochází většina kávy na světových trzích z plantáží pěstujících šlechtěné odrůdy (viz obr. IX. v kapitole Fotografické a obrázkové přílohy: Rodokmen kávovníku).

První domestikace a výběr semen kávovníku proběhl v Jemenu v období 13–14. století. Tato semena se dostala do Indonésie (v 16. století) a následně do Střední a Jižní Ameriky, kde se pod jménem varieta *typica* nebo *arabica* pěstoval kávovník následujících 200 let. Var. *typica* je velmi homogenní a na některých místech je v nezměněné podobě pěstována dodnes (Wintgens 2012). Rostliny kávovníku byly převezeny z Jemenu také do Bourbonu (ostrov Reunion), odkud byly rozšířeny do Afriky a následně také do Střední a Jižní Ameriky. Kávovníky, které se z Jemenu dostaly touto cestou, jsou označovány var. *bourbon*. Tato varieta je vysoce plodící a více heterogenní nežli var. *typica* (Wintgens 2012).

Vzhledem k velkému počtu variet jsou v následujícím textu vyjmenovány a popsány pouze ty, které jsou pěstovány na zkoumaných plantážích.

##### **Varieta *typica***

Var. *typica* (obr. 7) je základem, ze kterého bylo vyšlechtěno mnoho odrůd (CRI 2015). Tyto odrůdy mají podobné vlastnosti: nízká až středně vysoká sklizeň, podlouhlé oválné plody, relativně malé podlouhlé listy, vysoká kvalita chuti, téměř horizontální větvení a mladé listy bronzové barvy. Var. *typica* je náchylná na všechny hlavní choroby, škůdce a hád'átka. Var. *typica* je stále pěstována mimo jiné ve Střední a Jižní Americe. V centrální Americe byly zaznamenány také zakrslé odrůdy var. *typica* a to 'Villa Lobos', 'San Ramon' a 'Pache' (Wintgens 2012).





**Obr. 7: Varieta typica – foto celé rostliny a apexu prýtu (plantáž Ave Fénix).**

### **Varieta bourbon**

Rostliny var. bourbon (obr. 8) mají o 20–30 % větší sklizeň než var. typica. Chuťová kvalita kávy je navíc srovnatelná s var. typica (CRI 2015). Var. bourbon je stále pěstována v Kolumbii, Střední Americe a západní Africe. Tato varieta má širší listy a kulatější plody než var. typica a keř se větví spíše vzhůru. Var. bourbon produkuje kávu skvělé chuti, ale je také náchylná ke všem chorobám a škůdcům. Nejvhodnější podmínky pro růst var. bourbon jsou mezi 1 000 až 2 000 m n. m. (Wintgens 2012).



**Obr. 8: Varieta bourbon – foto celé rostliny [3].**

### ‘Caturra‘

‘Caturra‘ (obr. 9) je zakrslá odrůda s krátkými internodii, která byla objevena jako hybrid odrůdy red bourbon v Brazílii v roce 1937. ‘Caturra‘ má vysoký potenciál výnosu (v dobrých podmínkách i přes 2 000 kg ha<sup>-1</sup>) a dobrou chuťovou kvalitu (CRI 2015). Tato odrůda je přizpůsobivá různým podmínkám, ale nejlepší je pro ni nadmořská výška mezi 450 až 1 700 m n. m. se srážkami 2 500 až 3 500 mm, přičemž s vyšší nadmořskou výškou roste kvalita a klesá výnos (CRI 2015). ‘Caturra‘ se zdá být dobře adaptovanou odrůdou pro podmínky Kolumbie a Kostariky, kde je základem hustých výsadeb kávovníku (5 000–10 000 rostlin na ha). Jako var. bourbon je náchylná ke všem hlavním chorobám a škůdcům kávovníku a charakteristiky plodů a listů jsou podobné jako u var. bourbon (Wintgens 2012).



Obr. 9: Var. ‘Caturra‘ – foto celé rostliny a apexu prýtu (plantáž Ave Fénix).

### ‘Catimor‘

‘Catimor‘ (obr. 10) je kříženec odrůd ‘Caturra‘ a hibrído de timor (přirozený kříženec mezi *C. arabica* a *C. canephora*) vyšlechtěný v Portugalsku v roce 1960 (Silva et al. 2006). Jedná se o odrůdu s velmi vysokým výnosem. U odrůdy ‘Catimor‘ je kvalita kávy z nížinných plantáží srovnatelná s ostatními varietami, avšak na plantážích s nadmořskou výškou nad 1 200 m n. m klesá (CRI 2015). Důležitou vlastností odrůdy ‘Catimor‘ je její rezistence vůči rzi kávové. Avšak v Indonésii, Thajsku a v Indii se však ukázaly být kávovníky odrůdy ‘Catimor‘ na tuto nemoc citlivé (Wintgens 2012). V humidních oblastech Kostariky vzrostlo onemocnění chorobou „Ojo de Gallo“ po introdukci odrůd tolerantních ke rzi kávové, jako například právě odrůdy ‘Catimor‘ (Wang et al. 1999).





**Obr. 10: Odrůda 'Catimor' – foto celé rostliny a apexu prýtu (plantáž Ave Fénix).**

### **'Catuai'**

'Catuai' (obr. 11) je zakrslá odrůda vyšlechtěná v 50. a 60. letech v Brazílii, kde nyní zaujímá 50 % plochy kávových plantáží a je hojně využívána také ve Střední Americe. Tato odrůda byla vyšlechtěna jako kříženec yellow 'Caturra' a mundo novo (hybrid odrůd

Sumatra a Red Bourbon).

Odrůda 'Catuai' je náchylná k hlavním chorobám a napadením škůdci (Wintgens 2012).

Tato odrůda je však vysoce výnosná a plody drží dobře na větvích, což je výhodné v oblastech se silnými větry a dešti. 'Catuai' vyžaduje dostatek hnojení a péče (CRI 2015).

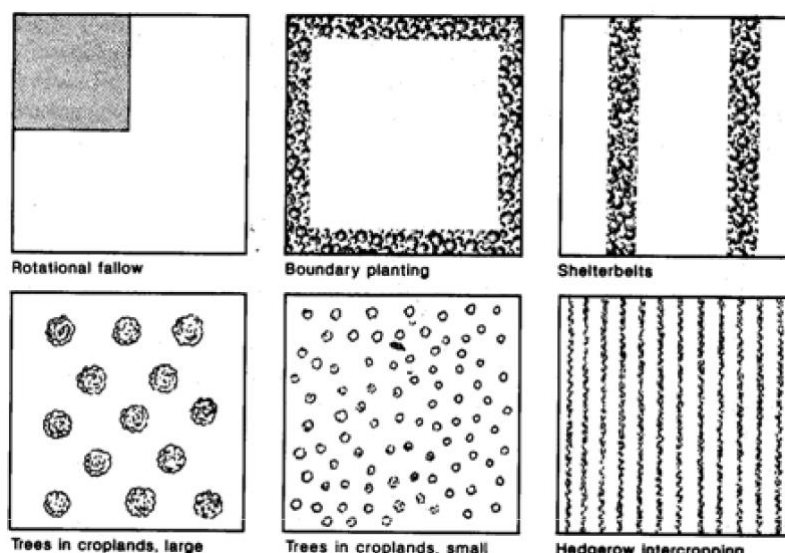


**Obr. 11: Odrůda 'Catuai' [4].**



### 4.3 Agrolesnictví

Agrolesnictví jsou systémy a technologie využití půdy, ve kterých je pěstování dřevin spojeno s pěstováním zemědělských plodin nebo chovem zemědělských zvířat v určitém prostorovém a (nebo) časovém uspořádání (Gallusser 2007). Agrolesnictví je novým pojmenováním starých praktik, protože pěstování stromů a zemědělských plodin je způsob obhospodařování půdy dříve využívaný po celém světě (Nair 1993). První zmínka o založení agrolesnického systému (pomineme-li tradiční systémy spojující stromy a zemědělské plodiny, které se pěstovaly po celém světě) pochází z konce 19. století, kdy byl na Barmě praktikován systém „taungya“. Systém byl založen na využití bezzemků a nezaměstnaných lidí k vysazení plantáže teky obrovské (*Tectona grandis* L. f.), přičemž tyto lidé mohli mezi řádky teky pěstovat svoje zemědělské plodiny. Díky zavedení tohoto systému na více místech světa se začalo s výzkumem agrolesnických systémů. V 70. letech 20. století bylo přijato agrolesnictví jako systém obhospodařování půdy, který je využitelný jak v zemědělství, tak i v lesnictví (Nair 1993). FAO v této době uznává důležitost lesnictví pro rozvoj venkova. V roce 1977 byla ustanovena Mezinárodní rada pro výzkum v agrolesnictví (International Council for Research in Agroforestry – ICRAF), čímž byly agrolesnické praktiky poprvé oficiálně uznány (Nair 1993). ICRAF vystupuje v současné době pod názvem World Agroforestry Centre a poskytuje znalosti vědeckého základu o agrolesnictví. Zároveň se snaží o implementaci těchto poznatků do politiky a o propagování postupů zlepšujících životní podmínky obyvatel i životní prostředí (Anonym). V současné době je agrolesnictví bráno jako systém využití půdy, který umožňuje současnou produkci dřeva i potravy a zároveň ochranu a obnovu ekosystémů (Nair 1993). Je třeba si uvědomit, že přirozené lesy tropických oblastí představují uzavřené systémy koloběhu živin vykazující pouze malé ztráty. Naproti tomu většina zemědělských systémů se vyznačuje otevřenými koloběhy živin s velkými ztrátami. Agrolesnické systémy leží někde uprostřed mezi zmíněnými dvěma extrémy (Nair et al. 1995). Agrolesnické systémy nalezneme jak v tropické a subtropické, tak v temperátní zóně (Nair 1993).



Obr. 12: Prostorové uspořádání stínících dřevin v agrolesnických systémech (Nair 1993).

### Klasifikace agrolesnictví dle Naira (1993)

Vzhledem k velmi široké definici agrolesnictví se do tohoto pojmu vejde mnoho různých typů obhospodařování půdy na celém světě a zejména v tropech. Pro porozumění a ohodnocení agrolesnických systémů byla vyvinuta klasifikace na základě následujících kritérií:

#### 1. Struktura

Na základě struktury porostu můžeme vylíčit dva typy klasifikace:

##### a) Dle povahy jednotlivých složek

- Agrosilviculture = zemědělsko-lesnický systém  
Zemědělské plodiny + stromy nebo keře
- Silvopastoral = pastevně-lesnický systém  
Pastva hospodářských zvířat + stromy
- Agrosilvopastoral = zemědělsko-lesnicko-pastevní systém  
Zemědělské plodiny, pastva hospodářských zvířat a stromy
- Další  
Včelařství společně s pěstováním stromů, rybníkářství spojené s pěstováním stromů apod.

##### b) Dle uspořádání jednotlivých složek

- **V prostoru:** smíšené husté (homegardens), smíšené řídké (většina pastvin se stromy), pruhové (příčměž v šířce pruhu musí

být více než jeden strom), hraniční (stromy na hranicích pozemku, živé ploty apod.) (obr. 12).

- **V čase:** coincident, concomitant, intermittent, interpolated, overlapping, separate (vysvětleno na obr.13).

## **2. Funkce**

### *a) Produkční*

- Jídlo, krmivo, palivové dříví, další dřevo, další produkty

### *b) Ochranná*

- Větrolamy, ochrana půdy, udržení vlhkosti, zlepšení vlastností půdy, zástin

## **3. Socioekonomická kritéria**

### a) Dle náročnosti technologií

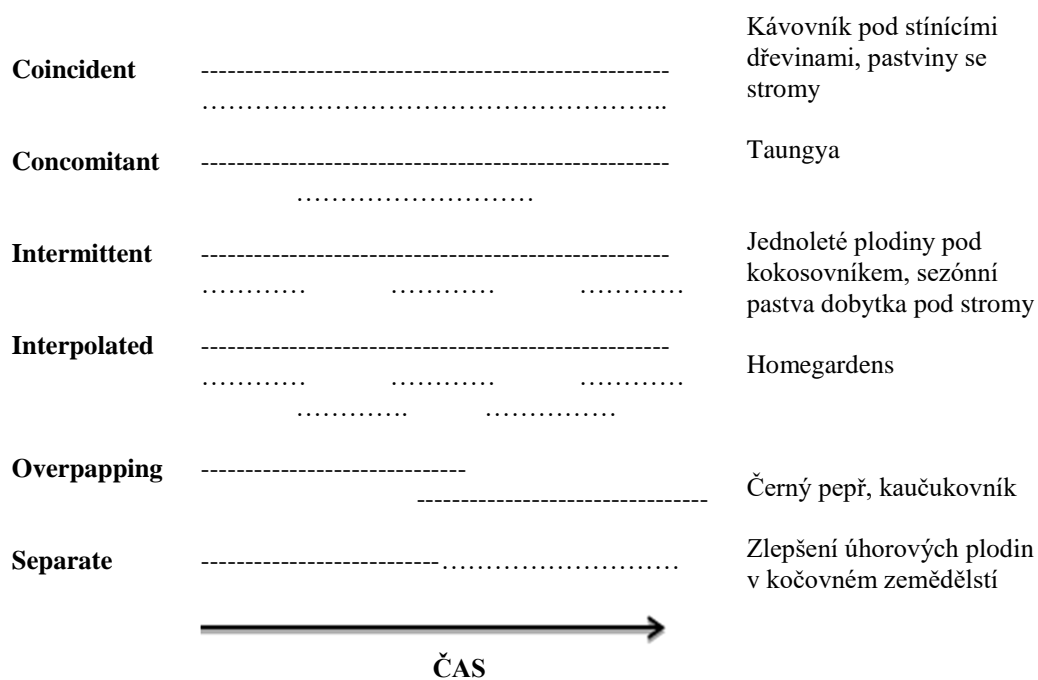
- Nízké vstupy, střední vstupy, vysoké vstupy

### b) Dle vztahu náklady/výnosy

- Komerční, přechodný, pro obživu

## **4. Ekologická kritéria**

- Nížinné tropické lesy
- Horské tropické lesy
- Nížinné subtropy
- Horské subtropy

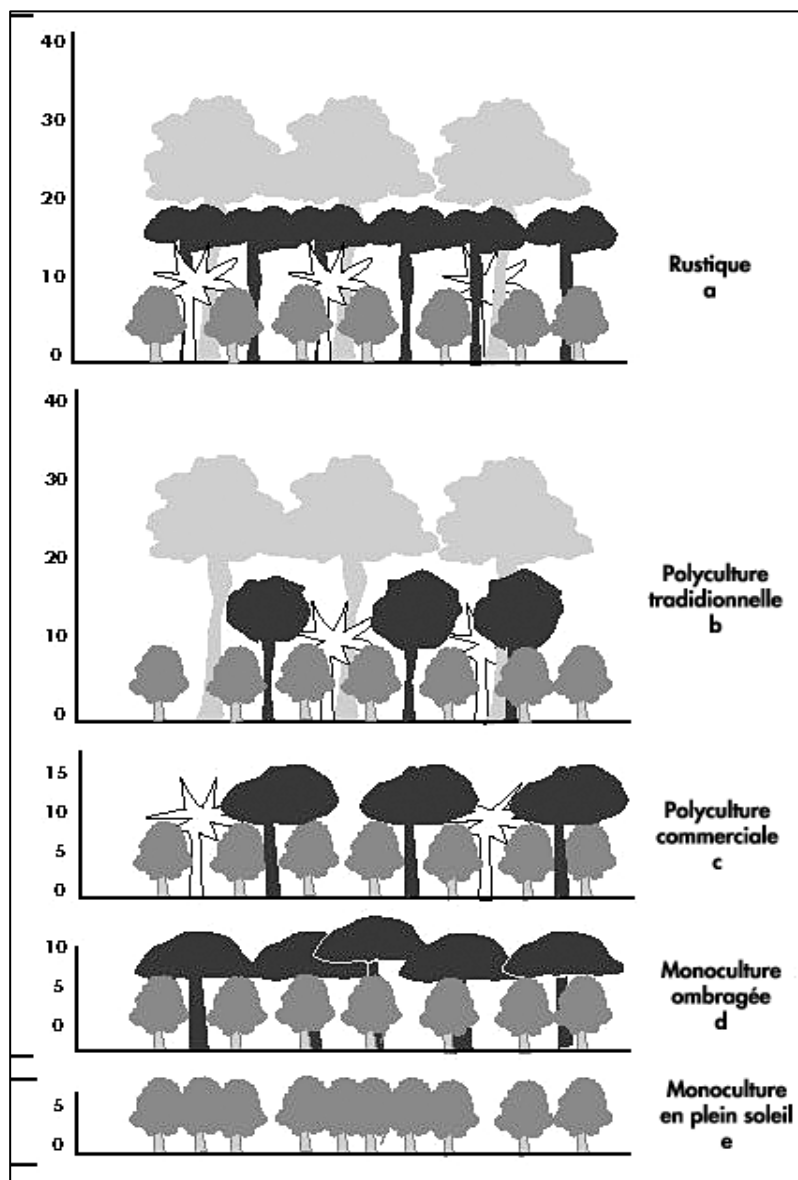


**Obr. 13:** Uspořádání jednotlivých složek agrolesnických systémů v čase (----- stromy/keře, ..... nedřevní složka systému). Měřítka času může být rozdílné pro jednotlivé kombinace. Převzato z publikace Naira (1985).

Hlavní charakteristikou agrolesnických systémů je schopnost diversifikovat produkci daného území. Stromy zajišťují mnoho funkcí jako:

- (1) Zdroj dřeva, potravy, píce, otopu, organického materiálu, léčivých a kosmetických látek, olejů a pryskyřic (Torres 2008).
- (2) Agrolesnické plantáže mohou sloužit jako útočiště lesních rostlin a živočichů, hlavně ptáků a hmyzu (Perfecto et al. 1996; Moguel a Toledo 1999), v odlesněné krajině.
- (3) Stínící dřeviny chrání místní lesy díky tomu, že slouží jako zdroj stavebního dřeva a palivového dříví místních obyvatel (Rice 2008).
- (4) Vázání uhlíku (Soto-Pinto 2010; Avila 2001; Schmith Harsh et al. 2012; Noordwijt et al. 2002).
- (5) Stromy hrají také významnou roli ve stabilizaci mikroklimatu, která je pro mnohé zemědělské plodiny v tropech velmi důležitá (Lin 2007; Siles 2010).
- (6) Další významnou mimoprodukční funkcí agrolesnictví je ochrana půdy, a to zejména udržení její plodnosti a produktivity (Nair et al. 1999; Siebert 2002). Tato schopnost je důležitá zejména v tropech, kde jsou půdy většinou chudé a méně produktivní (Nair 1993).
- (7) Dřeviny vázající dusík jsou velmi výhodné pro agrolesnictví. Jedná se zejména o dřeviny rodu *Fabaceae*, například *Inga* spp. (Brack 1999; Rhoades et al. 1998).

I když je agrolesnický způsob pěstování zemědělských plodin v mnohém výhodný a šetrný k životnímu prostředí, nelze ho brát jako řešení všech problémů (Torres 2008). Beer et al. (1998) upozorňují na konkurenci o živiny mezi pěstovanými zemědělskými plodinami a stínícími stromy, důležité je poukázat také na kompetici o vodu.



Obr. 14: Ukázka dalšího systému klasifikace agrolesnických plantáží: a) rustikální systém, b) tradiční polokulturní systém, c) komerční polokulturní systém, d) monokulturní zástin, e) monokultura bez zástínu [5].

MacDicken (1997) vyjmenovává některé odlišnosti agrolesnických systémů oproti monokulturnímu hospodaření:

- náročnost na pracovní sílu
- rozptýlenost v krajině
- stromy jsou, oproti lesním společenstvům, vysázeny řídce, aby byl zajištěn dostatečný přísun světla pro kávovník
- plantáže jsou často ve vlastnictví drobných zemědělců

#### 4.3.1 Agrolesnický a monokulturní způsob pěstování kávy

Kávovník pochází z Etiopie, kde rostl jako podrost místních lesů, tedy v zástínu (Wintgens 2012). Až do 20. století byly vysazovány převážně vysoké variety kávovníku s rozstupem 3 m, které byly pěstovány v zástínu s malými nebo žádnými prořezávkami korun. Takovéto systémy nepotřebovaly téměř žádné vstupy formou hnojiv a do dnešních dní se zachovaly například v Mexiku, v oblasti zvané Chiapas. Období po konci druhé světové války přináší velké změny v pěstování kávovníku, které byly způsobeny dvěma faktory: lepší dostupností chemických prostředků používaných v zemědělství a rychle stoupající poptávkou po kávě, zapříčiněná rostoucím počtem jejích konzumentů. Tyto faktory připravily půdu pro „intenzifikaci“ pěstování kávovníku (Wintgens 2012) a přechod na monokulturní nezastíněné plantáže.

Káva je v současné době pěstována rozdílnými způsoby od silného zastínění po plantáže bez zástínu (Siles et al. 2010). Kávovník pěstovaný agrolesnickým způsobem se vysazuje, roste a obdělává pod ochranou korun stromů (obr. 15) (Greenberg a Rice 1999). Tradiční formou agrolesnictví je výsadba kávovníku do podrostu tropického deštného lesa, ve kterém byla provedena prořezávka korun (Donald 2004). Další často používanou metodou je současné vysazení stínících dřevin s kávovníkem na holou půdu (po vypálení původního porostu).

Diskuze o vlivu zástínu na kávovník nalezneme již v prvních publikacích o tomto druhu (Lock 1888; Wintgens 2012) a i nadále je vliv zástínu na kávovník nejednoznačný (Avelino a Rivas 2013). I když probíhá mnoho diskuzí o vhodném množství zástínu (Beer et al. 1998), je stále velmi málo kvantitativně vyjádřených informací podpořených daty z terénních měření (Wintgens, 2012).

Důvodů, proč pěstovat kávu společně se stromy, tedy agrolesnickým způsobem, je mnoho a řada z nich byla již vyjmenována v předchozí kapitole. Jsou tu ale i specifické výhody agrolesnických systémů, které platí pro kávové plantáže:

- (1) Ceny kávy se řídí vývojem na světových trzích a jsou značně nestabilní. Výnos z plodů a dřeva stínících dřevin může pěstitelům pomoci v období, kdy jsou výnosy z kávy nízké. Studie Rice (2008) odhaduje, že zisk z přidružené produkce na agrolesnické kávové plantáži malých pěstitelů (2–3 ha) tvoří 28 % celkových zisků, přičemž přímo zisk z prodeje kávových zrn je zbylých 72 %.
- (2) V případě kávy, která se často pěstuje na strmých svazích, stínící dřeviny napomáhají ke snížení eroze (Boyce et al. 1994).
- (3) Káva vypěstovaná v zástinu má větší kvalitu, nežli ta, která byla vypěstována na monokulturní plantáži. Jelikož je káva oceňována dle kvality, tento fakt se promítne i v ceně prodávané zelené kávy (Greenberg a Rice 1999). Muschler (2001) testoval na kávových plantážích v Kostarice kvalitu plodů odrůd ‘Caturra‘ a ‘Catimor‘ v různém stupni zastínění. Během tohoto výzkumu zjistil, že zástin zlepšuje vzhled zelené i pražené kávy. Stejně tak kyselost a „tělo“ testované kávy bylo lépe hodnoceno u kávy vypěstované v zástinu. Zástin zlepšuje nejen chuťovou kvalitu, ale i vlastnosti kávových plodů. Stejný autor zjistil, že kávová zrna byla těžší (o 11–14 % vyšší syrová váha plodu) a větší na zastíněných plochách oproti nezastíněným a prořezávaným plochám (prořezávka koruny).
- (4) Důležité je také snížení výskytu plevelů na zastíněných plantážích (Goldberg a Kigel 1986).
- (5) V poslední době je pozornost soustředěna na globální přínos agrolesnického pěstování kávy a to na zvýšení biodiverzity (Greenberg a Rice 1999), neboť agrolesnická kávová plantáž může sloužit například jako útočiště pro tažné ptáky (Wille 1994) nebo původní druhy dřevin. V Nikaragui bylo v tradičních agrolesnických systémech pěstování kávy zaznamenáno přes 25 druhů původních druhů dřevin a v El Salvadoru dokonce 18 exotických a 119 původních druhů dřevin (Donald 2004).
- (6) Kávovník je pěstován na rozsáhlých plantážích v tropických oblastech celého světa, a pokud je pěstován v agrolesnickém systému, stromy vážou CO<sub>2</sub> a napomáhají v boji proti globálnímu oteplování. Agrolesnický způsob pěstování

plodin je tedy možnost, jak vázat jeden z plynů způsobující změnu klimatu, a napravit tak částečně škody způsobené odlesňováním a zásahy do přirozených ekosystémů (Torre 2008).

Na optimálních stanovištích může být káva pěstována bez zástinu (obr. 16), avšak s vysokými dávkami hnojiv (Beer et al. 1998). Pěstování kávy na otevřených (monokulturních) stanovištích se jeví jako výhodnější zejména z následujících důvodů:

- (1) V závislosti na přírodních podmínkách stanoviště, odstraněním zástinu a zvýšením hnojení, je možné zvýšit výnos kávovníku o 10–30 %, krátkodobě dokonce i více (Wintgens 2012). Tento závěr je však v rozporu se Soto-Pinto (2002), která uvádí, že nejvyšších výnosů lze dosáhnout při středním zastínění (50 % zástinu).
- (2) Dalším důvodem je často také přítomnost kávové rzi, která se zdá být lépe kontrolovatelná za použití chemikálií na otevřené ploše (Donald 2004, Staver et al. 2001; Matovu et al. 2013). S tímto názorem však nesouhlasí někteří autoři a to, jestli je zastoupení nemocných rostlin větší na volné nebo zastíněné ploše, není stále jasné (Eske 1982; Mariotto et al. 1974; Silva-Acuna 1994).



**Obr. 15: Agroлесnická kávová plantáž v Nikaragui.**



**Obr. 16: Intenzivně pěstovaná káva na přímém slunci, Sa Lagoa, Brazílie (Knase 2007).**

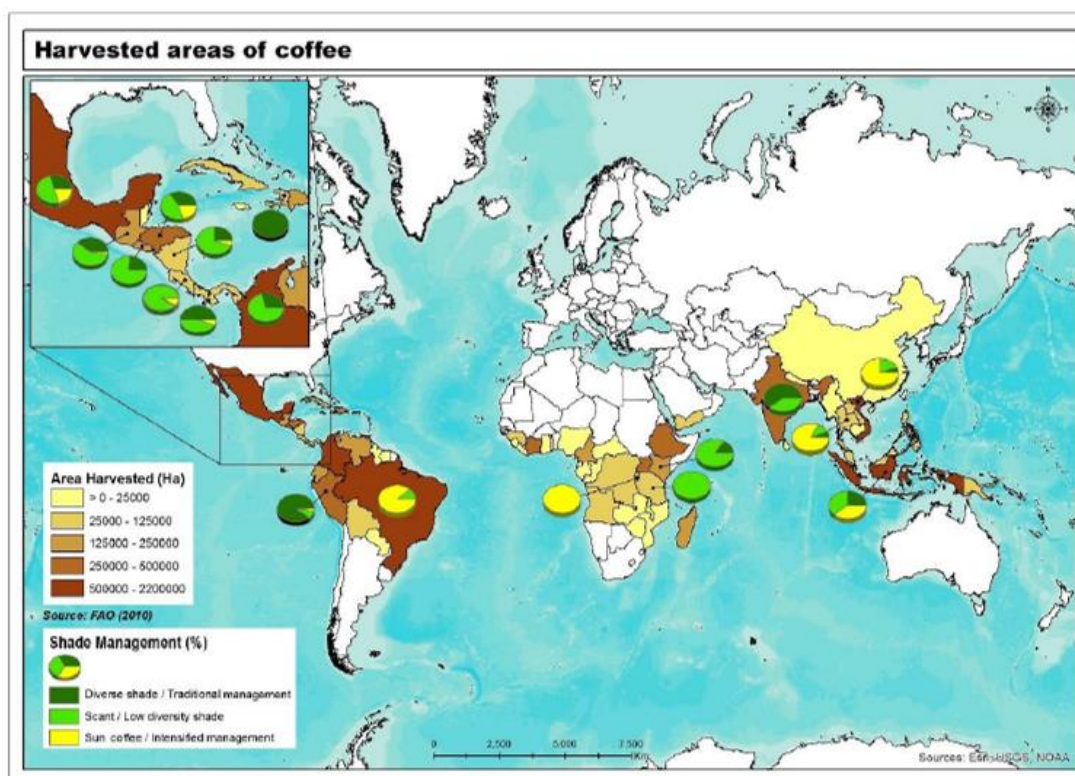
V závislosti s monokulturním pěstováním si je třeba uvědomit i negativní faktory, které jsou s ním spojené:

- (1) Zvýšení nákladů na pěstování z důvodu nutnosti nákupu hnojiv, pro uspokojení vyšších požadavků nezastíněných rostlin, a herbicidů pro kontrolu plevelů (Boyce et al. 1994).



- (2) Škody způsobené environmentálními problémy, zejména znečištěním půdy a vody (Boyce et al. 1994).
- (3) Zvýšení vodního stresu nezastíněných rostlin kávovníku (Wintgens 2012).

I přes značné výhody agrolesnictví trend posledních 20 let směřoval k monokulturním kávovým plantážím (Greenberg a Rice 1999). Odhaduje se, že v 90. letech 20. století přešlo v Mexiku, Střední Americe, Kolumbii a Karibiku přibližně 40% pěstitelů z agrolesnického pěstování kávy na monokulturní systémy (Rice a Ward 1996). V současné době jsou tradiční agrolesnické kávové plantáže pěstovány na chudých stanovištích, kde je potřeba zajistit trvalou udržitelnost produkce, dále tam, kde jsou pěstovány variety vyžadující zástin a v neposlední řadě také tam, kde pěstitelé potřebují zisky ze stínících dřevin (Donald, 2004). Na mnoha úrodných půdách je kávovník pěstován v intenzivních agrolesnických systémech, a to ve velkých blocích, kde je zástin výrazně regulován a jsou zde použity hlavně bobovité stínící dřeviny (např. *Inga* spp., *Gliricida* spp., *Arythrina* spp.). Koruny těchto dřevin jsou prořezávány, aby bylo dosaženo ideálního deštníkovitého tvaru (Greenberg et al. 1997). Obr. 17 ukazuje současný stav celosvětového zastoupení kávových plantáží pěstovaných v agrolesnickém a monokulturním systému.



Obr. 17: Podíl (%) rozložení rozdílných systémů pěstování kávy na světě v roce 2010 (FAO 2014).

### 4.3.2 Stínící dřeviny v agrolesnictví

Mnoho druhů dřevin používaných v agrolesnictví je známo i v tradičních zemědělských a lesnických systémech. Avšak tropické agrolesnické systémy zahrnují často i druhy dřevin, které se v konvenčním lesnictví a zemědělství nevyužívají. Právě tyto „neznámé“ druhy představují velký potenciál pro agrolesnictví. (Nair 1993).

V Latinské Americe nalezneme na většině agrolesnických kávových plantáží bobovité druhy stromů jako *Inga* spp., *Erythrina* spp., *Gliricidia* spp., které poskytují mulč a zástin. Tyto stromy jsou často prořezávány (až třikrát do roka), aby byl snížen výskyt onemocnění kávovníku a stimulovalo se kvetení a dozrávání plodů kávovníku. V závislosti na intenzitě prořezávky kolísá množství zástinu od nezastíněných ploch a ploch s velmi malým zástinem do 30 % až po plochy zastíněné ze 70 % (Wintgens 2012).

Termín agrolesnické dřeviny většinou odkazuje k víceúčelovým dřevinám. Důležité skupiny dřevin, které můžeme v agrolesnictví vyčlenit, jsou: ovocné stromy, dřeviny pro palivové dříví a krmné dřeviny (Nair 1993).

#### **Krmné dřeviny**

Řada tropických stromů a keřů je známých jako krmné. Tyto dřeviny jsou velmi důležité, neboť poskytují potravu domácím zvířatům i v období sucha, kdy je nedostatek travin nebo když jsou extrémně málo výživné. V poslední době jsou tyto dřeviny ve středu zájmů kvůli možnosti zlepšení silvopastorálních systémů, přičemž je důraz kladen na dřeviny vázající dusík (Nair 1993).

#### **Dřeviny pro palivové dříví**

Pod pojmem dřeviny pro palivové dříví se rozumí dřeviny, které jsou pěstovány za účelem poskytnout palivové dříví pro vaření, topení a někdy svícení (Nair 1988). Mezinárodní experimentální panel Board on Science and Technology for International Development identifikoval 1 200 rostlinných druhů jako palivové druhy a z nich 700 druhů vyčlenil jako cennější než zbylé (Nair 1993).

#### **Ovocné dřeviny**

Nair (1984) označil ovocné stromy za jednu z nejvíce nadějných skupin stínících dřevin v agrolesnictví. Ovocné stromy jsou využívány jako stínící dřeviny v mnoha agrolesnických systémech a v zahradách (homegardens) v rozvojových zemích. Ovoce z těchto stromů je často extrémně důležité ve výživě a někdy i obživě místních obyvatel

(prodej ovoce na místním trhu). Výzkum ve smíšeném agrolesnickém systému v Brazílii ukázal, že se v něm pěstovalo 32 druhů ovocných dřevin, z nichž většina byly místní druhy prakticky neznámé mimo region (Subler a Uhl 1990).

Nair (1993) doporučuje pro kávovník následující stínící dřeviny: *Bertholletia excelsa* Humb et. Bonpl., *Albizia saman* F. Muell, *Bactris gasipaes* H.B.K., *Cordia alliodora* Chahm., *Inga vera* Willd. Spp. vera, *Mimosa scabrella* Benth., *Paullinia cupana* L.

Na studovaných plantážích dominovaly stínící dřeviny náležející do následujících tří rodů:

### ***Inga* spp.**

Rod *Inga* spp. patří do čeledi Fabaceae a nalezneme jej v celé tropické části Latinské Ameriky v počtu více než 100 druhů (Weber et al. 1997). Použití druhů rodu *Inga* jako stínících dřevin v agrolesnictví (hlavně pro kávové a kakaové plantáže) má dlouhou historii a v současné době jsou tyto druhy nejoblíbenějšími stínícími dřevinami v zemích neotropické oblasti (obr. 18) (Escalante et al. 1987; Lemckert a Campos 1981; Williams 1981). Druhy rodu *Inga* fixují dusík pomocí bakterií ve svých kořenech. Dle některých studií jsou porosty s *Inga* spp. schopny navázat více než 50 kg N ha rok<sup>-1</sup>. Zároveň produkují dostatek opadu, který obohacuje půdu o organický materiál (Brack 1999).



Obr. 18: Dřeviny rodu *Inga* na plantáži Ave Fénix.

Na schopnost dřevin rodu *Inga* zlepšovat půdní vlastnosti poukazuje také Rhoades et al. (1998), který svým výzkumem dokazuje, že půdní NO<sub>3</sub><sup>-</sup> je čtyřikrát vyšší v půdě zastíněné druhy *Inga* než v půdě na pastvině bez zástinu. Zároveň i nitrifikace je čtyřikrát vyšší v části zastíněné těmito dřevinami. *Inga* spp. zvyšuje obsah uhlíku a dusíku v horních 50 mm půdy (Rhoades et al. 1998). Vysoce ceněn je druh *Inga edulis*

(Villachica 1996), který využívají farmáři v Peru jako stínící dřevinu, ale slouží také jako palivové dříví a pro produkci jedlých plodů (Lojka et al. 2005). *Inga edulis* dobře snáší kyselá půdy (Szott et al. 1991) a navíc díky pomalé dekompozici listů může být tento druh využit v boji proti erozi (Nair 1993).

### ***Pinus spp.***

Rod *Pinus* (borovice) zahrnuje přibližně 120 druhů stromů a keřů vyskytujících se na většině území severní polokoule od severní Skandinávie a Aljašky až po rovníkovou Sumatru, přičemž chybějí v Africe kromě její nejsevernější části (Burnie et al. 2003). Na studovaných plantážích jsou pěstovány dva druhy rodu *Pinus*: *Pinus oocarpa* Schiede a *Pinus tecunumanii* Eguluz et J. P. Perry. Původní rozšíření *Pinus oocarpa* je od severní části Mexika po Nikaraguu v rozpětí nadmořských výšek od 200 až 2 700 m n. m. *Pinus tecunumani* pochází z Belize, Hondurasu, Nikaragui a Mexika a je dobře adaptovaná na podmínky tropických hor. Borovice se vysazují jako stínící dřeviny zejména v temperátní zóně. Ve spojených státech je častá pastva na borovicových plantážích (silvopastorální systém), přesněji pastva krav pod borovicemi v jihovýchodní části USA a pastva ovcí pod *Pseudotsuga menziesii* Engelm. a *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson v severovýchodní části USA. Tyto systémy jsou často na východním pobřeží USA nazývány "pine-and-pasture" nebo "cattle-under-pine" a jako hlavní dřevina je zde vysazována *Pinus elliotii* Engelm. a *Pinus palustris* Mill. (Nair 1993). Podobný silvopastorální systém je praktikován také v západní Kanadě (Nair 1993) a v Austrálii (Riha and McIntyre 1999). V Indických Himalájích je pěstována v agrolesnickém systému *Pinus roxburghii* Sarg. (Dadhwal et al. 1989). Informace o pěstování kávy v zástinu dřevin rodu *Pinus* autorka v odborných článcích nenalezla.

### ***Eucalyptus spp.***

Rod blahovičnick ( *Eucalyptus* spp.) z čeledi *Myrtaceae* zahrnuje více než 350 druhů, které pocházejí z poloopadavých a suchých stálezelených lesů a savan Austrálie a Malajsie. Blahovičnický jsou pěstovány nejen na monokulturních plantážích a jako lesní dřeviny, ale také v agrolesnických systémech. Dále jsou blahovičnický používány do živých plotů kolem polí s obilovinami v Indii a Pákistánu, a také jako hlavní dřevina větrolamů (Nair 1993). Blahovičnick by však neměl být používán ve větrolamech samostatně, kvůli řídkému zavětvení spodních částí a jeho vysokým nárokům na vodu a živiny (Nair 1993).

Shaller et al. (2003) ve své studii z Kostariky zjistili, že *Eucalyptus deglupta* je vyhovující stínící dřevinou pro kávové plantáže na místech s vysokým množstvím srážek a dostupnými živinami v půdě, kde díky vysoké konkurenceschopnosti kořenového systému kávovníku nedochází k negativnímu vlivu blahovičnicku na kávovník. Tento mechanismus ale nestačí, aby na sušších místech odvrátil konkurenci mezi blahovičnickem a kávovníkem. Problémem může být také alelopatické působení blahovičnicku (Zhang a Fu 2009). Singh a Kohli (1992) studovali vliv *Eucalyptus tereticornis* Sm. na různé zemědělské plodiny (cizrna, pšenice, květák, jetel) v agrolesnickém systému a zjistili, že jejich produkce se snížila na polovinu, pokud byly pěstovány pod touto stínící dřevinou (blahovičnick byl vysazen v rozestupu 12 m).

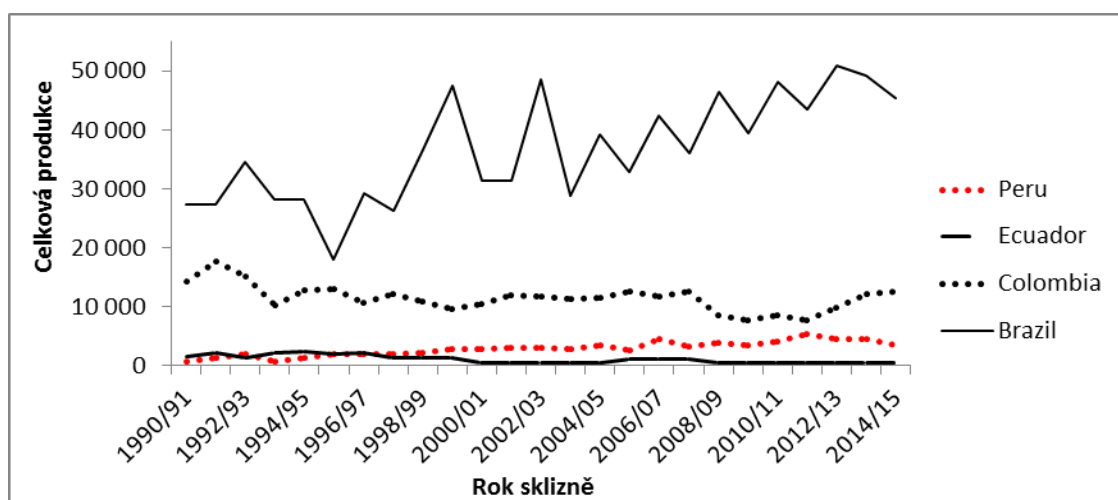
#### 4.3.3 Pěstování kávy v Peru

Kávové plantáže v Peru zaujímají dle údaje z roku 2012 rozlohu 405 850 ha (JNC 2013), přičemž většina se nachází na svazích And mezi 900 a 1 800 m n. m. V Peru je káva hlavní exportovanou zemědělskou plodinou a tato země se řadí mezi největší světové vývozce kávy (Méndez et al. 2015). Vývoj množství vyprodukované kávy v Peru v letech 1990–2015 ilustruje obr. 19. Nejvíce kávy se zpracovává v oblasti Selva Central (Centrální prales) – v údolí Chanchamayo a v okolí města Villa Rica. Na tomto území převládají velikosti pozemků 35–40 hektarů a přibližně polovina z nich se obdělává intenzivní formou v zástinu dřevin a to hlavně *Inga* spp. Naproti tomu v další oblasti zpracování kávy – Valle del Apurimac, nalezneme spíše malé plantáže (1–2 ha) rozptýlené mezi políčky ostatních zemědělských plodin jako je kakao nebo koka a mladým sekundárním lesem. V ostatních částech Peru převládají malí pěstitelé kávy. Například v Quillabamba je několik menších producentů kávy, kteří mají svoje kávové plantáže zastíněné hlavně druhy rodů *Leucaena* spp., *Erythrina* spp. a *Mimosa* spp. společně s dalšími místními druhy dřevin (Greenberg a Rice 1999).

Ze dřevin sloužících jako stínící je důležité zmínit význam rodu *Inga*, který je v Peru hojně využívaný právě na kávových plantážích (Rice 2008). Jsou to například druhy: *Inga adenophylla*, *I. edulis*, *I. spectabilis*. Mezi další stínící dřeviny používané na kávových plantážích v Peru patří: *Amburrana* spp., *Baccharis* spp., *Cedrela* spp., *Croton* spp., *Erythrina* spp., *Ficus* spp., *Leucaena* spp., *Mimosa* spp., *Nectandra* spp., *Persea americana*, *Trema* spp. (Greenberg a Rice 1999). V posledních letech se začíná pěstovat



řada introdukovaných druhů (obr. 20), které jsou schopny zastínit kávu a zároveň vyprodukovat dřevo vhodné pro zpracování na pile. Trend nahrazování tradičních bobovitých dřevin za ty s lepší produkcí dřevní hmoty byl sledován v celé Jižní a Střední Americe (Galloway a Beer 1997). V Peru se používají zejména následující introdukované druhy: *Pinus oocarpa* Schiede ex Schldtl., *Acrocarpus fraxinifolius* Arn., *Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Pinus tecunumanii* F.Schwerdtf., *Nageia rospiglosii* Pilger, *Alnus acuminata* Kunth, *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken, *Cedrela* spp., *Juglans neotropica* Diels.



Obr. 19: Celková produkce kávy v Peru a okolních státech od roků 1990/91 do 2014/15 v tisících 60 kg pytlů. Grafy vytvořeny z dat z (ICO 2015).

Skutečnost, že agrolesnické systémy mohou poskytnout útočiště některým organismům z mizejícího původního tropického lesa, je velmi důležitá vzhledem k rychle postupujícímu odlesňování Amazonské nížiny. Mezi roky 1985 až 1990 byl v Peru sledován úbytek lesních ekosystémů na ploše 1 879 km<sup>2</sup> (Stephen 2005) (tzn. 376 km<sup>2</sup> rok<sup>-1</sup>). Olivera et al. (2007) sledovali odlesňování v Peruánské Amazonii mezi roky 1999 až 2005 a uvádí rychlost odlesňování mezi 632 a 645 km<sup>2</sup> za jeden rok.

Ceny kávy na světových trzích jsou značně nestálé (ICO 2014), což způsobuje socio-ekonomické problémy mnohým lokálním pěstitelům (Daviron a Ponte 2005; ICO 2003). Přibližně 63 % peruánských kávových plantáží je vlastněno malými vlastníky od 2 do 3 ha, kteří bývají nejvíce ovlivněni nestabilitou cen kávy. Hlavní faktory, které způsobily dramatické změny cen kávy v posledních letech, byly: mrazové teploty v Brazílii v oblastech pěstování kávy v roce 1994, klesající zásoby kávy v roce 1997

(Wintgens 2012) a stoupající množství kávy na trhu v roce 2012. Je nutné zmínit také souvislost mezi stoupajícími cenami kávy a odlesněním (O'Brien a Kinnaird 2003), kdy je v období vysokých cen kávy často kácen původní deštný les z důvodu zakládání nových kávových plantáží. Bylo dokázáno, že v Mexiku stoupající ceny kávy v letech 1970 a 1980 vedly k nárůstu jak plochy, na které je kávovník pěstován, tak výnosů na plochu (Nestel 1995).

Jak bylo uvedeno dříve, prodej dřeva z agrolesnických plantáží může sloužit jako další příjem, který pěstitelé kávy použijí v období nízkých výkupních cen. Rice (2008) na základě dotazníkového šetření u malých pěstitelů kávy v Peru zjistil, že  $28,5 \pm 1,87 \%$  z celkových příjmů kávových plantáží tvoří příjmy ze stínících dřevin. V Guatemale se příjmy ze stínících dřevin podílí na  $18,77 \pm 2,08 \%$  z celkových příjmů pěstitelů.



**Obr. 20: Kávová plantáž zastíněná *Inga* spp. a *Pinus* spp., Villa Rica, Peru.**

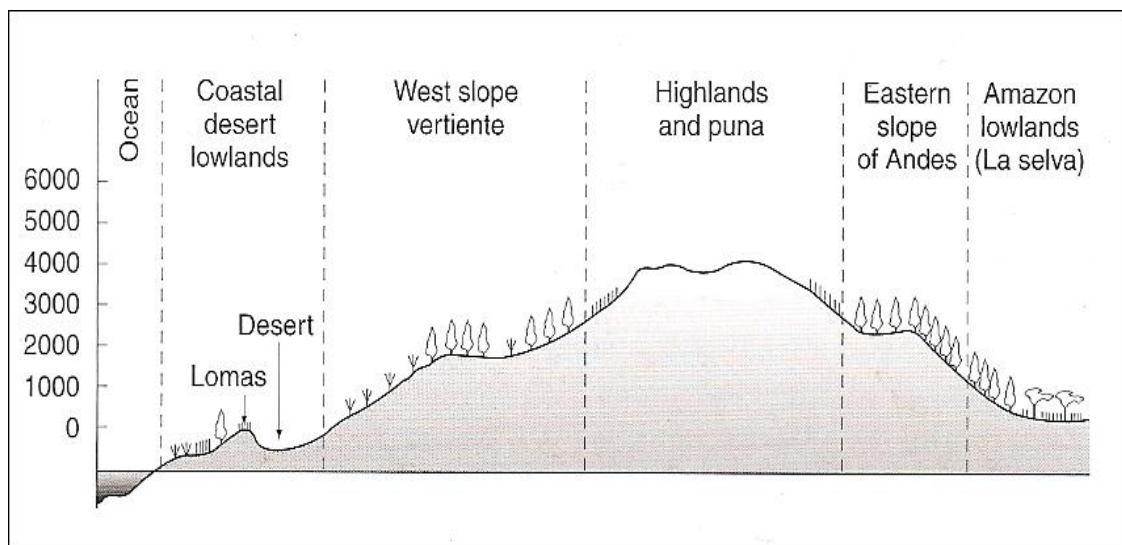
## 5 Metodika práce

### 5.1 Širší územní vztahy

#### 5.1.1 Peru

Peru se nachází na jihoamerickém kontinentu mezi rovníkem a 18°20' jižní šířky a 69° a 82° západní délky a má rozlohu 1 098 581 km<sup>2</sup>. Celé území je rozděleno na tři zeměpisné celky: Pacifické pobřežní pásmo (Costa), Andské pohoří (Sierra) a nížina na východě pokrytá z velké části původními deštnými lesy (Selva). Nejvyšší horou Peru je Huascarán (6 768 m) ležící v Cordillera Blanca. Pacifické pobřežní pásmo se táhne v délce 2 300 km a tvoří jej převážně pouště. Naopak na východě se za Andským pohořím nachází rozlehlá nížina Amazonské pánve s tropickým deštným lesem. Severně od města Iquitos se stékají dva největší přítoky řeky Amazonky – Río Marañón a Río Ucayalli (Waterkamp et al. 2005).

Andy vytvářejí klimatický předěl mezi suchým pacifickým pobřežním pásmem a tropickou Amazonskou nížinou (viz obr. 21) (Waterkamp et al. 2005). Brack (2012) vylíčil následujících 13 ekoregionů Peru (ze západu na východ): 1. studené moře Humboltova proudu; 2. tropické moře; 3. pacifická poušť; 4. suchý rovníkový les; 5. pacifický tropický les; 6. stepní vrchovina; 7. puna a vysokohorské Andy; 8. El páramo; 9. horský deštný les; 10. nížinný tropický deštný les a 11. palmové porosty v departamentu Madre de Dios.



Obr. 21: Reliéf Peru ve směru východ–západ (Pearson a Beletsky 2008). Vysvětlivky: Costal desert lowlands – pobřežní pouštní nížina, West slope vertiente – západní svahy, Highlands and puna – vysokohorská část a puna, Eastern slope of Andesa – východní svahy And, Amazon lowlands – Amazonská pánve.



### 5.1.2 Poloha studovaných plantáží

Stát	Peru
Region	Pasco
Provincie	Oxapampa
Distrito	Villa Rica
Ekoregion	horský deštný les

#### **Provincie Oxapampa**

Tato provincie je největší provincií z regionu Pasco a zabírá území mlžného i nížinného deštného lesa. Hlavním zdrojem příjmu je pěstování kávy, manioku, banánů a ananasu. Většina osad se nalézá kolem řek, které byly až do nedávné doby jedinými přístupovými cestami (Ponce et al. 2008).

#### **Distrito Villa Rica**

V distriktu Villa Rica nalezneme kopcovitý terén s nadmořskou výškou od 750 m n. m. do 2 068 m n. m. Dle FAO jsou zde půdy klasifikovány jako kambisoly.

V distriktu Villa Rica panuje klima vlastní tropickému horskému deštnému lesu s několikaměsíčním obdobím sucha. Průměrné srážky jsou 1 590 mm rok<sup>-1</sup> a průměrná roční teplota je 17,8 °C (Ponce et al. 2008). Průměrná roční relativní vlhkost vzduchu činí 89 %. Období dešťů začíná obvykle v listopadu a trvá do března, naopak období sucha se dá očekávat od července do srpna (Hamling a Salick 2003). Období dešťů bývá provázeno půdními sesuvy a záplavami (časté je usazení velkých naplavenin nesených z odlesněných kopců). Existují zde místa, která jsou téměř stále v mlžném oparu. V lesích přesahuje výška stromů 30 m a většina z nich je hustě pokryta epifyty. Nejdůležitějšími řekami jsou Pichis, Palcazú a Entaz. Do jmenovaných řek ústí mnoho menších potoků a říček (Ponce et al. 2008). Hlavní ekonomickou aktivitou v distriktu je zemědělství, zejména pěstování kávy. Jeho krajina se dá charakterizovat jako mozaika agrolesnických kávových plantáží a pastvin. Distrikt Villa Rica je, co se týče produkce kávy, jedním z nejdůležitějších v Peru.

### 5.1.3 Studované plantáže

Celkem byly studovány 4 kávové plantáže pěstované agrolesnickým způsobem (tab. 2). Samotný výzkum započal v říjnu roku 2010 na plantáži Ave Fénix. V roce 2011 byl výzkum rozšířen o dvě plantáže, a to Santa Rosa a Gabriela. Bohužel v červnu roku 2013 byla, při výjezdu do Peru, plantáž Gabriela nalezena již bez kávovníku (majitelé se rozhodli k přechodu na samostatnou výsadbu dřevin). Z tohoto důvodu byl výzkum na plantáži Carillo přerušen a nahrazen výzkumem na plantáži La Torre, kde dominovala stejná stínící dřevina jako na plantáži Gabriela.

Tab. 2. Poloha studovaných plantáží

Plantáž	Ave Fénix 1	Ave Fénix 2	Santa Rosa	Carillo (Gabriela)	La Torre
Zkratka plantáže	AF1	AF2	SR	G	T
X (UTM)	475784	475784	471531	471882	469052
Y (UTM)	8808864	8808864	8809929	8816212	8811679
Plocha (ha)	7,4	1,0	4,0	1,0	0,85
Nadmořská výška (m n. m.)	1 550	1 550	1 540	1 660	1 530
Dominantní dřevina	<i>Inga</i> spp.	nehodnoceno	<i>Pinus</i> spp.	<i>Eucalyptus</i> spp.	<i>Eucalyptus</i> spp.
Věk dřevin	15	nehodnoceno	15	7	11

### Ave Fénix

Ave Fénix je největší, nejčlenitější a zároveň nejdéle studovanou plantáží v rámci této disertační práce (obr. 22). Plantáž je vlastněna rodinou Marín a před založením agrolesnické kávové plantáže zde byly pastviny. Tato plantáž se nachází ve vesnici Alto Palomar, která leží na hranici regionu Junín a Pasco, ale stále je pro ni spádovým městem Villa Rica. Plantáž Ave Fénix je certifikována jako „Café organico“, takže prodává kávu v bio kvalitě. Je také členem „Cooperativa Alto Palomar“, což je družstvo pěstitelů kávy zapojené do certifikace Fair Trade. Na plantáži Ave Fénix se pěstují tyto odrůdy kávovníku: ‘Catimor’, ‘Caturra’ a ‘Pache’.

Dominantní stínící dřevinou je zde *Inga* spp. (*Inga adenophylla* Pittier, *I. densiflora* Benth., *I. edulis* C. Marius, *I. feuillei* DC., *I. velutina* Willdenow), doplněna dalšími druhy: *Acrocarpus fraxinifolius* Arn., *Albizia* sp., *Aniba muca* Mez, *Boehmeria* sp., *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Calycophyllum sprucean* (Benth.) K.Schum.,

*Cariniana decandra* Casar, *Cecropia* sp., *Cedrela odorata* L., *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken, *Croton draconoides* Müll.Arg., *Cupressus* sp., *Erythrina edulis* Triana ex Micheli, *Eucalyptus saligna* Sm., *Euphorbia heterophylla* L., *Ficus* sp., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Juglans neotropica* Diels, *Lantana camara* L., *Miconia dipsacea* Naudin, *Miconia* sp., *Nectandra longifolia* Nees, *Ocotea cernua* Aubl., *Ocotea* sp., *Persea americana* Miller, *Pinus radiata* D.Don, *Pinus tecunumanii* Eguiluz & J.P.Perry, *Pouteria caimito* Radlk., *Prunus serotina* Ehrh, *Retrophyllum rospigliosii* Pilg. C.N.Page, *Syzygium jambos* L., *Tabebuia secratifolia* (Vahl) Nichols., *Virola* sp. Mnoho z těchto druhů je využíváno jako léčivé.

Na části plantáže Ave Fénix byly vykáceny stínící dřeviny. Tato část plantáže byla ponechána bez zástinu až do roku 2014. Z tohoto důvodu byla v měřeních vyčleněna a studována zvláště jako nezastíněná (Ave Fénix 2) část plantáže. Zastíněná část plantáže je nazývána Ave Fénix 1.



Obr. 22: Plantáž Ave Fénix zastíněná část. Na fotografii je majitel plantáže a jeho snacha.

## Santa Rosa

Plantáž Santa Rosa je druhou nejstarší z měřených plantáží a je vlastněna paní Selenou Contreras (obr. 23). Také na této plantáži byly původně pastviny a následně zde byla vysázena káva společně se stínícími dřevinami. Plantáž Santa Rosa není v žádném družstvu pěstitelů, ale prodává kávu přímo pod svojí značkou. Celá plantáž vlastněná paní Contreras má rozlohu přes 8 ha, ale v této práci byla měřena pouze část zastíněná borovicemi (3,9 ha). Na plantáži Santa Rosa nalezneme následující odrůdy kávovníku: ‘Catimor’, ‘Caturra’ a ‘Pache’. Dominantními druhy dřevin na této plantáži jsou druhy rodu *Pinus* spp. (*Pinus oocarpa*, *P. tecunumanii*). Dalšími nejvíce zastoupenými druhy jsou: *Acrocarpus fraxinifolius*, *Eucalyptus* spp., *Inga* spp., *Pinus* spp. a *Retrophyllum rospigliosii*.



Obr. 23: Plantáž Santa Rosa.

### Carrillo (Gabriela)

Plantáž Carrillo (v článku Carbon Stocks in Agroforestry Coffee Plantations with Different Shade Trees in Villa Rica, Peru nazývána Gabriela) je nejmenší a nejmladší ze studovaných plantáží (obr. 24). Ke studiu byla vybrána z toho důvodu, že je jednou z mála kávových plantáží stíněných blahovičnickem v distritu Villa Rica. Pěstování kávy pod blahovičnickou bylo zahájeno teprve před nedávnou dobou a mnoho pěstitelů o této možnosti teprve uvažuje nebo s blahovičnickou začíná. Na plantáži Carrillo se pěstují tyto odrůdy kávovníku: ‘Catimor‘ a ‘Caturra‘.

*Eucalyptus* spp. je dominantní dřevinou na plantáži Carrillo a mezi další dřeviny vyskytující se zde patří: *Acrocarpus fraxinifolius*, *Inga* spp., *Pinus* spp. a *Retrophyllum rospigliosii*.

Nejproblematictější dřevinou této plantáže byl druh *Acrocarpus fraxinifolius*, u kterého byl



Obr. 24: Plantáž Carrillo během měření se studenty MENDELU v roce 2013.



terminál přibližně v sedmém roce věku napaden škůdcem, odumřel a následně uhynul také celý strom. Na plantáži se při měření vyskytovalo již jen několik živých exemplářů tohoto druhu.

## **La Torre**

Plantáž La Torre byla do výzkumu zařazena v roce 2012 z důvodu, že se na plantáži Carillo začaly objevovat indicie, že dojde k jejímu zrušení. Plantáž La Torre nese jméno rodiny vlastníka, a jedná se o plantáž s dominancí blahovičnicku ve věku blízkém obmýtí (obr. 25). Na plantáži La Torre se nachází var. *typica* a následující odrůdy kávovníku: ‘Catimor’, ‘Caturra’, ‘Pache’.

Jak bylo uvedeno, na plantáži La Torre dominuje *Eucalyptus* spp. a z dalších druhů se zde vyskytuje: *Schizolobium amazonicum* Huber, *Calycophyllum spruceanum* (Ben.) Hook F. a *Swietenia macrophylla* G.King. Tyto druhy jsou však výrazně mladší než blahovičnick, který tvoří hlavní strukturu porostu.



**Obr. 25: Plantáž La Torre.**

## 5.2 Sběr dat v terénu

Sběr dat v terénu proběhl v několika opakováních. První sběr dat byl uskutečněn v roce 2010 během autorčiny stáže ve firmě MapGeosolution, která výjezd včetně výdajů na měření financovala. V této době byly zaměřeny pozice všechny stromů (s DBH > 100 mm) a zaznamenány jejich atributy pomocí technologie Field Map. Před návratem do ČR byla instalována také čidla na měření mikroklímatu. Následující rok byl autorce přidělen grant IGA (29/2011), díky kterému mohla pokračovat v měření na plantážích, a v této době byla měřena nemocnost kávovníku na plantážích Ave Fénix, Santa Rosa a Carillo. Od roku 2012 probíhal projekt POPRAR (CZ.1.07/2.2.00/28.0303), který hradil cesty nejen autorky, ale také studentů a pracovníků MENDELU do Peru. Díky tomuto projektu mohla mezi lety 2012 a 2014 proběhnout další měření v rámci studentských praxí pod dohledem autorky. V roce 2014 byla na plantážích v rámci studentské stáže také paní Bc. Zuzana Šeptunová, která provedla měření pro svoji diplomovou práci. Tato měření byla použita pro stanovení alometrických rovnic využitých v posledním článku (Shade tree timber as a source of income diversification in agroforestry coffee plantations).



Obr. 26: Autorka práce se studenty MENDELU, s majitelkou plantáže Ave Fénix a jejím synem po ukončení odběru pedologických vzorků.

## 6 Požitá literatura

- ALAVALAPATI, J.R.R., NAIR, P.K., 2001. Socioeconomic and institutional perspectives of agroforestry. 71–81 In: Palo, M., Uusivuori, J., (eds). World Forests, Society, and Environment – Markets and Policies. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- ALEGRE, C., 1959. Climates et cafeiers d'Arabie. Agron. Tropical, 14:23–58.
- ANONYM, World Agroforestry center [online] citováno 10.10.2016. Dostupné na World Wide Web: <http://www.worldagroforestry.org/>
- ARNESON, P.A., 2000. Coffee rust. The Plant Health Instructor. [online] citováno 10.listopadu 2015. Dostupné na World Wide Web: [http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/basidiomycetes/pages/coffee\\_rust.aspx](http://www.apsnet.org/edcenter/intropp/lessons/fungi/basidiomycetes/pages/coffee_rust.aspx))
- AVELINO J, Rivas G (2013) La roya anaranjada del cafeto, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>, 47 p.
- AVILA, G. et al., 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. Agroforestría en las Americas, 8:32–35.
- BARRADAS, V.L., FANJUL, L., 1984. La importancia de la cobertura arbórea en la temperatura del agroecosistema cafetalero. Biótica. 9(4), 415–421.
- BEER, J., MUSCHLER, R., KASS, D., SOMARRIBA, E., 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. Agroforestry Systems, 38: 139–164.
- BOYCE, J. K., FERNANDEZ, A.G., FÜRST, A., SEGURA, O., 1994. Café y Desarrollo Sostenible: Del Cultivo Agroquímico a la Producción Orgánica en Costa Rica. EFUNA, Heredia, Costa Rica In BEER, J., MUSCHLER, R., KASS, D., SOMARRIBA, E., 1998. Shade management in coffee and cacao plantations, Agroforestry Systems, 38: 139–164.
- BRACK A, 1999. Diccionario enciclopedia de plantas útiles del Perú. CBC—Centro de estudios regionales andino “Bartolome de las casa”, Cusco.
- BRACK, A.E., 2012. Ecología del Perú. Bruno. 496 s.
- BURNIE, G. et al. 2003, Botanika. Random House Australia, 1020 s.
- CAMARGO, A.P., 1985. O clima e a cafeicultura no Brasil. Inf. Agropec., 11:13–26 In DAMATTA, F.M., 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. Field Crops Research, 86: 99–114.

- CAMPANHA, M.M., HENRIQUE, R., SANTOS, S. et al. 2004 Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais , Brazil. *Agroforestry Systems* 63: 75–82.
- CRI (Coffee research institute), 2015. [online] citováno 25.srpna 2015. Dostupné na World Wide Web: <http://www.coffeeresearch.org/coffee/varietals.htm>
- COSTE, R., 1992. *Coffee: The Plant and the Product*. MacMillan, 328 s.
- DADHWAL, K.S., NARAIN, P., DHYANI, S.K., 1989. Agroforestry systems in the Garhwal Himalayas of India. *Agroforestry Systems*, 7: 213–225.
- DAVIRON, B., PONTE, S., 2005. *The coffee paradox: Commodity trade and the elusive promise of development*. London: Zed Books, 295 s.
- DONALD, P.F., 2004. Conservation, I. Biodiversity Impacts of Some Agricultural. 18: 17–37.
- ESCALANTE, F.E.E., AGUILAR, R.A., LUGO, P.R., 1987. Identificación, evaluación y distribución espacial de especies utilizadas como somára en sistemas tradicionales de café. *Venezuela forestall*, 3(11): 50–62.
- ESKES, A.B., 1982. The effect of light intensity on incomplete resistance of coffee to *Hemileia vastatrix*. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 88: 191–202
- FERNANDEZ, S. 2001. *Deforestation, Coffee Cultivation and Land Degradation: The Challenge of Developing a Sustainable Land Management Strategy in Brazil's Mata Atlántica Rainforest*. Thesis, Lund University Master's Programme in Environmental Science
- GALLOWAY, G., BEER, J., 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central. Serie Técnica. Informe Técnico No. 285. CATIE. Turrialba. Costa Rica. 168 s.
- GALLUSSER, J., 2007. Estudios comparativos sobre sistemas integrados de producción y sistemas agroforestales en el departamento San Martín. Capirona-Volens IN
- TORRES, J., 2008. *Agroforestría: una estrategia al cambio climático, Soluciones prácticas*, 124 s.
- GARRETT, H.E., RIETVELD, W.J., FISHER R.F., 2000. *North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 402 s.
- GOLDBERG, A.D., KIGEL, J., 1986. Dynamics of the weed community in coffee plantations grown under shade trees: Effect of clearing. *Israel Journal of Botany*, 35:121–131.



- GREENBERG, R., RICE, R.A., 1999. Manual de café bajo sombra y biodiversidad en el Perú. Centro de Aves Migratorias Smitsonian Institution, 52 s.
- GREENBERG, R., BICHER, P., CRUZ, A., RE-ITSMA, R., 1997. Bird populations in shade and sun coffee plantations in central Guatemala. *Conservation Biology*, 11: 448–459.
- HAARER, A.E., 1958. Modern Coffee Production. Leonard Hill, London In DaMatta, Fábio M (2004) Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research*, 86: 99–114
- HAMLING, C.H., SALICK, J., 2003. Yanasha Agriculture in the Upper Peruvian Amazon: Persistence and Change Fifteen Years Down. *Economic Botany*, 57: 163
- An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* 180.
- ICO (International Coffee Organization). 2003. Impact of the coffee crisis on poverty in producing countries. London: ICO. INIDE (Instituto Nacional de Información de Desarrollo). [online] citováno 11.ledna 2016. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ico.org/documents/icc89-5r1e.pdf>
- ICO (International Coffee Organization). 2014. The international coffee organization 1963 – 2013:50 years serving the world coffee community. [online] citováno 16.června 2015. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ico.org/documents/cy2012-13/history-ico-50-years-e.pdf>
- ICO (International Coffee Organization) 2015. Historical Data on the Global Coffee Trade. [online] citováno 30.června 2015. Dostupné na World Wide Web: [http://www.ico.org/new\\_historical.asp?section=Statistics](http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics) citováno: 30.6.2015, 14:00
- IPCC (2013) Climate change 2013. The Physical science basis. Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. 27 s.
- [JNC 2013] Junta Nacional del Café (Peruvian National Board of Coffee), 2013. Citováno 12. ledna 2016. Dostupné na World Wide Web: [http://juntadelcafe.org.pe/sites/default/files/produccion\\_de\\_cafe\\_entre\\_los\\_anos\\_1999\\_y\\_2012.pdf](http://juntadelcafe.org.pe/sites/default/files/produccion_de_cafe_entre_los_anos_1999_y_2012.pdf)
- [JNC 2014] Junta Nacional del Café (Peruvian National Board of Coffee). 2014. Plan Nacional de Renovación de Cafetales.
- JIMÉNEZ-AVILA, E., MARTINEZ, V.P., 1979. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero II. Producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. *Biótica*. 4, 109–126

- KUSHALAPPA, A.C., 1989. Advances in coffee rust research. *Annual Reviews of Phytopathology*, 27: 503–531.
- LEFF, B., RAMANKUTTY, N., FOLEY, J.A. 2004. Geographic distribution of major crops across the world. *Global Biochem Cycles* 18: 1–27.
- LEMCKERT, A., CAMPOS, J.J., 1981. Producción y consumo de café en las fincas pequeñas de Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico 16. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 69 s.
- LEWIN, B., GIOVANNUCCI, D., VARANGIS, P. 2004. Coffee markets new paradigms in global supply and demand. *Agriculture and Rural Development Discussion*, paper 3, The World Bank.
- LIN, B.B., 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 144: 85–94.
- LOCK, C.G.W., 1888. *Coffee: Its Culture and Commerce*. Spon, London 1888, 264 s.
- LOJKA, B., PREININGER D., LOJKOVA J., BANOUT J., POLESNY Z. 2005. Biomass growth and farmer knowledge of *Inga edulis* in Peruvian Amazon. *Agricultura tropica et subtropica*. 38: 44–51.
- MACDICKEN, K.G.A., 1997. *Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*. Forest Carbon Monitoring Program, Winrock International Institute for Agricultural Development, 87 s.
- MAESTRI M, BARROS RS, 1977. Coffee. In: AlvimPT, KoslowskiTT, eds. *Ecophysiology of Tropical Crops*. New York, NY: Academic Press, 249–78.
- MAESTRI, M., BARROS, R.S., RENA, A.B., 2001. Coffee. In: LAST, F.T. (Ed.), *Tree Crop Ecosystems*. Elsevier, Amsterdam, 339–360.
- MARIOTTO, P. R., GERALDO. C. Jr, Silveira, A. P. De, Arruda, H. V De, Figueredo, P., BRAGA, J. B. R. Efeito da produção sobre a incidência da ferrugem do café. In: 2nd Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. IBC, Brasil, 1974, 144.
- MATOVU, R. J. et al. 2013. Ecological factors influencing incidence and severity of Coffee Leaf Rust and Coffee Berry Disease in major Arabica coffee growing districts of Uganda. 14, 87–100.
- MEDINA, C., CALERO, C., HIMEL, H., VIVAS, E., 2009. Cuantificación de carbono en la biomasa aérea de café (*Coffea arábica* L.) con sombra, en la Comarca palo de sombrero, Jinotega, Nicaragua. *Bosque y ecosistemas*, 9(12): 28–34.

- MÉNDEZ, J.M., PANTIGOSO, P., PAREDES, J., BELLINA, J. C., 2015. Guía de Negocios e Inversión en el Perú 2014–2015. [online] citováno 20. března 2016. Dostupné na World Wide Web: [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-Peru-guia-de-negocios-e-inversion-14-15/\\$FILE/Guia-de-Negocios-e-Inversion-en-el-Peru-2014-2015.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-Peru-guia-de-negocios-e-inversion-14-15/$FILE/Guia-de-Negocios-e-Inversion-en-el-Peru-2014-2015.pdf)
- MOGUEL P, Toledo VM (1999) Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation biology* 13: 11–21
- MORAIS, H., CARAMORI, P.H., MARIA, A., RIBEIRO, D. A., GOMES, J.C., 2006. Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 41(5):763–770.
- MUSCHLER, R. G., 2001. Shade improves coffee quality in a suboptimal coffee-zone of Costa Rica. *Agroforestry Systems*, 85: 131–139.
- NAIR, P.K.P., 1984. Fruit trees in agroforestry. Working paper. Environment and Polisy Institute. East-West Center, Honolulu In Nair P.K.R. 1993 *Agroforestry and firewood production*. In Hall D.Od and Ovreind, R.p.(eds.), *Biomass*, 367–386. John Wiley, London.
- NAIR, P.K.R. 1985a. Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 3: 97–128.
- NAIR, P.K.R., 1993 *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer academic publishers. 499 s.
- NAIR, P., K., R., KANG, B., T., KASS, D., B., L., 1995. Nutrient cycling and soil-erosion control *Agriculture and Environment: Bridging Food Production in Developing Countries*, ASA special publication no. 60, American Society of Agronomy, Madison, WI, Ch. 7.
- NAIR, P., K., R. et al., 1999. Nutrient Cycling in Tropical Agroforestry Systems: Myths and Science. s. 1–31 In Edwards A.C. (Edit.), *Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems*. CRC Press, 416 s.
- NAIR, P.K.R.. 2001. *Agroforestry in Our Fragile World: Challenges and Opportunities for Sustainable Development*, Forerunner to *The Encyclopedia of Life Support Systems*, Chapter 1.25: 375–393. UNESCO, Paris, France & EOLSS, UK
- NESTEL, D., 1995. Coffee in Mexico: interna-tional market, agricultural landscape and ecology. *Ecological Economics*, 15: 165–178.
- NOORDWIJK, M., RAHAYU, S., HAIRIAH, K., WULAN, Y.C., FARIDA, A.,

- VERBIST, B., 2002. Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China*, 45: 75–86.
- NOWAK, B., 2002. Tropické plody, biologie, využití, pěstování, sklizeň. Knižní klub, 239 s.
- O'BRIEN, T. G., KINNAIRD, M. F., 2003. Caffeine and conservation. *Science*, 300(5619): 587.
- OLIVEIRA, P.J.C. et al., 2007. Land-Use Allocation Protects the Peruvian Amazon. *Science*, 317: 1233-1236.
- NUTMAN, F.J., ROBERTS, F.M., Y BOCK, K.R., 1960. Methods of uredospore dispersal of the coffee leaf rust fungus, *Hemileia vastatrix*. *Transactions of the British Mycological Society*, 43(3): 509–515.
- PEARSON, D., L., BELETSKY, L., 2008. Traverels wildlife guides – Peru.
- PERFECTO, I., RICE, R.A., GREENBERGR, R., VAN DER VOORT, M.E., 1996. Shade Coffee: Disappearing Refuge for Biodiversity. *Bioscience* 46: 596–608.
- PONCE, M.G. et al., 2008. Plan de Desarrollo Concentrado de Villa Rica 2009–2018. Municipalisas distrital de Villa Rica. provincia Oxapampa – Región Pasco
- PRAKASH, N. S., MARQUES, D. V., VARZEA, V. M. P., SILVA. M. C., COMBES, M. C., LASHERMES, P., 2004. Introgression molecular analysis of a leaf rust resistance gen from *Coffea liberica* into *C. arabica* L. *Theor. Appl. Genet.* 109, 1311–7.
- RAYNER, R.W., 1961. Germination and penetration studies on coffee leaf rust (*Hemileia vastarix* B. and Br.) *Ann appl. Biol.*, 49: 497–505.
- RHOADES, C.C. et al. 1998. Effect of Pasture Trees on Soil Nitrogen and Organic Matter: Implications for Tropical Montane Forest Restoration. *The journal of the society for ecological restoration*, 6(3): 267–270.
- RICE, R.A., WARD, J., 1996. Coffee, conservation and commerce in the western hemisphere. The Smithsonian Migratory Bird Center and the Natural Resources Defense Council. Washington DC, 40 s.
- RICE, R.A., 2008. Agricultural intensification within agroforestry: The case of coffee and wood products. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 128, 212–218.
- RICE, R.A., WARD, J., 2008. Agricultural intensification within agroforestry: The case of coffee and wood products. *Agriculture. Ecosystems and Environment*, 128: 212–218.

- RIHA, S.J., MCINTYRE B.D. 1999, Water Management with Hedgerow Agroforestry Systems In Edwards A.C. (Edit.), Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems. CRC Press, 416 s.
- SCHMITT-HARSH, M., et al., 2012. Carbon stock in coffee agroforests and mixed dry tropical forests in the western highlands of Guatemala. *Agroforestry systems*, 86: 141–157.
- SCHROTH, G. et al., 2002. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163: 131–150.
- SIEBERT SF (2002) From shade- to sun-grown perennial crops in Sulawesi, Indonesia: implications for biodiversity conservation and soil fertility. *Biodiversity and Conservation* 11: 1889–1902
- SILES, P., HARMAND, J.M., VAAST, P., 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry systems*, 78: 269–286.
- SILVA, F.G., BARRICHELO, L.E.G., SHIMOYAMA, V.R..S, WIECHETECK, M.S.S. 1994. Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus patula* var. *tecunumanii* visando a produção de celulose kraft e pasta mecânica. *O Papel* 55: 32–35..
- SILVA, C., VÁRZEA, V., GUERRA-GUIMARÃES, L., 2006. Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease, *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1): 119–147.
- SINGH, D., KOHLI, R. K., 1992. Impact of *Eucalyptus tereticornis* Sm. shelterbelts on crops. *Agroforestry Systems*, 20(3): 253–266.
- SHALLER, M., GÖTZ, S., BEER, J., JIMENÉZ, F., 2003. Species and site characteristics that permit the association of fast-growing trees with crops: the case of *Eucalyptus deglupta* as coffee shade in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 175: 205–215.
- SOTO-PINTO, L., PERFECTO, I., CABALLERO-NIETO, J., 2002. Shade over coffee: its effects on berry borer , leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas , Mexico. *Agroforestry systems*, 37–45.
- SOTO-PINTO, L., ANZUETO, M., MENDOZA, J., FERRER, G. J., JONG, B. 2010 Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agrofor. Syst.* 78, 39–51.
- STAVAR, C., GUHARAY, F., MONTERROSO, D., MUSCHLER, R.G., 2001.

- Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry systems*, 53: 151–70.
- STEPHEN, G.P., 2005. Population, land use and deforestation in the pan Amazon basin: a comparison of Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Peru and Venezuela Environment. *Development and Sustainability*, 7: 23–49.
- SUBLER, S., UHL, C., 1990. Agroforesteria Japonesa en la Amazonia. In Anderson A., *Alternativas a la deforestacion*. Ediciones ABYA-YALA, Quito.
- SYLVAIN, P., 1955. Some observations on *Coffea arabica* L. in Ethiopia. *Turrialba*, 5: 37–53
- SZOTT, L.T., FERNANDES, E.C.M., SANCHEZP, A., 1991. Soil-plant interaction in agroforestry systems. In Jarvis P.G. (ed.), *Agroforestry: Principles and practice*, Elsevier, 127–152 s.
- THORN J., 1995. *Káva*. Fortuna Print. 192 s.
- TORRES, J., 2008. *Agroforestría: una estrategia al cambio climático*, Soluciones practicas, 124 s.
- VALÍČEK P., 2002. *Užitkové rostliny tropů a subtropů*. Academia, Praha, 486 s.
- VILLACHICA, H., 1996. *Frutales y Hortalizas Promisorios de la Amazonia*. Tratado de Cooperacion Amazonica, 337 s.
- WANG, A., AVELINO, J., 1999. El ojo de gallo del cafeto (*Mycena citricolor*) In: Bertrand B and Rapidel B (eds) *Desafíos de la Caficultura en Centroamérica*. IICA-PROMECAFE-CIRAD-IRD-CCCR, 243–260 s.
- WATERKAMP, R. a kol. 2005. *Peru, Bolívie, Ekvádor, Galapágy: cestování a kultura, poznávání zvířat a rostlin*. Vyd. v českém jazyce 1. Praha: Baset, 278 s.
- WILLE, C., 1994. The birds and the beans. The coffee fields of Mexico and Central America may be the last best habitat for migrating birds. *Audubon* 94: 58–64.
- WEBER JC, SOTELO-MONTES C., CHÁVARRI LR. (1997). Tree domestication in the Peruvian Amazon Basin – working with farmers for community development. *Agroforestry Today* 9(4): 4-8.
- WILLIAMS L.O. (1981). The useful plants of Central America. *Ceiba* 24(1-2): 175-177.
- WINTGENS JN *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production* (monografie)
- WINTGENS, J.N. 2012. *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 983 p.
- ZHANG, C., FU, S., 2009. Allelopathic effects of eucalyptus and the establishment of

mixed stands of eucalyptus and native species. *Forest Ecology and Management*  
258: 1391–1396

**Webové zdroje obrazového materiálu:**

[1]: <<https://www.gislounge.com/geography-of-coffee>>

[2]: <<http://cdn.ruralcentro.net/1/2012/4/25/cercospora-coffeicola-full.jpg>>

[3]: <<http://www.donevelio.com/blogs/news/40962372-coffee-varietals-the-complete-list-of-coffee-trees-shrubs-types-in-the-industry>>

[4]: <[http://www.arauzcoffee.com/images/large/catuai\\_cherries.jpg](http://www.arauzcoffee.com/images/large/catuai_cherries.jpg)>

[5]: <<http://www.fao.org/docrep/005/y2328e/y2328e10.htm>>

## 7 Carbon Stock in Agroforestry Coffee Plantations with Different Shade trees in Villa Rica, Peru

Lenka Ehrenbergerová, Emil Cienciala, Aleš Kučera, Ludivine Guy, Hana Habrová

L. Ehrenbergerová a H. Habrová: Department of Forest Botany, Dendrology and Geobiocoenology, Mendel University in Brno, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic. E. Cienciala: IFER – Institute of Forest Ecosystem Research Area, Jílové u Prahy 25401, Czech Republic, A. Kučera: Department of Geology and Pedology, Mendel University in Brno, L. Guy: MapGeoSolutions, Jr. Rodolfo Rutte 145, Magdalena del Mar, Lima 17, Peru

### 7.1 Abstract

Agroforestry has become an important land use type in Central and South America. It is important to study agroforestry systems because of their ability to sequester carbon. This study investigates plantations that are located in the foothills of the Peruvian Andes, and it evaluates the aboveground and soil carbon storage of agroforestry coffee plantations with different dominant shading trees, including *Inga* spp., *Pinus* spp. (both 15 years old) and *Eucalyptus* spp. (7 years old). These agroforestry systems were also compared to a coffee plantation without shading trees. Biomass and carbon were estimated for trees and coffee shrubs using allometric equations. Soil (within depth of 30 cm) and litter carbon were estimated using field sampling and laboratory analyses. The total carbon stock for the site dominated by *Inga* spp. was  $119.9 \pm 19.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , while for the sites dominated by *Pinus* spp. it was  $177.5 \pm 14.1 \text{ Mg ha}^{-1}$  and for the site dominated by *Eucalyptus* spp. it was  $162.3 \pm 18.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ . In the Sun coffee site the ecosystem carbon stock was  $99.7 \pm 17.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Most carbon was fixed in the soil compartment (57–99 %), followed by aboveground tree biomass (23–32 %), tree belowground biomass (8–9 %), coffee shrubs (0.2–2 %) and litter (1 %).

### 7.2 Key words

Agroforestry systems, ecosystem carbon storage, biomass, soil, *Coffea arabica*, Peru



### **7.3 Introduction**

In the last few years, the importance of research on mitigation, i.e. reducing the sources or enhancing the sinks of greenhouse gases, especially mitigation of CO<sub>2</sub>, has been increasing due to climate change effects. Unsuitable land use activities (mainly deforestation) are the second major source of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions (IPCC 2013), and agroforestry systems seem to be an acceptable management of crop production, as well as for CO<sub>2</sub> mitigation through an increase in carbon stocks (Schroth et al. 2002).

In agroforestry systems, trees or shrubs are grown around or among crops or pastureland (Nair 1993a), and the recognition of this system as a greenhouse gas-mitigation strategy under the Kyoto Protocol has earned it the right to be part of the strategy for biological carbon sequestration (Nair et al. 2009a). Research on carbon sequestration in different types of land use provide information for the Reduced Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD) programs that would likely allow some countries to sell carbon credits to interested buyers or received financial support from funds (The World Bank 2011). Agroforestry systems help REDD by reducing pressure for further forest conversion to agriculture (Noponen et al. 2013) and by serving as a source of fuel-wood and construction material (Rice and Ward 2008). This system has special importance because of its applicability in agricultural lands as well as in reforestation programs (Ruark et al. 2003). Moreover, according to Smith et al. (2003), community-based agroforestry carbon projects have the highest potential for local livelihood benefits and pose less risk to communities than large-scale industrial plantations and strict forest protection.

Many studies have investigated the effect of agroforestry systems on carbon storage. Some of these studies have compared different types of pastures and crops and have assessed the effect of tree shading (Soto-Pinto et al. 2010; Avila 2001). Schmitt-Harsh et al. (2012) examined the carbon pools of smallholders of coffee plantations in agroforestry systems and compared them with mixed dry forest systems in Guatemala. The results showed that secondary forests store more carbon (199 Mg ha<sup>-1</sup>) than coffee agroforestry systems (128 Mg ha<sup>-1</sup>). Similar results were found by Noordwijk et al. (2002) for secondary forests and agroforestry coffee systems in Sumatra. However, in this study, the difference in carbon storage was even larger (262 Mg ha<sup>-1</sup> for secondary forests and

82 Mg ha<sup>-1</sup> for agroforestry coffee systems). Hergoulac'h et al. (2012) compared the greenhouse gas balance in two coffee plantations: a monoculture and a culture shaded by *Inga densiflora*, and found that the aboveground carbon stocks in the coffee monoculture and the agroforestry system amounted to  $9.8 \pm 0.4$  Mg ha<sup>-1</sup> and  $25.2 \pm 0.6$  Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. In a study by Häger (2012) from Costa Rica, carbon stock in coffee agroforestry farms was  $93 \pm 29$  Mg ha<sup>-1</sup>.

Soil plays a crucial role in carbon sequestration. Among many different types of land use focused on agronomical production, agroforestry systems can be considered as systems with high effectiveness of soil carbon storage, as well as with low vulnerability, compared with other types of intensive land management (Nair et al. 2009b). Despite continuous crop exploitation, agroforestry production conserves the soil environment due to more closed nutrients and water turnover via tree cover producing litter and shading the soil surface, as well as sustaining the less-eroded soil body. Moreover, in some studies, soil organic matter was found to have increased over 10 years by 16–42 Mg ha<sup>-1</sup> in the 0–45 cm layer (Beer et al. 1998), which is about 8–21 Mg C ha<sup>-1</sup>, depending on the planted shading species and commodities. On the other hand, soil organic matter dynamics are driven by many factors, in general by climate, soil type and land use management, which determine the physical, chemical and biological controls of soil carbon sequestration and turnover (Feller and Beare 1997).

Coffee (*Coffea* spp.) is very important cash crop cultivated in an area of slightly more than 100,000 km<sup>2</sup> (Lewin et al. 2004; Leff et al. 2004). It is traditionally grown under the shade of trees, forming typical agroforestry systems (Wintgens 2004). Shade trees provide numerous benefits; there is an added value of wood production, which can be expressed either in terms of woody biomass or carbon fixation (Batjes and Sombroek 1997; Hergoulac'h et al. 2012; Häger 2012), and these plantations may also act as a critical refuge for forest biota, including birds, insects, mammals and reptiles (Perfecto et al. 1996; Moguel and Toledo 1999).

In Peru, the conversion of forests and grasslands to agricultural purposes is the main source of GHG emissions (MINAM 2010). According to Stephen (2005), 1,879 km<sup>2</sup> of forests were lost annually between 1985 and 1990 in Peru. Oliveira (2007) reported that

between 1999 and 2005, disturbance and deforestation rates throughout the Peruvian Amazon were between 632 and 645 km<sup>2</sup> per year. According to Meza (2006), about 80 % of the deforested area was left unmanaged, while the rest was used for agricultural production in Peru in 2002. This indicates a potential for agroforestry system expansion in this country.

The local leguminous species of the genus *Inga* are often used as the principal shade trees in Peru (Rice and Ward 2008). *Inga* species fix N and also produce a great deal of litter, which enriches the soil with organic material (Brack 1999; Rhoades 1998). For this reason they are the ideal shade trees for coffee plantations. However, an increasing number of Peruvian coffee farmers have changed the species composition of their plantations in recent years, replacing traditional legume shade trees with native or exotic timber species. This trend has been previously observed for all of Central America (Galloway and Beer 1997). In Peru, the most common introduced tree species used for shading in coffee plantations are *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp. and *Acrocarpus fraxinifolius*. Until now, only a few studies have investigated the impact of the aforementioned introduced tree species on coffee plantations. Shaller et al. (2003), in his study from Costa Rica, found that *Eucalyptus deglupta* is a suitable shade tree for coffee on sites with high precipitation. With regard to studies dealing with *Pinus* spp. as agroforestry system species, there are only papers about outplantings of pines on pasturelands (Yeates et al. 2000; Sequeira and Gholz 1991).

On optimal sites, coffee can also be grown without shade (Campanha et al. 2004) but using high agrochemical inputs (Beer et al. 1998). It is estimated that in Mexico, Colombia, Central America and the Caribbean, approximately 40 % of agroforestry coffee plantations were converted to sun coffee in the 1990s (Rice and Ward 1996). Monoculture coffee plantations could be a threat to tropical rainforests because of land degradation and poor land management (Fernandez 2001). The quantity of shade influences the coffee yield: according to Soto Pinto et al. (2000) shade tree cover had a positive effect in a range between 23 and 38 % shade cover while Muschler (1997) found the best yields at 40 % shade cover. Between 38 % and 48 % shade, yield is maintained and it decreases with a shade cover greater than 50 % (Soto Pinto 2000).

It is important to assess carbon stocks provided by agroforestry ecosystems under different shade trees as an additional ecosystem service. The goal of this study was to compare the ecosystem carbon storage ability of agroforestry coffee plantations with different shade trees and without shading, in both aboveground and belowground carbon pools. The results of this study may contribute to the preservation and planting of shade trees for the benefit of carbon sequestration. Evaluating the carbon storage capacity of coffee agroforestry systems with different shade tree species will contribute to a better understanding of the role that these ecosystems can play in REDD+ programs because, as mentioned by Schmitt-Harsh et al. (2012), quantifying and understanding carbon budgets of shade-grown coffee systems is needed for the development of sound climate change mitigation strategies.

## **7.4 Materials and Methods**

### **7.4.1 Study area description**

This study was conducted in the Villa Rica district, in the Pasco region of Peru (Fig. 1). The average annual rainfall in this tropical humid mountain forest zone is 1,590 mm, and the average annual temperature is 17.8 °C (Ponce et al. 2008). The rainy season lasts from November to May, while a dry season occurs during July and August (Hamling and Salick 2003). According to the FAO (Food and Agriculture Organization), soils in this region are classified as dystric Cambisols (Egg 2012; Michéli et al. 2006) of low structural stability. The main economic activity in the district is agriculture, mostly from coffee production. Villa Rica is one of the most important districts for coffee production and export in Peru; its landscape is characterised by shaded coffee plantations with some cattle farming.

The following agroforestry coffee plantations were selected for study: Ave Fénix, which was divided into two parts: a first part shaded by *Inga* spp. (further termed as *Inga* site) and a non-shaded part (Sun coffee site); Santa Rosa shaded by *Pinus* spp. (*Pinus* site) and Gabriela shaded by *Eucalyptus* spp. (*Eucalyptus* site). In the past, these sites were used as pastureland. Currently, they are maintained as typical agroforestry systems (except the Sun coffee site) with *Coffea arabica* as the principal crop, with sparse stands of shading trees.

The coffee plantation Ave Fénix is located in Alto Palomar, near the town of Villa Rica (Tab. 1; Fig. 1). The *Inga* site forms one part of this plantation shaded predominantly by *Inga* spp. It represents a typical shaded coffee plantation in this region as regards management and tree species composition. The other part of the Ave Fénix plantation, where shade trees were absent, is the Sun coffee site serving as a reference coffee plantation without shading. The field has rough-broken topography with an average slope angle of 18.2°. The upper 30 cm of soil at the *Inga* and Sun coffee sites has its texture classified as loam (*Inga* site: clay 25.4 %, silt 33.6 %; Sun coffee site: clay 24.4 %, silt 31.3 %, respectively), with extremely acidic soil reaction (pH/KCl 4.0 and 3.7, respectively), and a high amount of organic carbon (Tab. 5). In the Ave Fénix plantation, we identified the following coffee varieties: Typica, ‘Catimor’, ‘Caturra’ and ‘Catuai’.

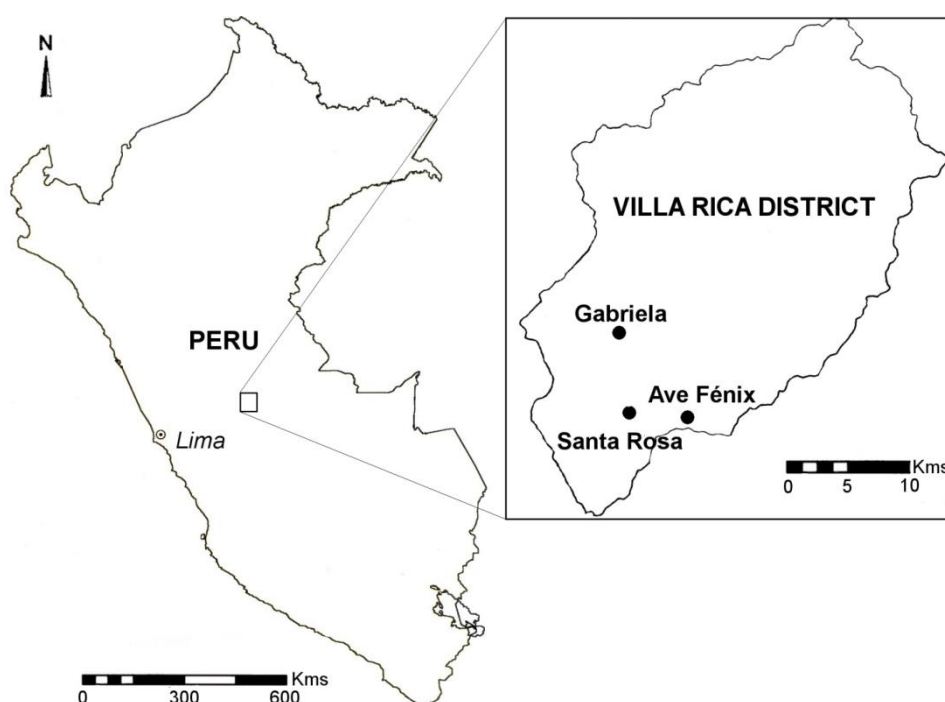
The Santa Rosa plantation (*Pinus* site) is located in Oconal, 4 km south of the town of Villa Rica (Tab. 1; Fig. 1). The average slope angle is 16.4°. In the first 30 cm, soil texture is classified as loam (clay 15.0 %; silt 37.0 %), soil reaction is extremely acidic (pH/KCl 4.1), and the amount of organic carbon is very high (Tab. 5). The Santa Rosa plantation was chosen because of the *Pinus* spp. dominance. It is the first generation of coffee shaded by *Pinus* spp. after a change from pastureland and is also one of the first coffee agroforestry plantations shaded by *Pinus* spp. in the region. The following coffee varieties were found: Typica, Catimor and ‘Caturra’.

The plantation Gabriela (*Eucalyptus* site) is located 4 km north of the town of Villa Rica (Tab. 1; Fig. 1). The Gabriela plantation is the smallest, and *Eucalyptus* spp. are the dominant shade tree species there. This is the first generation of coffee shaded by *Eucalyptus* spp. after conversion from pastureland, and it is also one of the first coffee plantations shaded by *Eucalyptus* spp. in the region. The site is more homogenous with an average slope angle of 18.5°. The soil by its texture is classified as loam (clay 19.0 %; silt 33.3 %), with strongly acidic soil reaction (pH/KCl 4.4), and a high amount of organic carbon (Tab. 5). The following coffee varieties were present: Typica, ‘Catimor’ and ‘Caturra’.

All plantations are certified as organic with similar management and inputs. In the past, the selective thinning of shade trees and coffee shrubs has been used on all plantations.

Currently, the shade trees are planted at the same time as coffee shrubs, and after 15–20 years, they are removed and replaced by new ones. Coffee is pruned regularly in systematic way (one line of coffee shrubs is pruned every year) at a height of 0.3–0.5 m, and all farmers left the organic material from pruning on their farm to decompose. Management is relatively simple and applied identically across all coffee plantations at each location.

The actual climate at the studied sites is documented by the vapour pressure deficit (VPD) measured at the *Inga* and Sun coffee sites during 2011 and 2012. The mean monthly values reach approximately 500 Pa during the dry season, while the VPD is markedly lower during the rainy season. This trend is identical for shaded and open locations, but the VPD in tree shading locations (in this case, in an area dominated by *Inga* spp.) is generally lower compared to open space coffee plantations.



**Fig. 1** Location of studied plantations

**Tab. 1 Selected plantations, their location, area, mean altitude, dominant tree species and age. (UTM - Universal Transverse Mercator, m.a.s.l. – meters above sea level, dominant tree species and age (n.a. – not applicable).**

Plantation	Site	X (UTM)	Y (UTM)	Area (ha)	Altitude (m.a.s.l.)	Dominant tree species	Stand age (years)
Ave Fénix 1	<i>Inga</i>	475784	8808864	7.37	1550	<i>Inga</i> spp.	15
Ave Fénix 2	Sun coffee	475784	8808864	0.98	1550	(n.a.)	(n.a.)
Santa Rosa	<i>Pinus</i>	471531	8809929	3.98	1540	<i>Pinus</i> spp.	15
Gabriela	<i>Eucalyptus</i>	471882	8816212	0.96	1660	<i>Eucalyptus</i> spp.	7

#### 7.4.2 Tree measurement, biomass and carbon stock estimation

Field measurements were conducted in 2011 and 2012. Diameters at breast height (DBH; measured at 1.3 m) of all tree species  $\geq 10$  cm were measured at each study site. In total 1,368 trees were measured in the *Inga* site, 492 in the *Pinus* site and 511 in the *Eucalyptus* site. Tree heights were measured by Impulse Forest Pro for almost all trees in the study plots. The missing tree heights for the remaining trees, representing 3.7 % of the entire dataset, were estimated based on the approximated height model according to Eq. 1,

$$H = 1.3 + p_1 * \exp(-p_2 / DBH) \quad \text{Eq. 1}$$

where *DBH* is the diameter at breast height and  $p_1$  and  $p_2$  are the parameters that were fitted. This exponential model (Ratkowsky 1990) was parameterised for each tree species individually.

The dry aboveground biomass of shade trees was estimated using available allometric models applicable for the species present at the studied plantations. In the case of *Inga* spp., *Pinus* spp. and *Eucalyptus* spp., the corresponding specific allometric models were used. For all other trees, the generic allometric model developed by Chave et al. (2005) for moist forest stands was used (Tab. 2), as it was found to be best suited for our study. For this model, the values of tree density from different sources were employed (Nogueira et al. 2005; Barker et al. 2004; Brown 1997; Silva et al. 1994). If a species was included in different databases, then the lowest published wood density was applied. Adjusted values for tree aboveground biomass means and confidence intervals for each plot were obtained by a bootstrapping procedure, using SYSTAT 13.1 statistical software (SYSTAT Software. Inc. USA). The belowground tree biomass component was estimated using the regression equations for predicting root biomass density used by Cairns et al. (1997) (Eq. 2),

$$Y \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = \exp [ - 1.0850 + 0.9256 * (\ln ABD)] \quad \text{Eq. 2}$$

where *ABD* is the aboveground biomass density.

For calculations with errors the method of standard deviation was used (Eq. 3),

$$z = x + y \rightarrow \Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

where *x* and *y* are measured quantities and  $\Delta x$  and  $\Delta y$  their uncertainties.

The quantity of carbon was measured as 50 % of the estimated biomass (IPCC 2003; Roy et al. 2001).

**Tab. 2 Allometric models used for above-ground biomass calculation for individual tree species. The abbreviations used are as follows: *y* – aboveground biomass (kg/tree), *DBH* – diameter at breast height (cm), *H* – tree height (m),  $\rho$  – wood density (g/cm<sup>3</sup>), and *AGE* – tree/plantation age (years).**

Species group	Allometric model	References
<i>Inga</i> spp.	$\text{Log}_{10} y = -0.889 + 2.317 * \text{Log}_{10} DBH$	Segura et al (2006) <sup>▪</sup>
<i>Pinus</i> spp.	$y = 0.1229 * (DBH)^{2.3964}$	Návar (2009)
<i>Eucalyptus</i> spp.	$y = 2.08 + (150.9 + 0.28AGE)(DBH^2 H)^{(0.87+0.0012AGE)}$	Saint-André et al (2005)
Other trees	$y = 0.0776 * (\rho DBH^2 H)^{0.94}$	Chave et al (2005)

<sup>▪</sup> Segura et al (2006) model for *Inga punctata* and *I. tonduzzi* tree species.

#### 7.4.3 Coffee plant measurement and biomass and carbon stock estimation

Field measurements of coffee shrubs were conducted in 2011. In total, 64 rectangular sample plots of 100 m<sup>2</sup> were established to monitor coffee plants. Plots were located randomly in the systematic grid of squares, and the heights of all coffee shrubs were measured. The dry aboveground biomass of coffee plants (*BC*) was estimated based on the model developed in Segura et al. (2006). We used this equation (Eq. 4) because it was applicable for coffee plants using plant height as the sole independent variable in the logarithmic form

$$\text{Log}_{10}(\text{BC}) = - 0.779 + 2.338 * \text{Log}_{10}(H) \quad \text{Eq. 4}$$

where *H* is the height of coffee shrubs.

The carbon quantity was measured using the same formula used for trees, which was 50 % of the estimated biomass of coffee shrubs (IPCC 2003; Roy et al. 2001).



#### 7.4.4 Soil properties

Soil samples were collected from six rectangular plots in each site (24 in total) with similar slopes (approximately 15°) which were selected from 64 coffee survey plots. In each square plot, soil samples were collected from three randomly selected sample locations. At each sample location, the soil samples were collected as (JNC 2013) undisturbed soil samples (physical ring with volume 100 cm<sup>3</sup>), which were collected from three soil pits in four sampling depths (0–3.5 cm; 3.5–12.5 cm; 12.5–21.5 cm; and 21.5–30 cm), and (2) litter from a circle with a diameter of 0.336 m. Samples were weighed as fresh, as well as oven-dried at 105°C. The bulk density was calculated using the following formula (Eq. 6),

$$r_d = m_{od} / V \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \text{Eq. 6}$$

where  $r_d$  is the bulk density,  $m_{od}$  is the weight of the oven-dried soil sample in g, and  $V$  is the volume of the soil sample (100 cm<sup>3</sup>).

Because the presumed prevailing form of carbon in the investigated soils was the carbon present in soil organic matter (SOM), the carbon content was assessed as the oxidative carbon ( $C_{ox}$ ) percentage (%), according to Walkley and Black (1934). Soil carbon in Mg ha<sup>-1</sup> (SC) was calculated using Eq. 7,

$$SC = r_d * s_t * C_{ox} \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} \quad \text{Eq. 7}$$

where  $r_d$  is bulk density in g\*cm<sup>3</sup>,  $s_t$  is the depth of the sampling zone in cm and  $C_{ox}$  is oxidative carbon content in %.

SC was expressed (1) as the cumulative SC content (CSC) within the 30 cm depth to obtain the total SC storage and (2) as the relative value of soil carbon content in 1 cm of each sampling depth (relative soil carbon – RSC). To quantify litter amount, litter samples were oven dried at 105 °C and weighed. The results were recalculated to Mg ha<sup>-1</sup>. Soil reaction was measured as pH/H<sub>2</sub>O and pH/1M KCl, both in a suspension soil sample: extractant 1:1 (w:v), soil texture was assessed using a sedimentary method.

## 7.5 Results

### 7.5.1 Dendrological and mensurational data

Some of the dominant species in the *Inga* site based on basal area (BA) were as follows: *Inga* spp. (*Inga adenophylla* Pittier, *I. densiflora* Bentham, *I. edulis* C. Marius, *I. feuillei* DC., *I. velutina* Willdenow), *Pinus* spp. (*Pinus oocarpa* D. Don., *P. tecunumanii* (Schwd) Equiluz & Perry), *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C. Page (Tab. 3) and other trees that were less represented, including *Euphorbia heterophylla* L. and *Ficus* spp. The *Pinus* site was dominated by *Pinus* spp. (*Pinus oocarpa*, *P. tecunumanii*) and the most represented tree species were *Acrocarpus fraxinifolius* Wt. & Arn., *Eucalyptus* spp., *Inga* spp., *Pinus* spp. and *Retrophyllum rospigliosii* (Tab. 3). *Eucalyptus* spp. was the dominant tree species at the *Eucalyptus* site; other tree species included *Acrocarpus fraxinifolius*, *Inga* spp., *Pinus* spp. and *Retrophyllum rospigliosii* (Tab. 3). The hectare indices of counts and the stand basal area of trees and coffee shrubs in the plantations are documented in Tab. 4. As for tree density, it was highest at the *Eucalyptus* site and lowest at the *Pinus* site. The *Eucalyptus* site also had the largest stand basal area. Inversely to above, the highest density of coffee shrubs was present at the *Inga* site.

**Tab. 3 Tree species composition based on count and stand basal area (BA) representation**

Species	<i>Inga</i> site		<i>Pinus</i> site		<i>Eucalyptus</i> site	
	Count (%)	BA (%)	Count (%)	BA (%)	Count (%)	BA (%)
<i>Inga</i> spp.	63.8	45.9	2.6	1	5.1	2.4
<i>Pinus</i> spp.	7.2	7.8	67.5	61.9	2.4	0.5
<i>Eucalyptus</i> spp.	3.8	3.1	23.8	32.7	72.4	87.7
<i>Retrophyllum rospigliosii</i>	4.1	5.7	4.7	3.9	0.2	0
<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	9.8	2.8	0.6	0	18.8	8.4
Other	11.3	34.7	68.3	0.5	1.1	1

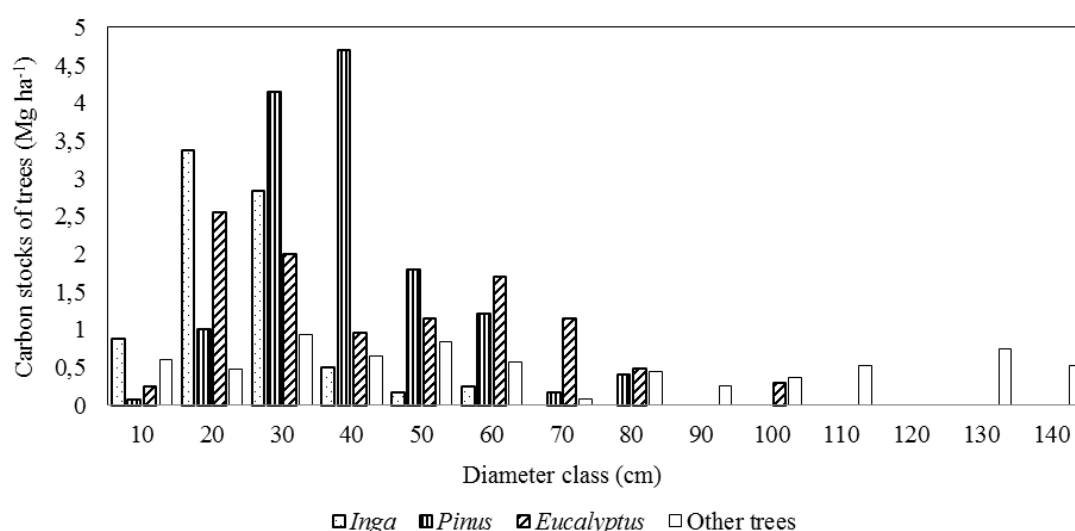
**Tab. 4 Tree and coffee plant counts per hectare stand basal area and mean tree height**

	<i>Inga</i> site	<i>Pinus</i> site	<i>Eucalyptus</i> site
Trees per 1 ha – live (pcs)	176	124	472
Stand basal area – live (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	12.9	16.6	18.5
Tree H (m)	13.7 ± 2.4	22.2 ± 4	20.8 ± 3.8
Number of tree species per ha	4.1	1.8	5.2

## 7.5.2 Biomass and carbon stock

The aboveground dry biomass of shade trees varied between 9.9 kg (*Erythrina edulis* Triana ex Micheli) and 18,400 kg (*Cariniana decandra* Ducke) per tree (DBH  $\geq$  10 cm). The biomass of coffee plants was approximately two orders of magnitude smaller, with a mean of  $0.5 \pm 0.2$  kg per coffee plant. The estimated total aboveground biomass was  $60.6 \pm 6.4$  Mg ha<sup>-1</sup> for the *Inga* site,  $124 \pm 9.4$  Mg ha<sup>-1</sup> for the *Pinus* site,  $107 \pm 6.2$  Mg ha<sup>-1</sup> for the *Eucalyptus* site and approximately  $1.9 \pm 0.2$  Mg ha<sup>-1</sup> for the Sun coffee site.

A comparison of the tree carbon stock in dominant tree species on the plantations studied yielded approximately  $115 \pm 51$  kg/tree for *Inga* spp.,  $387 \pm 152$  kg/tree for *Pinus* spp. and  $270 \pm 197$  kg/tree for *Eucalyptus* spp. The distribution of carbon stocks for dominant tree species by 10-cm diameter classes is shown in Fig 2.



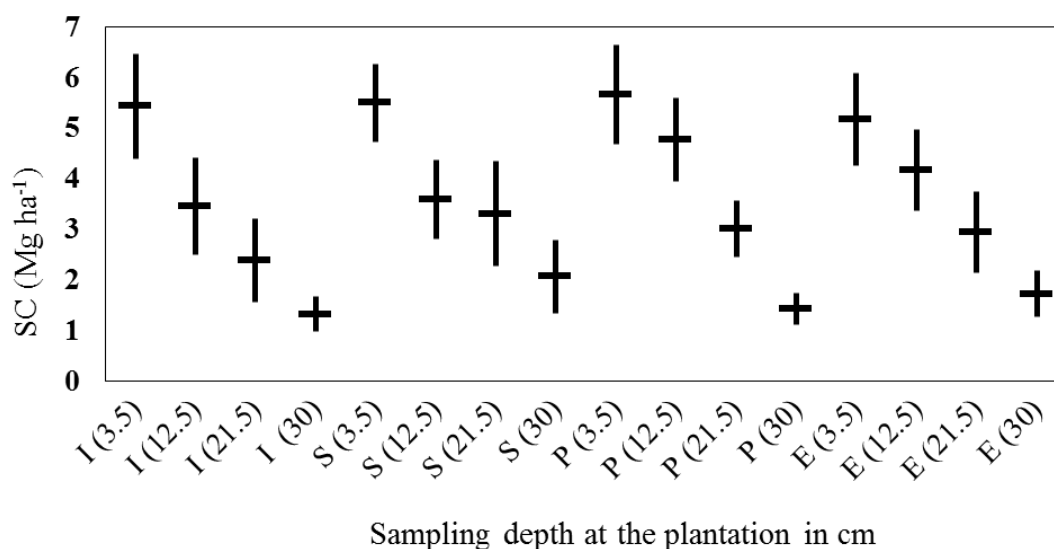
**Fig. 2** Distribution of carbon stocks in 10-cm diameter classes for *Inga* spp., *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp. and other tree species.

As expected, the relative soil carbon (RSC) values are the highest in all cases in the upper layers of soil and decrease with depth (see Tab. 5 and Fig. 3). Variability is relatively large at the surface layers of soil at the *Inga*, *Pinus* and *Eucalyptus* sites, where higher heterogeneity due to more intensive interaction with external carbon sources can be expected, which corresponds to variation in litter content (Tab. 7). The values of RSC, as well as  $C_{ox}$  and cumulative SC (Tab. 7), are highest at the *Pinus* site, which is mainly due to a slower decrease in carbon content as depth increased. However, at the Sun coffee

site, the carbon storage characteristics are not as low as expected due to the absence of trees, but they are higher than at the *Inga* site. This may be caused by the young age of the plantations (Hergoulac'h et al. 2012) because the effect of shading trees in the agroforestry system is not yet evident on the level of the soil environment. For the cumulative SC values (Fig. 4), polynomial equations were used (Tab. 6) to compare our values with the results of other studies.

**Tab. 5 Soil carbon stock at the investigated sites at different sampling depths. Used abbreviation are as follows: Cox – oxidative carbon; CSC – cumulative soil carbon; RSC – relative soil carbon in 1 cm of sampling depth; SD – standard deviation.**

Site	Sampling depth (cm)	C <sub>ox</sub> (%) ± 1/2 SD	CSC (Mg ha <sup>-1</sup> ) ± 1/2 SD	RSC (Mg ha <sup>-1</sup> ) ± 1/2 SD
<i>Inga</i>	3.5	4.44 ± 0.87	19 ± 7.3	5.43 ± 1.04
	12.5	2.55 ± 0.73	50 ± 23.2	3.45 ± 0.96
	21.5	1.69 ± 0.65	71.5 ± 35.4	2.38 ± 0.82
	30	0.89 ± 0.25	82.6 ± 38.4	1.31 ± 0.35
<i>Sun coffee</i>	3.5	4.65 ± 0.64	19.2 ± 5.3	5.49 ± 0.76
	12.5	3.11 ± 0.80	51.5 ± 15.3	3.58 ± 0.78
	21.5	2.44 ± 0.74	81.2 ± 25.3	3.31 ± 1.04
	30	1.45 ± 0.48	98.7 ± 34.3	2.06 ± 0.72
<i>Pinus</i>	3.5	4.55 ± 0.77	19.8 ± 6.9	5.66 ± 0.99
	12.5	4.05 ± 0.73	62.7 ± 17.7	4.76 ± 0.82
	21.5	2.31 ± 0.43	89.8 ± 24.2	3.01 ± 0.56
	30	1.02 ± 0.21	101.8 ± 26.7	1.42 ± 0.31
<i>Eucalyptus</i>	3.5	4.56 ± 0.84	18 ± 6.4	5.16 ± 0.91
	12.5	3.18 ± 0.60	55.6 ± 18.3	4.17 ± 0.80
	21.5	1.99 ± 0.53	81.9 ± 30.5	2.93 ± 0.80
	30	1.14 ± 0.31	96.6 ± 35.8	1.72 ± 0.46

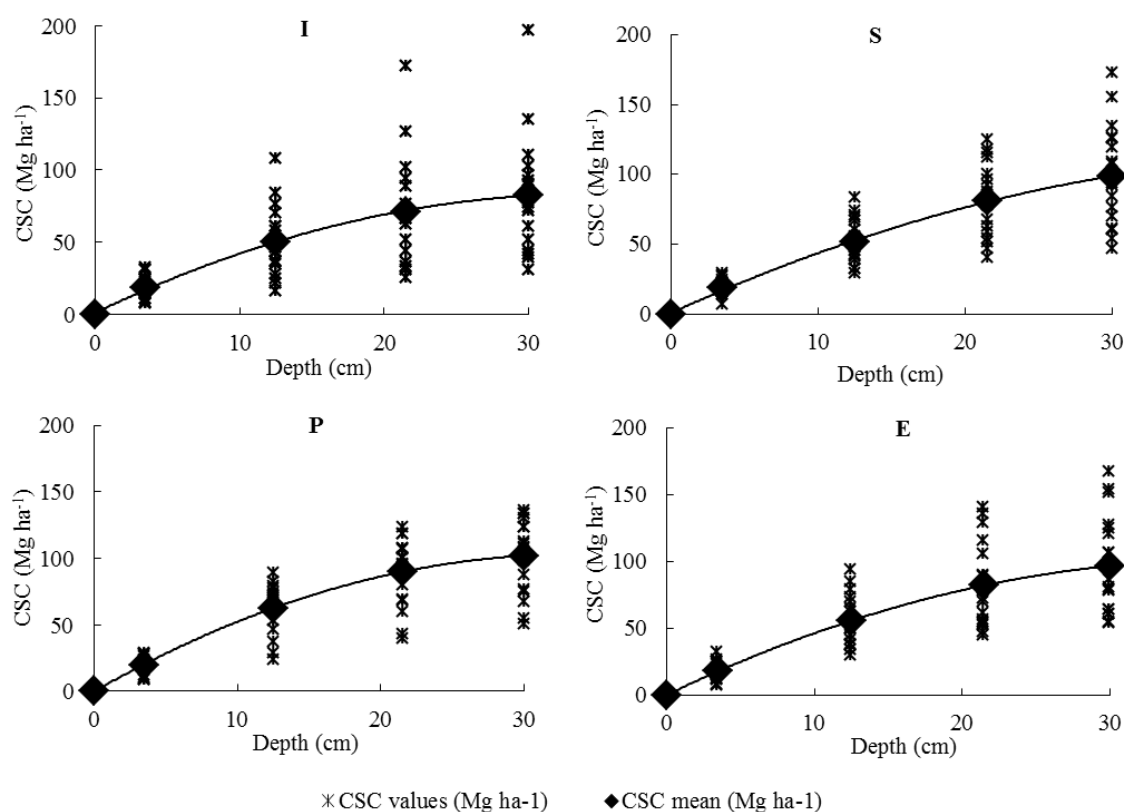


**Fig. 3** Relative soil carbon content (RSC) at different sampling depths at the study sites. The values are organised as the mean  $\pm$  1/2 of the standard deviation (SD). The abbreviations used are as follows: I – *Inga* site; S – *Sun coffee* site; P – *Pinus* site; E – *Eucalyptus* site.

**Tab. 6** Polynomial equations for carbon content in the soil.

<i>Inga</i> site	$y = -0.0699x^2 + 4.7967x + 1.2791$
<i>Sun coffee</i> site	$y = -0.0507x^2 + 4.7799x + 1.1166$
<i>Pinus</i> site	$y = -0.0923x^2 + 6.1722x - 0.2625$
<i>Eucalyptus</i> site	$y = -0.07x^2 + 5.3129x + 0.1355$

A comparison of the total carbon stock in the different types of coffee plantations is shown in Tab. 7 and in Fig. 5. The highest amount of carbon in tree biomass was fixed at the *Pinus* site. The amount of carbon held in the coffee shrubs was also highest at the same site. The amount of carbon held in tree biomass was smaller at the *Eucalyptus* site and smallest in the *Inga* site. Although *Inga* spp. trees have large crowns, their stem diameter and planting densities are low, which explains the lower values of carbon held in tree biomass compared to other plantations with different tree species used for shading. The carbon stock in coffee shrubs was about the same at the *Inga* and *Eucalyptus* sites. The smallest amount of carbon held in coffee shrubs was observed in the *Sun coffee* site.



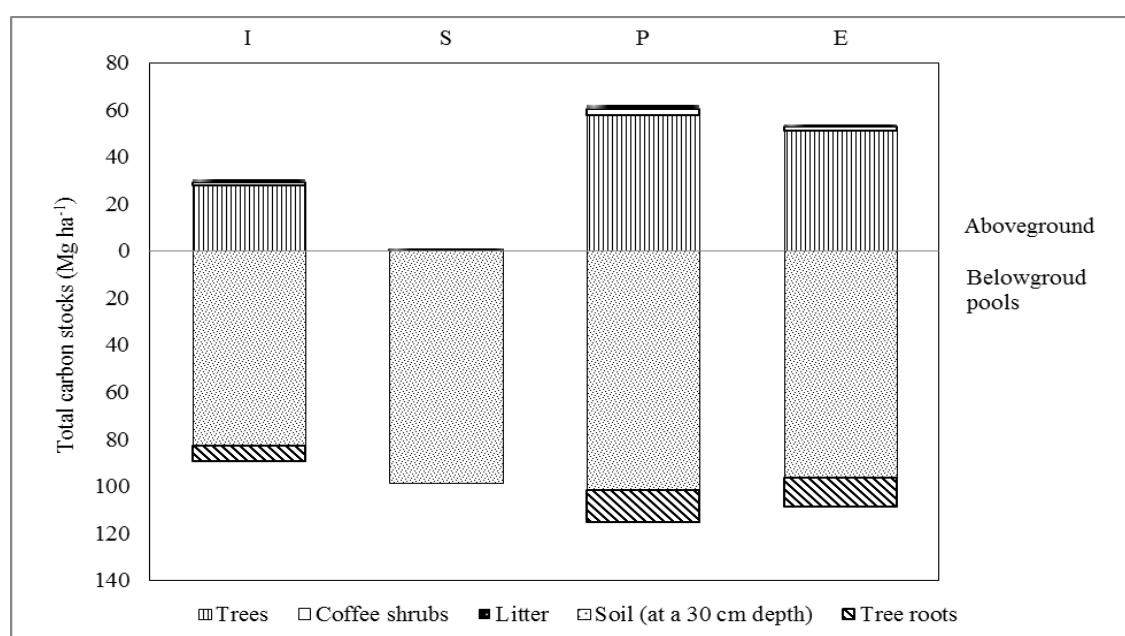
**Fig. 4** Curves of cumulative carbon storage (CSC) at the study sites used for expressing soil carbon content within 30 cm of soil depth. The abbreviations used are as follows: I – *Inga* site; S – Sun coffee site; P – *Pinus* site; E – *Eucalyptus* site.

The total carbon stock at the *Inga* site was  $119.9 \pm 19.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , of which 69 % was located in the soil and 29 % was located in the trees. The Sun coffee site contained  $99.7 \pm 17.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ , which was mainly located in the soil (99 %), while litter and coffee shrubs represented the remaining fraction, estimated at 1 % and 0.2 %, respectively. The total carbon stock at the *Pinus* site was  $177.5 \pm 14.1 \text{ Mg ha}^{-1}$ , where the majority of carbon was fixed in the soil (57 %) and trees (40 %). The total carbon stock at the *Eucalyptus* site was  $162.3 \pm 18.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ , which was mainly located in the soil (59 %) and trees (39.5 %).

The *Eucalyptus* site fixed the most carbon per year into tree biomass ( $7.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  per year), while slightly less was fixed at the *Pinus* site ( $3.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  per year); the lowest amount of carbon was fixed at the *Inga* site ( $1.8 \text{ Mg ha}^{-1}$  per year).

**Tab. 7 Total carbon stocks in studied coffee sites (Mg ha<sup>-1</sup>).**

Coffee shrubs	1.6 ± 0.3	0.2 ± 0.03	2.8 ± 0.6	1.5 ± 0.4
Trees (≥10 cm DBH)	27.5 ± 3.2		57.5 ± 4.5	51.2 ± 3.1
Litter	1.2 ± 0.2	0.7 ± 0.1	1.7 ± 1.1	0.7 ± 0.1
Aboveground pools	30.3 ± 3.2	1 ± 0.1	62 ± 4.7	53.5 ± 3.1
Roots of trees	7 ± 0.8	-	13.7 ± 1.1	12.3 ± 0.4
Soil (in depth 30 cm)	82.6 ± 19.2	98.7 ± 17.2	101.8 ± 13.3	96.7 ± 17.9
Belowground pools	89.6 ± 19.2	98.7 ± 17.2	115.4 ± 13.3	108.8 ± 17.9
<b>Total</b>	<b>119.9 ± 19.5</b>	<b>99.7 ± 17.2</b>	<b>177.5 ± 14.1</b>	<b>162.3 ± 18.2</b>



**Fig. 5 Total carbon stocks (Mg ha<sup>-1</sup>) of coffee agroforestry plantations with different shade trees. The abbreviations used are as follows: I – Inga site; S – Sun coffee site; P – Pinus site; E – Eucalyptus site.**

## 7.6 Discussion

The disappearance of a large proportion of tropical forests at all latitudes could lead to an increase in GHG emissions if sustainable management and conservation policies are not employed (Dixon et al. 1995). In Peru, this problem is evident due to the fast rate of deforestation (Stephen 2005, Oliveira et al. 2007), and it is obvious that agroforestry systems are one of the possibilities that can mitigate GHG emissions from crop production. Our study from the Peruvian Amazon finds that agroforestry systems are important for carbon mitigation. As with other authors (Avila et al. 2001; Hergoulac’h et al. 2012; Soto-Pinto et al. 2010; Dossa et al. 2008), our results demonstrate that carbon



stocks are greater in agroforestry coffee plantations than in the coffee plantations without shade. The difference in carbon stocks between agroforestry and sun plantations range from 20.4 Mg ha<sup>-1</sup> (the Sun coffee site compared with the *Inga* site) to 77.8 Mg ha<sup>-1</sup> (the Sun coffee site compared with the *Pinus* site). Other authors reported the following differences between carbon stocks in agroforestry plantations and sun coffee plantations: Hergoulac'h et al. (2012) found a difference of 15.4 Mg ha<sup>-1</sup> (for coffee–*Inga* association) and Dossa et al. (2008) 123.6 Mg ha<sup>-1</sup> (for coffee–*Albizia* association).

It is clear that agroforestry systems store more carbon than open space plantations, but it is also important to identify the distribution of carbon in the ecosystem. In our study, the amount of carbon in tree biomass (which ranges from 27.5 ± 3.2 to 57.5 ± 4.5 Mg ha<sup>-1</sup>) is greater than the amount published in other studies. In Häger's study (2012), shade tree carbon storage in an organic agroforestry coffee plantation was 23.2 Mg ha<sup>-1</sup> (shaded by *Dracaena fragrans* and *Yucca guatemalensis*) and in the study of Hergoulac'h et al. (2012) for an *Inga* shaded agroforestry system, it was only 13.9 Mg ha<sup>-1</sup>. It should be noted that the biomass estimates do not include error components. For example, only the standard error associated with the allometric model of Chave et al. (2005) is 12.5 % and adding sampling and measurement errors would further increase the total uncertainty bounds. But this is inherent in all similar studies.

The carbon stock in coffee biomass by the same authors is 2.3 Mg ha<sup>-1</sup> (Häger 2012) and 9.1 Mg ha<sup>-1</sup> (Hergoulac'h et al. 2012) with a coffee density of 6,045 plants ha<sup>-1</sup> and 4,722 plants ha<sup>-1</sup>, respectively. If we compare these data with our results, we see that only the *Pinus* site has carbon stocks (2.8 Mg ha<sup>-1</sup>) comparable to the Häger (2012) study, and in the rest of sites, our values are smaller. The coffee density in the Häger (2012) study is comparable with the *Inga* site (6,830 plants ha<sup>-1</sup>) and that of the Hergoulac'h (2012) study with the *Pinus* site (4,840 plants ha<sup>-1</sup>), as seen in Tab. 4. The carbon stock in the litter in studied sites (0.7–1.7 Mg ha<sup>-1</sup>, Tab. 7) is smaller than in the studies of Häger (2012) (4.8 Mg ha<sup>-1</sup>) and Hergoulac'h (2012) (2.2 Mg ha<sup>-1</sup>). Avila et al. (2001) studied the carbon stock in agroforestry systems in Costa Rica and found that the carbon stock in aboveground pools of 8-year-old *Coffea-Eucalyptus* plantations was 12.3 Mg ha<sup>-1</sup> which is less than in the *Eucalyptus* site.

Comparing our results from the Sun coffee site with other studies, we conclude that the carbon stock in coffee shrubs and litter is less in our studied site. Hergoulac'h et al. (2012) published the value 8.5 Mg ha<sup>-1</sup> and 1.3 Mg ha<sup>-1</sup> for the amount of carbon in aboveground coffee biomass and litter.

Our results of carbon fixed in the deepest 10 cm of soil using equations from Tab. 6 indicate that the average carbon contents were as follows: 42.3 Mg ha<sup>-1</sup> at the *Inga* site; 43.9 Mg ha<sup>-1</sup> at the Sun coffee site; 52.2 Mg ha<sup>-1</sup> at the *Pinus* site, and 46.3 Mg ha<sup>-1</sup> at the *Eucalyptus* site. Schmitt-Harsh et al. (2012) found that the soil in a coffee agroforestry system had a carbon content of 38.2 Mg ha<sup>-1</sup>, while the value in the secondary forest was 45.1 Mg ha<sup>-1</sup>. Using equations from studies on carbon stocks in the topsoil (0–25 cm, Tab. 6), we see the following values: *Inga* site: 77.5 Mg ha<sup>-1</sup>, Sun coffee site: 88.9 Mg ha<sup>-1</sup>, *Pinus* site: 96.4 Mg ha<sup>-1</sup>, and *Eucalyptus* site: 89.2 Mg ha<sup>-1</sup>, which are comparable with the results of Avila et al. (2001) (108.6 Mg ha<sup>-1</sup>) and Häger (2012) (73 Mg ha<sup>-1</sup>). Soto-Pinto (2010) studied the soil to a depth of 30 cm and obtained the value 151.0 Mg ha<sup>-1</sup>, which is greater than our results for all studied plantations. Another study from Indonesia (Noordwijk et al. 2002) found that the total carbon stock (above 30 cm in the soil) for shade coffee was 82 Mg ha<sup>-1</sup>, which is comparable with the value from the *Inga* site.

The published values of total carbon stocks for coffee agroforestry plantations range from 82 to 198 Mg ha<sup>-1</sup>, while soil carbon might reach over 89 % the total (Avila et al. 2001; Schmitt-Harsh et al. 2012; Noordwijk et al. 2002; Häger 2012; Soto-Pinto et al. 2010; Vásquez et al. 2007; Roncal-García et al. 2008; Dossa et al. 2008). Our results for all studied types of agroforestry plantations are inside this range. However, in our study, the percentage of the entire carbon stock comprised by SC (soil carbon) was 75 % for the *Inga* site, 65 % for the *Pinus* site and 67 % for the *Eucalyptus* site. With no trees present at coffee plantations, the ecosystem carbon stock is basically determined by soil compartment, whereas the carbon held in aboveground pools is not significant: it represented only 1 % of the total in the Sun coffee site.

However, comparing soil carbon stock from the available literature is not easy. This is due to inconsistencies in methodological approaches for soil carbon assessment (Nair et al. 2009a) and several factors conditioning carbon sequestration potential. Factors in soil

carbon sequestration potential and carbon turnover include soil properties like biological activity, microbial community composition, the molecular recalcitrance of organic matter, soil mineralogy, structure and texture, continuous temperature and humidity. In the case of loam texture with clay content < 20 % in soils containing low activity clay (Feller and Beare 1997), the stability of organo-mineral complexes is not obvious, just like resistance to soil erosion. Hence soil carbon needs to be enhanced by suitable management, which might be based on suitable soil cover care, coarser and more stable soil structure and organic matter supply.

Besides natural conditions (climate, topography, soil-forming substrate etc.) the type of agroforestry management also significantly affects the soil carbon sequestration process (von Lützov et al. 2006; Six et al. 2000; Schimel et al. 1994; Parton et al. 1987; Feller and Beare 1997). It includes the type, density and distribution of shading trees providing differently decomposing litter, as well as litter utilization either as mulch retained on the plantation or as a base material for compost production, compost management etc. In addition, management is often changed over time. Hence, time-sequence studies on soil carbon are rare in agroforestry systems (Nair et al. 2009b). Therefore, the data on carbon stock might be estimated as surrogates or indicators of carbon sequestration potential.

The benefit of agroforestry systems for reducing the CO<sub>2</sub> in the atmosphere is not only the direct near-term C storage in trees and soils but also the potential to offset immediate GHG emissions associated with deforestation and subsequent shifting agriculture (Dixon 1995). For growers, it is important to know how much wood they could produce in an agroforestry system and what they will do with it. In our study, we studied plantations shaded by introduced and local tree species. The wood of *Inga* trees is usually used as firewood by the plantation owners, and the wood of *Eucalyptus* spp. and *Pinus* spp. is sold as construction material. Both uses are very important because they reduce pressure on the rainforests from the local community.

The Peruvian state should improve the monitoring of agroforestry plantations, assessing their area and quality. This information would help to better understand the role of agroforestry in the landscape and make the related policy decisions more effective. It is important to continue to study introduced species in agroforestry plantations in South

America and evaluate more precise equations for local plantations. It is also essential to study the behaviour of *Eucalyptus* and *Pinus* tree species, especially in agroforestry systems in South America, because it is a new trend and information on the effects on plantations shaded by these species is insufficient.

## 7.7 Conclusions

Agroforestry systems play an important role in fixing carbon in agricultural landscapes that have lost their original forest cover. They are especially important in tropical areas that have been suffering over the past century from exceptional rates of change as they are degraded by human activities. The amount of sequestered carbon depends on the tree species used for shading. Our study, conducted in Peru, suggests that the coffee agroforestry plantations shaded by introduced tree species (*Pinus* spp., *Eucalyptus* spp.) perform better with regard to carbon storage than those shaded by the local tree genus *Inga*.

The results should be generally applicable to agroforestry coffee plantations with organic certification, where the coffee is grown at a comparable altitude, in a similar climate and with comparable soil conditions. The carbon sequestration potential can also be considered in REDD+ programs in which Peru could participate. However, it is also important to consider and evaluate the impact of introduced tree species on biodiversity, soil fertility, hydric function and appearance of coffee diseases in order to make sound management decisions on the tree species used for shading.

## 7.8 Acknowledgments

This study was mainly supported by the Internal Grant Agency (IGA 29/2011) of the Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University of Brno, Institutional research plan MSM6215648902 - Forest and Wood: the support of functionally integrated forest management and use of wood as a renewable raw material, project N°29/2011 and TA 02020867 Use of the new organic mineral stimulators and natural organic materials for revitalisation of the forest ecosystems influenced by biotic and abiotic impacts. Additional financial support was obtained by Jorge Mattos Olavarria, director of MapGeosolution and the POPRAR project CZ.1.07/2.2.00/28.0303. The authors are grateful to the Marín and Carrillo families and Ms. Selena Contreras for their help and for letting us conduct this study on their plantations.

## **7.9 References**

- Avila G et al (2001) Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestría en las Américas* 8: 32–35
- Barker TR et al (2004) Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology* 10, 545–562
- Batjes NH, Sombroek WG (1997) Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology* 3: 161–173
- Beer J, Muschler R, Kass D, Somarriba E (1998) Shade management in coffee and cacao plantation. *Agroforestry systems* 38: 139–164
- Brack A, (1999) Diccionario enciclopedia de plantas útiles del Perú. CBC—Centro de estudios regionales andino “Bartolome de las casa”, Cusco.
- Brown S (1997) Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO.
- Cairns MA et al (1997) Root biomass allocation in the world’s upland forests. *Oecologia* 111:1–11
- Campanha MM, Henrique R, Santos S et al (2004) Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais , Brazil. *Agroforestry Systems* 63:75–82
- Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns M et al (2005) Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87–99
- De Jong HJ, Soto-Pinto L, Montoya-Gomez G, Nelson K, Taylor J, Tipper R (1997) Forestry and agroforestry land- use systems for carbon mitigation: an analysis in Chiapas, Mexico. *Climate-change mitigation and European land-use policies*
- Dixon RK (1995) Agroforestry systems: sources of sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems* 31: 99-116
- Dossa EL, Fernandes ECM, Reid WS, Ezui K (2008) Above and belowground biomass, nutrient and carbon stock contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agroforestry systems* 72:103–115
- Egg A B (2012) *Ecología del Perú*. Bruno, Lima.
- Feller C, Beare MH (1997) Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79:69-116
- Fernandez S (2001) Deforestation, Coffee Cultivation and Land Degradation: The Challenge of Developing a Sustainable Land Management Strategy in Brazil’s

- Mata Atlântica Rainforest. Thesis, Lund University Master's Programme in Environmental Science
- Galloway G, Beer J (1997) Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central. Serie Técnica. Informe Técnico No. 285. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Häger A (2012) The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 86, 159–174
- Hamling CH, Salick J (2003) Yanasha Agriculture in the Upper Peruvian Amazon: Persistence and Change Fifteen Years Down. *Economic Botany* 57:163–180
- Hergoulac'h K, Blancart E, Skiba U, Hénault C, Harmand JM (2012) Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148: 102–110
- IPCC (2003) Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme and Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan. [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf\\_contents.html](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf_contents.html). Accessed 11 March 2013
- IPCC (2013) Climate change 2013. The Physical science basis. Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.  
[http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf)  
Accessed 23 July 2013
- Leff B, Ramankutty N, Foley JA (2004) Geographic distribution of major crops across the world. *Global biochemical cycles* 18: 1–27.
- Lewin B, Giovannucci D, Varangis P (2004) Coffee Markets New Paradigms in Global Supply and Demand. Agriculture and Rural Development Discussion, paper 3, The World Bank
- Meza A, Sabogal C, Jong W (2006) Rehabilitación de áreas degradadas en la Amazonia peruana Revisión de experiencias y lecciones aprendidas 1. CIFOR, 107 p.
- Muschler RG (1997) Efectos de sombra de *Erythrina poeppigiana* sobre *Coffea arabica* vars. Caturra y Catimor. Memorias del XVIII Simposium Latinoamericano de Caficultura, September 1997. San Jose, Costa Rica 157–162
- Michéli E, Schad P, Spaargaren O, Dent D, Nachtergale F (2006): World reference baser

- for soil resources. World Soil Resources Reports 103. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- MINAM (2010) Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. <http://cdam.minam.gob.pe/novedades/peruycambioclimaticoresumen.pdf>  
Accessed 2 August 2013
- Moguel P, Toledo VM (1999) Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation biology* 13: 11–21
- Nair PKR (1993) An introduction to agroforestry. Kluwer Academic Publisher.
- Nair PKR, Mohan KB, Nair VD (2009a) Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172: 10–23
- Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Solomon GH (2009b) Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science & Policy* 12:1099-1111
- Návar J (2009) Allometric equations for trees species and carbon stock for forests of north-western Mexico. *Forest Ecology and Management* 257:427–434
- Nogueira EM, Nelson BW, Fearnside PM (2005) Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. *Forest Ecology and Management* 208:261–286
- Noordwijk M, Rahayu S, Hairiah K, Wulan Y C, Farida A, Verbist B (2002) Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Science in China* 45:75–86
- Noponen MR, Hagggar JP, Edwards-Jones G, Healey JR (2013) Intensification of coffee systems can increase the effectiveness of REDD mechanisms. *Agricultural Systems* 119:1–9
- Oliveira PJC et al (2007) Land-Use Allocation Protects the Peruvian Amazon. *Science* 317:1233-1236
- Parton WJ, Schimel DS, Cole CV, Ojima DS (1987) Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grassland. *Soil Science Society of America Journal* 51:1173-1179.
- Perfecto I, Rice RA, Greenbergr R and Van der Voort ME (1996) Shade Coffee: Disappearing Refuge for Biodiversity. *Bioscience* 46:596–608
- Ponce MG et al (2008) Plan de Desarrollo Concentrado de Villa Rica 2009–2018.



Municipalistas distrital de Villa Rica, provincia Oxapampa, Región Pasco

Ratkowsky DA (1990) *Handbook of Nonlinear Regression*. Marcel Dekker, New York, NY

Rhoades CC, Eckert GE, Coleman DC (1998) Effect of Pasture Trees on Soil Nitrogen and Organic Matter: Implications for Tropical Montane Forest Restoration. *Restoration Ecology* 6: 262–270

Rice RA, Ward J (1996) Coffee, conservation and commerce in the western hemisphere. The Smithsonian Migratory Bird Center and the Natural Resources Defense Council. Washington DC

Rice RA, Ward J (2008) Agricultural intensification within agroforestry: The case of coffee and wood products. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128:212–218

Roncal-García S, Soto-Pinto L, Castellanos JA, Ramírez NM, Jong B (2008) Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia* 33:200–206.

Roy J, Saugier B, Mooney HA (2001) *Terrestrial global productivity*. Academic, San Diego

Ruark GA, Schoeneberger MM, Nair PKR (2003) *Agroforestry—Helping to Achieve Sustainable Forest Management*. UNFF (United Nations Forum for Forests) Intersessional Experts Meeting on the Role of Planted Forests in Sustainable Forest Management, New Zealand. <http://maf.govt.nz/unff-planted-forestry-meeting> Accessed 2 August 2013

Saint-André L et al (2005) Age-related equations for above- and below- ground biomass of *Eucalyptus* hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management* 205:199–214

Schimel D (1994) Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global biochemical cycles*: 8 (3): 279-293

Schmitt-Harsh M et al (2012) Carbon stock in coffee agroforests and mixed dry tropical forests in the western highlands of Guatemala. *Agroforestry systems* 86:141–157

Schroth et al. (2002) Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management* 163: 131–150

Sequeira W, Gholz HL (1991) Canopy structure, light penetration and tree growth in a slash pine (*Pinus elliottii*) silvo-pastoral system at different stand configurations

- in Florida. *The Forestry Chronicle* 67:263–267
- Segura M, Kanninen M, Suárez D (2006) Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforestry systems* 68:143–150
- Shaller M, Götz S, Beer J, Jimenez J (2003) Species and site characteristics that permit the association of fast-growing trees with crops: the case of *Eucalyptus deglupta* as coffee shade in Costa Rica, *Forest Ecology and Management* 175:205–215
- Silva FG, Barrichelo LEG, Shimoyama VRS, Wiecheteck MSS (1994) Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus patula* var. *tecunumanii* visando a produção de celulose kraft e pasta mecânica. *O Papel* 55:32–35
- Six J, Elliott ET, Paustian K (2000) Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32:2099-2103.
- Smith J, Scherr SJ (2003) Capturing the Value of Forest Carbon for Local Livelihoods. *World Dev.* 31:2143–2160.
- Soto-Pinto L, Perfecto I, Castillo-Hernandez J, Caballero-Nieto J (2000) Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico
- Soto-Pinto L, Anzueto M, Mendoza J, Ferrer GJ, Jong B (2010) Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 78:39–51.
- Stephen GP (2005) Population land use and deforestation in the pan Amazon basin: a comparison of Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Peru and Venezuela. *Environment, Development and Sustainability* 7:23–49
- The World Bank (2011) Estimating the Opportunity Costs of REDD+
- Vásquez EH, Ángeles GVC, del Valle JRE, Ortiz GR, Velasco VAV (2007) Captura de carbono por *Inga jinucul* Schltdl. en un sistema agroforestal del café bajo sombra. *Revista Mexicana de ciencias forestales* 3(9):11–20
- von Lützow M, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, Matzner E, Guggenberger G, Marschner B, Flessa H (2006) Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science* 57:426-445.
- Walkley A, Black IA (1934) An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modifications of the chromic acid titration

EHRENBERGEROVÁ, L., CIENCIALA, E., KUČERA, A., GUY, L., HABROVÁ, H. (2016) Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems*. 90: 433–445. ISSN 0167-4366.

method. *Soil Science* 37: 29–38.

Wintgens JN (2004) *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers*. Druckhaus Darmstadt GmbH, Darmstad.

Yeates GW, Hawke MF, Rijkse WC (2000) Changes in soil fauna and soil conditions under *Pinus radiata* agroforestry regimes during a 25-year tree rotation. *Biol. Fertil. Soils* 31:391–406

## **8 Microclimatic differences between shaded and non-shaded parts of a coffee plantation in the Peruvian Amazon**

**Authors:** L. Ehrenbergerová\*, M. Šenfelldr, H. Habrová

Department of Forest Botany, Dendrology and Geobiocoenology

Mendel University in Brno, Zemědělská 3, Brno 61 300, Czech Republic

### **8.1 Abstract**

The objective of this work was to evaluate the effects of shade on air and soil temperature, as well as on air humidity and water availability in a coffee plantation. The study was conducted in the Pasco region, Peru. Two sites were selected for measurement: one shaded by *Inga* spp. and the other non-shaded. The air temperature and air humidity at height 2 m; soil temperature at the depth of 10 cm and soil water availability at the depths of 10 and 40 cm were measured during three-year period. Shading reduced the mean air temperatures by  $0.4 \pm 0.04$  °C and increased the air humidity by  $3.9 \pm 0.4$  % compared to the non-shaded site. Soil temperature was lower on the shaded site by  $1.7 \pm 0.3$  °C compared to the non-shaded site. We recorded drier soil conditions at the shaded site, where the dry season (defined in terms of soil water availability) always starting earlier and lasted longer. Our results showed that shaded trees can protect crops in areas subjected to temperature climate extremes. On the other hand, the high air humidity during the wet season could be problematic because of the increased risk of coffee shrub fungal diseases.

### **8.2 Keywords**

*Coffea arabica*, agroforestry system, microclimate, soil water availability, air humidity, soil temperature

### **8.3 Acknowledgment**

To the members of Marín family for their help and for letting us conduct this study on their plantation; to Jorge Mattos Olavarria, general manager of MapGeosolution for financial support; to Internal Grant Agency (IGA 29/2011) of the Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University in Brno; to POPRAR project CZ.1.07/2.2.00/28.0303, for financial support and also to Jonathan Rosenthal for English correction.

## 8.4 Introduction

There is substantial concern about the impacts of climate change on agricultural production at the worldwide scale (Fischer et al. 2005). A large fraction of the world's food is grown in the tropics, and climate variability plays an important role in determining ecosystem productivity there (Slingo 2005). For this reason, it is important to study agroforestry systems, which can provide a non-destructive and financially accessible way to protecting crops from future changes, especially in areas with limited options (Lin 2007).

*Coffea arabica* L. (hereinafter “coffee”) represents an important global commodity in many developing countries (DaMatta 2004). *C. arabica* is the most widespread species of the genus *Coffea* and is cultivated under various management schemes from heavy shade to full sun (Siles et al. 2010). Traditionally, it is grown under the shade of trees, forming a typical agroforestry system (Wintgens 2004), in which trees or shrubs are grown around or among crops (Nair 1993). Such an agroforestry system has many advantages with respect to coffee grown in full sun, including providing a refuge for forest biota (Perfecto et al. 1996) reducing pressure for further forest conversion to agriculture, serving as a source of fuel-wood and construction material (Wintgens 2004), stabilizing microclimatic conditions (Lin 2007; Siles 2010), and protecting the soli (Wintgens 2004). On the other hand, shade trees may compete with coffee for resources such as light, water and soil nutrients (Siles 2010). Another problem presented by the presence of shade trees is a reduction of air movement and an increase in humidity, which may favour fungal diseases (Smith 1981).

Nevertheless, the use of agroforestry systems is an economically feasible way to protect crop plants from extremes in microclimate and soil moisture and should be considered as a potential adaptive strategy for farmers in areas that will suffer from extremes in climate (Lin 2007). This would seem to be particularly true of Arabica coffee, given that it is native to Ethiopian tropical forests at altitudes of 1600–2800 m, where air temperature shows little seasonal fluctuation. Indeed, the optimal temperature range for Arabica coffee is 18–21 °C (Alegre 1959), and a reduction of high temperatures can be favourable for coffee development.

In fact, shade trees in coffee plantations have been shown to improve microclimatic conditions through a reduction of air and coffee leaf temperature extremes (Siles 2010). In particular, shade cover affects fluctuations more dramatically than it affects mean values of climatic and soil moisture measurements (Lin 2007). Moreover, the presence of shade cover in agroforestry systems is capable of reducing overall evaporative demand from soil evaporation and coffee transpiration (Lin 2010). Indeed, the change in micrometeorological factors resulting from the removal of shade trees could have an important impact on the physiology of the crop (Barradas and Fanjul 1986). On the other hand, it is very important to regulate the quantity of shade, because too much can result in a very humid microclimate conducive to higher incidence of fungal diseases such as leaf rust (caused by *Hemileia vastatrix*) (Avelino et al. 2007).

Coffee is a very important export crop in Peru, and its production is still growing there (Junta nacional del café). Peruvian coffee plantations are situated in the Amazonian mountain rain forest zone. Climate change is expected to modify the frequency, intensity and duration of extreme events in many tropical regions, and there are indications that the central-eastern Amazonia region may experience rainfall deficiency, as well as warming of up to 6–8 °C in the future (Marengo 2011). This is likely to cause difficulties for coffee plantations there. Already, the drought in Amazonia in 2005 has provided a good example of climate extremes at the seasonal time scale (Marengo 2011).

In the face of increasing climate instability, it is necessary to find sustainable and financially viable coping strategies for small farmers who have no access to technological improvements (Lin 2007). Moreover, despite the importance of Peruvian Amazonia as a coffee-growing region, there is a lack of information about the microclimatic situation on the coffee plantations there. Both from the crop production and ecological points of view, knowledge of the microclimatic changes in shaded systems through the crop cycle, and in different periods of the year is needed, in order to establish agronomically and ecologically sustainable practices (Morais et al. 2006). For this reason, we aimed to examine: (1) the effect of shade on soil and air temperatures and humidity on a coffee plantation; and (2) the ability of shade trees to mitigate temperature and soil water availability seasonal extremes. For the study, the Ave Fénix coffee plantation in the town of Villa Rica, Peru was chosen. This plantation is cultivated partly as an agroforestry

system shaded by *Inga* spp. and partly without shade, allowing us to isolate the effects of shading.

## 8.5 Materials and Methods

This study was conducted near the town of Villa Rica, in the Pasco region, Peru. Villa Rica is the Peruvian centre of coffee cultivation. The average annual rainfall in this tropical humid mountain forest zone is 1,590 mm, and the average annual temperature is 17.8 °C (Ponce et al. 2008). According to the Food and Agriculture Organization (FAO), soils in this region are dystric cambisols (Michéli et al. 2006). The main economic activity there is agriculture, and the landscape surrounding Villa Rica is characterised by shaded coffee plantations with some cattle farming.

Ave Fénix (AF) plantation (10°36'37''S; 75°13'25''W) was chosen for this study both because it allows comparison of shaded and unshaded coffee cultivation and because its management and plantation structure are typical of the region. The plantation is characterised by broken topography, with an average slope of 18.2°. In the first 30 cm, the soil texture is classified as clay loam, with the soil reaction extremely acid and the amount of organic carbon very high (Ehrenbergerová et al. 2016). We found four coffee varieties on the plantation: Typica, 'Catimor', 'Caturra' and 'Catuai'. The plantation is divided into two sites: a shaded site (7.37 ha) and a non-shaded site (0.98 ha). The dominant shade tree genus in the shaded site is *Inga* spp. (*Inga adenophylla* Pittier, *I. densiflora* Bentham, *I. edulis* C. Marius, *I. feuillei* DC., *I. velutina* Willdenow), but other trees include as *Pinus oocarpa* D. Don., *Pinus tecunumanii* (Schwd) Equiluz & Perry), and *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) C. Page (Tab. 3). Indeed, in the shaded site, 54 shade tree species were identified, with the tree density being 176 trees ha<sup>-1</sup> and mean tree height 13.7 ± 2.4 m.

We measured microclimatic conditions in both the shaded site and the non-shaded site. The sensor set configuration was the same in both places. The air temperature and air humidity at a height of 2 m were measured using a Minikin RTD (EMS, Brno, Czech Republic) with sensor accuracy ± 0.2 °C and ± 2 %. Soil temperature at the depth of 10 cm was measured by MicroLog T3 (EMS, Brno, Czech Republic) with accuracy ± 0.2 °C. Soil water availability was monitored by four gypsum block sensors (GB2,

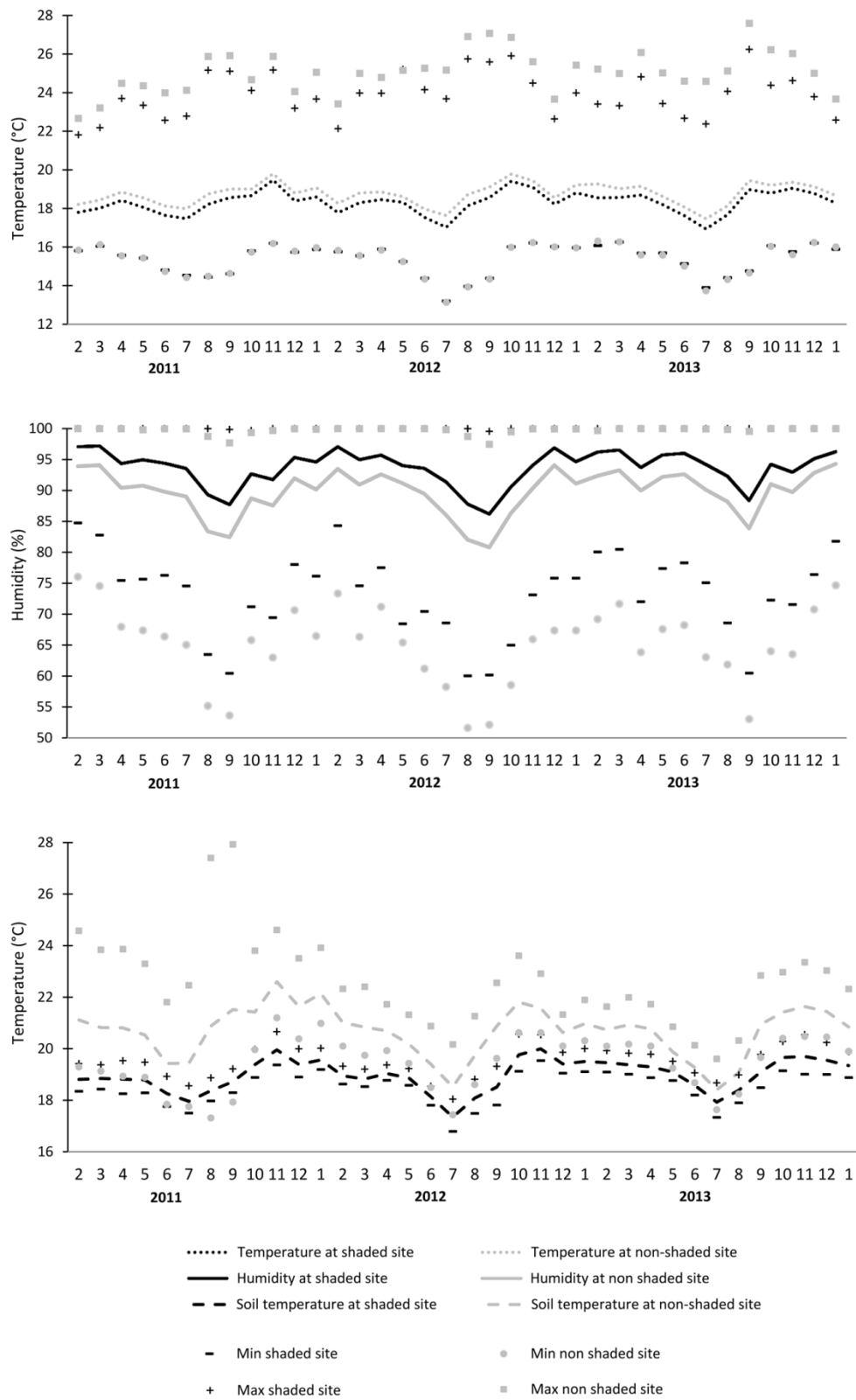
Delmhorst Inc., USA), connected to the data logger (MicroLog SP, EMS, Brno, Czech Republic), with accuracy better than 2%. Soil potential sensors were buried at depths of 10 and 40 cm within the root zone of coffee plants. All microclimatic data were recorded every hour in the data-loggers memory. The microclimatic measurements were conducted from February 2011 to January 2014. Soil water availability data were further interpreted according to generally accepted hydro-limit values (e.g. Čermák & Prax 2001). Therefore, the values 0.1–4 bar represent “easily available water” in soil, and values between 4.1–10 bars represent “reduced soil water availability“. The values higher than 10 bars characterise “hardly available water” in soil.

## **8.6 Results and Discussion**

### **8.6.1 Air Temperature**

The average annual air temperature at the shaded site was  $18.3 \pm 0.3$  °C and at the non-shaded site it was  $18.8 \pm 0.3$  °C (Fig 1). At both sites, the coldest month during the study period was July while the warmest was November (Fig 1 and 3). The monthly mean air temperatures during the whole experimental period was higher at the non-shaded site by  $0.4 \pm 0.04$  °C, which is in accordance with the study of Morais (2006) which found shade to reduce the mean air temperatures, during most of the period it covered. Minimal air temperature at the shaded site was 9.9 °C (20.7.2012 at 7 a.m.) and at the non-shaded site it was 9.7 °C (23.7.2012 at 7 a.m.). The maximal temperature was 30.8 °C at the shaded site (5.10 2011 at 4 p.m.) and 35.6 °C at the non-shaded site (20.10.2013 at 1 p.m.). The climatic data were measured for 26,282 hours. Within this period, the air temperature was non-optimal for coffee (higher than 21.1 °C) at the shaded site for 4,834 hours and at the non-shaded site for 6,186 hours. The curves of average monthly temperatures showed fluctuations in the range 17–19.8 °C at both sites during the year (Fig 1 and Fig 3).

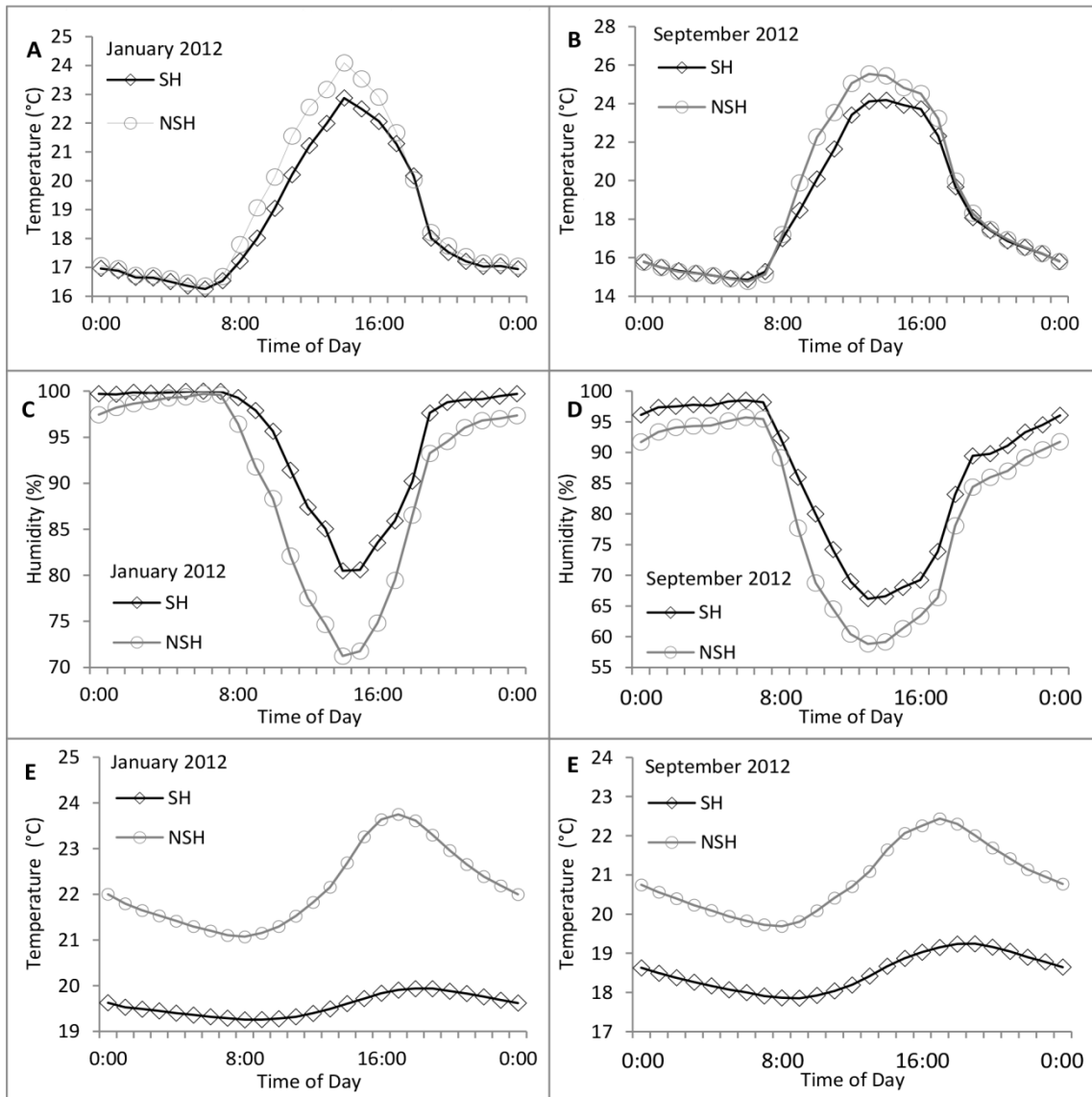




**Fig 1** Mean monthly courses of air and soil temperatures and humidity for years 2011–2013 at shaded and non-shaded sites.

The comparison of daily microclimate fluctuations for wet and dry months (January and September) of 2012 is shown in the Fig 2. The shaded site exceeded the coffee shrub optimal temperature of 21 °C in the wet season between 12 a.m. (or 11 a.m. in the dry season) and 6 p.m., whereas the non-shaded site exceeded this optimum between 11 a.m. (or 10 a.m. for the dry season) and 6 p.m., thus for one hour more than the shaded site. The difference between hourly average maximum and minimum air temperatures was  $6.6 \pm 0.5$  °C at the shaded site and  $7.7 \pm 0.5$  °C at the non-shaded site in the wet season and  $9.3 \pm 0.8$  °C at the shaded site and  $10.8 \pm 0.9$  °C at the non-shaded site in the dry season.

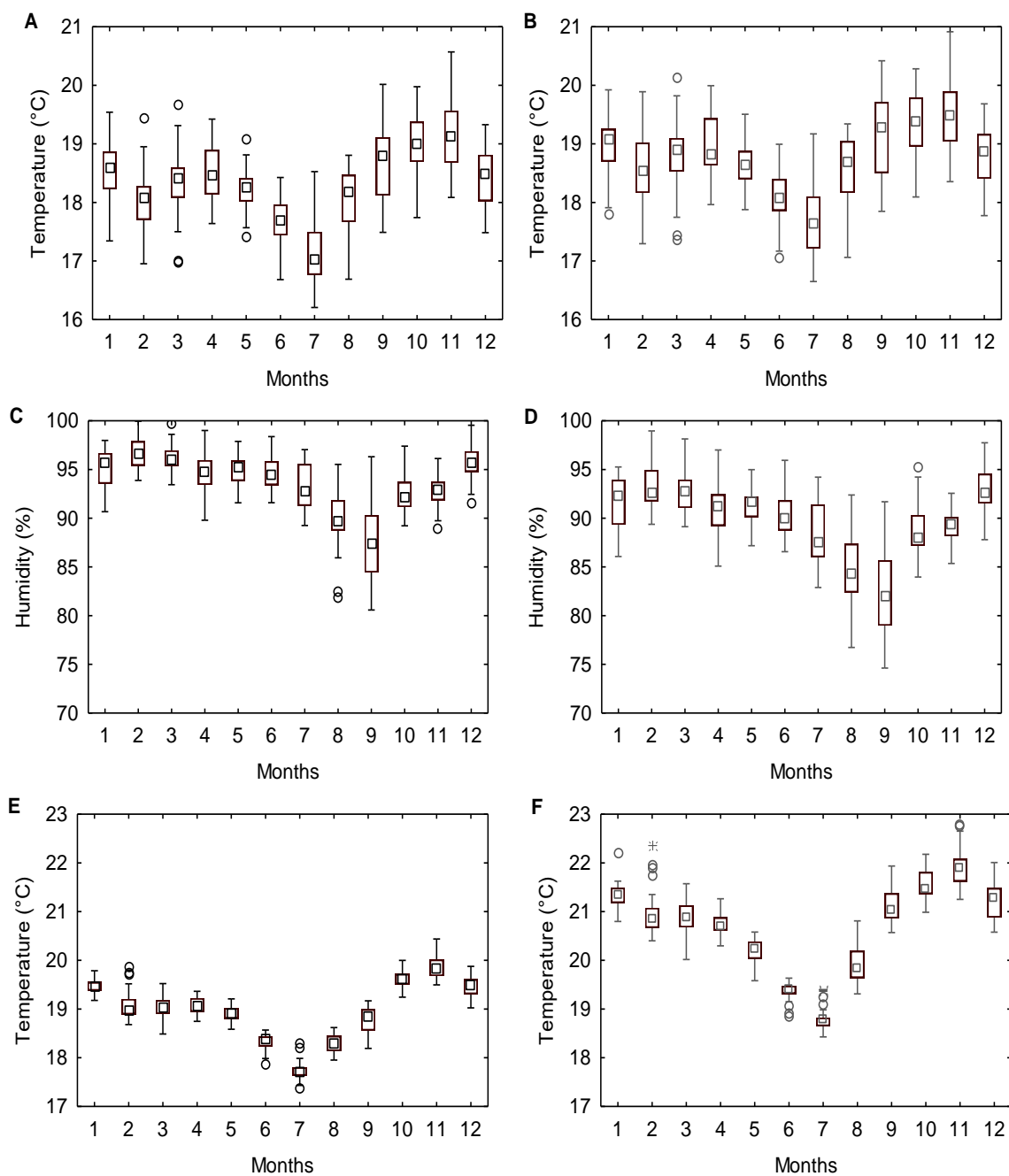
The average minimal daily air temperature was almost the same during the wet and dry months (January and September 2012) at both sites and was a little less than coffee's optimal range (Alegre 1959). However, the average maximal daily air temperature was higher at the non-shaded site, and at both studied sites, it was out of coffee's optimal range (Alegre 1959) (Fig 2). Our results differ from the results of other authors (Lin 2007; Barradas & Fanjul 1986) for which low shaded sites had higher temperatures during the day and lower temperatures during the night. Lin (2007) also found that air temperature fluctuations increased significantly with decreasing shade cover, which is consistent with our results. With respect to air temperature, our shaded site was preferable for coffee plants because the temperatures were not so high and do not change as much. In particular, it can be assumed that the coffee plants are exposed longer to non-optimal temperatures at the non-shaded site than at the shaded site.



**Fig 2** Site averages of air temperature (A, B), air humidity (C, D) and soil temperature (E, F) by time of day, separated into wet (January 2012) and dry (September 2012) months. SH – shaded site, NSH – non-shaded site.

## 8.6.2 Air humidity

The lowest humidity for both studied plantations was in September and the highest from December to March (Fig 1). During the whole measurement period, the air humidity was higher by  $3.9 \pm 0.4$  % at the shaded site than the non-shaded site (Fig 1 and Fig 3). The average annual air humidity at the shaded site over the three measured years was  $93.7 \pm 1.4$  % and at the non-shaded site it was  $89.8 \pm 1.8$  %. The lowest humidity at the shaded site was 39 % (5.9.2012 at 4 p.m.) and at the non-shaded site it was even lower 34% (5.9.2012 at 3 p.m.). The hourly mean air humidity was also higher at the shaded site for both wet and dry months. As in the case of air temperature, for air humidity, the daily fluctuations were smaller (Fig 2) at the shaded site, corresponding with the findings of Lin (2007). The higher humidity at the shaded site was in accordance with Barradas & Fanjul (1986), who explained it by higher input of water vapour into the system, produced by a much higher transpiration rate of canopy trees pumping water from lower soil layers. This phenomenon is favourable for coffee shrubs during the dry season but can be problematic during the wet season because of reduced air movement and increased air humidity, and the resulting increased risk to the coffee shrubs from fungal diseases (Avellino et al. 2007; Smith 1981).



**Fig 3** Annual dynamics of daily air temperature, air humidity and soil temperature for 2011–2013 period: (A) air temperature at shaded site; (B) air temperature at non-shaded site; (C) humidity at shaded site; (D) humidity at non-shaded site; (E) soil temperature at shaded site; and (F) soil temperature at non-shaded site

### 8.6.3 Soil temperature

The average monthly soil temperature for years 2011–2013 was  $19 \pm 0.3$  °C at the shaded site and  $20.7 \pm 0.5$  °C at the non-shaded site. The lowest soil temperature at both sites was in July and the highest was between October and November (Fig 1 and 3). The minimal soil temperatures were almost the same at both studied sites: 15.1 °C at the shaded site (23.7.2012 at 10 a.m.) and 15 °C at the non-shaded site (13.9.2011 at 6 a.m.). Maximal soil temperatures reached just 21.9 °C (9.11.2011 at 6 p.m.) at the shaded site but 34.1 °C at the non-shaded site (30.8.2011 at 1 p.m.). The average monthly soil temperatures were lower at the shaded site by  $1.7 \pm 0.3$  °C than the non-shaded site (Fig 1 and Fig 3), which agrees with the results of other studies (Morais et al. 2006; Barradas and Fanjul 1986; Suárez de Castro et al. 1961).

The non-shaded site had higher soil temperatures during the day and also during the night in the both wet and the dry months. The soil temperatures in both compared months (January and September 2012) fluctuated more during a 24-hour period at the non-shaded site (Fig 2). The average difference between daily maximum and minimum soil temperatures was  $0.7 \pm 0.2$  °C at the shaded site and  $2.7 \pm 0.7$  °C at the non-shaded site in the wet season and  $2.5 \pm 0.4$  °C at the shaded site and  $1.2 \pm 0.2$  °C at the non-shaded site in the dry season. The average hourly soil temperature fluctuation was almost unnoticeable at the shaded site but pronounced at the non-shaded site during both wet and dry months (Fig 2). Maximum ambient midday soil temperatures at 10 cm depth were lower in the shaded location.

Our results are in accord with the fact that soil stabilizes the local thermal balance, absorbing a considerable quantity of heat during the day and returning it to the atmosphere at night. In a vegetated area, this stabilization is more efficient, with less thermal oscillation, because during the day the vegetation protects the soil surface against direct radiation that causes excessive heating, and during the night it minimizes thermal radiation loss (Rich et al. 1993). This implies that soil without cover is heated much more and shows greater fluctuation, which can limit coffee root vitality. It is necessary to study more about the reaction of coffee roots to temperature, as soil temperature represents an important root growth limiting factor (Pregitzer et al. 2000).

#### 8.6.4 Water availability

Tab 1 and Fig 4 indicate drier soil conditions at the shaded site than the non-shaded site during the dry season, whereas during the wet season the water was “easily available” at both sites. The dry season, characterized by “hardly available water,” started in June and finished in October in all study years. It always started earlier and lasted longer (see Tab 1, Fig 4) at the shaded site. At the non-shaded site, the soil was drier at the depth of 10 cm, whereas at the shaded site, the soil depth layer 40 cm was drier (Tab 1).

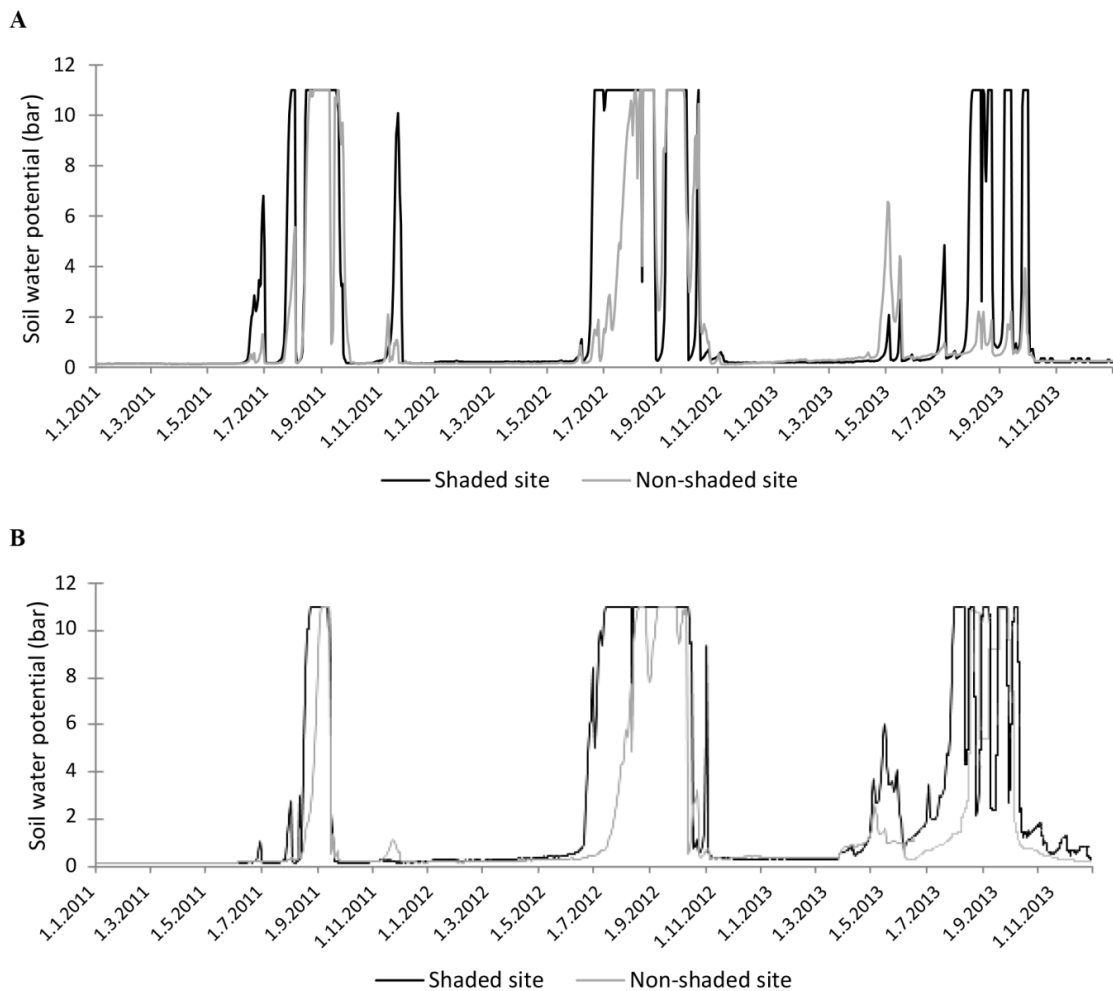
**Tab 1 The number of days classified according to their daily average soil water availability values to three soil water availability categories (“easily available water” = 0–4 bars, “reduced soil water availability“ = 4.1–10 bars, “hardly available water” >10 bars) for two SWP measurements depths, 10 cm and 40 cm.**

SWP (bar)	shaded		non-shaded	
	10 cm	40 cm	10 cm	40 cm
0 - 4	898	869	976	1003
4.1 - 10.0	25	31	22	7
>10	166	172	74	57

The fact that the soil conditions were drier at the shaded site than the non-shaded site differs from results of other published studies. For example, Morais et al. (2006) concluded that soil moisture at 0–10 cm depth was higher in shade. Suárez de Castro et al. (1961) reported that in El Salvador during the driest months, soil moisture was higher in the shaded areas. Higher soil moisture in shaded places has been explained by the litter layer reducing evaporative loss of soil water, while the shading decreased the energy available for evaporation (Beer 1992). Another possible explanation is that shade increase moisture input through horizontal interception of mist or clouds (Willey 1975).

We believe that in our study, the reason that the dry season always started earlier and lasted longer at the shaded site is that shade tree roots exhausted a significant part of the soil water during the dry season (Siles 2010). This would suggest that the shade trees had a competitive effect on the coffee plants in terms of water availability. Moreover, at the non-shaded site, the soil was drier at the depth of 10 cm, while at the shaded site the soil at 40 cm was drier. These may be explained by the non-shaded site being dried more by the sun whereas the shaded site was dried more by tree roots.

Our outcome partly supports the hypothesis that shade trees in agroforestry systems help coffee shrubs in areas where they suffer from climate extremes. In particular the shade trees helped reduce the fluctuations of air temperature, air humidity and soil temperature. Thus, as shown by Lin (2007) they thus may offer an effective coping mechanism to implement in agricultural areas that suffer from climate extremes. Moreover, shaded agroforestry systems thus may help in accommodating climate change. Recent examples of extreme climate in many areas of Latin America point to the need for such adaptation in the face of changing climate. However, as our study also showed, water competition between shade trees and coffee shrubs could be problematic. Therefore, the water conditions of each plantation should be evaluated, and the appropriate species and density of shading trees should be used based on their water requirements.



**Fig 4** Soil water availability curves (bar) at shaded and non-shaded sites at depths (A) 10 cm and (B) 40 cm.



## **8.7 Conclusions**

1. The trees in agroforestry systems help to reduce the fluctuations in air and soil temperatures, as well as air humidity.
2. The monthly mean air and soil temperatures during the whole experimental period were higher at the non-shaded site.
3. The monthly mean air humidity values during the whole experimental period were lower at the non-shaded site.
4. The dry season always started earlier and lasted longer at the shaded site.

## **8.8 References**

- Alègre C. (1959) Climats et caféiers d'Arabie. *Agronomie Tropicale* 14:23–58
- Avelino J, Cabut S, Barboza B, Barquero M, Alfaro R, Esquivel C, Durand JF, Cilas C (2007) Topography and crop management are key factors for the development of American leaf spot epidemics on coffee in Costa Rica. *Phytopathology* 97: 1532–1542
- Barradas VL, Fanjul L (1986) Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 38:101–112
- Beer JW (1992) Production and competitive effects of the shade trees *Cordia alliodora* and *Erythrina poeppigiana* in an agroforestry system with *Coffea arabica*. Dissertation, University of Oxford
- Čermák J, Prax A (2001) Water balance of a Southern Moravian floodplain forest under natural and modified soil water regimes and its ecological consequences. *Annals of Forest Science* 58:15-29
- DaMatta FM (2004) Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research* 86:99–114
- Ehrenbergerová L, Cienciala E, Kučera A, Guy L, Habrová H (2016) Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry Systems*. 2016. sv. 90, s. 433--445. ISSN 0167-4366.
- Fischer G, Shah M, Tubiello FN, van Velhuizen H (2005) Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990-2080.

- Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences 360:2067–2083
- Junta nacional del café: an annotated database.  
<http://juntadelcafe.org.pe/publicaciones/produccion-de-cafe-entre-los-anos-1999-y-2012>. (Accessed June 29, 2015).
- Kushalappa AC, Akutsu M, Ludwig A (1983) Application of survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix* in predicting coffee rust infection rates. *Phytopathology* 73:96–103
- Lin BB (2007) Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144:85–94
- Lin BB (2010) The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:510–518
- Michéli E, Schad P, Spaargaren O, Dent D, Nachtergale F (2006) World reference base for soil resources. *World Soil Resources Reports* 103. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Marengo JA (2011) Future climate change scenarios and their application for studies of impacts, vulnerability, and adaptation in Brazil IN *Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina. Libro de actas del Seminario Internacional sobre Adaptación al Cambio Climático: el Rol de los Servicios Ecosistémicos (SIAASE 2008), Serie técnica. Manual técnico.*
- Morais H, Caramori PH, Maria A, Ribeiro DA, Gomes JC (2006) Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41:763–770
- Nair PKR (1993) *An introduction to agroforestry* Kluwer Academic Publisher.
- Perfecto I, Rice RA, Greenberg R, Van der Voort ME (1996) Shade Coffee: Disappearing Refuge for Biodiversity. *Bioscience* 46:596–608
- Ponce MG (2008) *Plan de Desarrollo Concentrado de Villa Rica 2009–2018. Municipalidad distrital de Villa Rica. provincia Oxapampa – Región Pasco.*
- Pregitzer KS, King JS, Burton AJ, Brown SE (2000) Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytologist* 147:105–115
- Rich PM, Clark DB, Clark DA, Oberbauer SF (1993) Long-term study of solar radiation

*EHRENBERGEROVÁ, L., ŠENFELDR, M., HABROVÁ, H. Microclimatic differences between shaded and non-shaded parts of a coffee plantation in the Peruvian Amazon. Experimental agriculture. Submitted 2016*

regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 65:107-127

Siles P, Harman JM Vaast P (2010) Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems* 78:269–186

Slingo JM, Challinor AJ, Hoskins BJ, Wheeler TR (2005) Introduction: food crops in a changing climate. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 360:1983–1989

Smith ESC (1981) The interrelationships between shade types and cocoa pest and disease problems in Papua New Guinea. In Beer J (1987) Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cocoa and tea. *Agroforestry Systems* 5:3–13

Suaréz de Castro, F., Montenegro L, Aviles PC, Moreno M, Bolaños M (1961) Efecto del sombrío en los primeros años de vida de un cafetal. *Cenicafé* 2:334-355

Wintgens JN (2004) *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

## **9 Identifying key factors affecting coffee leaf rust incidence in agroforestry plantations in Peru**

**Authors:** L. Ehrenbergerová<sup>1\*</sup>, A. Kučera<sup>1</sup>, E. Cienciala<sup>2</sup>, J. Trochta<sup>3</sup>, D. Volařík<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mendel University in Brno, Zemědělská 3, Brno 61 300, Czech Republic

<sup>2</sup>IFER – Institute of Forest Ecosystem Research, Areál 1. jílovské a. s., Jílové u Prahy  
254 01, Czech Republic

<sup>3</sup> The Silva Tarouca Research Institute, Department of Forest Ecology, Lidická 25/27,  
Brno 602 00, Czech Republic

### **9.1 Abstract**

Coffee leaf rust (CLR), caused by *Hemileia vastarix*, is one of the most serious diseases of coffee plantations and cause great losses in coffee production. We aimed to examine coffee varieties, shade, age of coffee plants, coffee plant density and soil properties in relation to CLR infection. To do this, we established a total of 75 plots in three agroforestry coffee plantations in the central Peruvian Amazon. We gathered data there in 2011 (dry season) on the presence/absence of CLR; coffee variety; age and density of coffee plants, and also took hemispherical photographs to determine canopy openness. In 2014 (wet season), we again gathered data on the same variables. In 2012, we collected soil samples from a subset of the plots. At all plantations, coffee variety had a significant effect on CLR incidence, with the ‘Catimor’ variety infected less frequently than ‘Caturra’. Coffee plant age had a significant positive effect on CLR incidence. Increasing coffee density also increased CLR incidence for some of the studied plantations/seasons. Comparing those plots from which data were collected in the dry and wet seasons, we found that CLR presence was significantly higher in the wet season. The effect of shade on CLR incidence was not clear. ‘Catimor’ and ‘Caturra’ varieties showed opposite trends of CLR incidence in response to shade quantity in most cases (‘Caturra’ variety CLR incidence was decreasing with shading increase and ‘Catimor’ CLR incidence decreasing with decreasing shading). Finally, the soil properties did not affect CLR incidence.

### **9.2 Keywords**

Coffee age; coffee plant density; coffee variety; shade trees; soil properties; microclimate

conditions.

### **9.3 Introduction**

One of the most serious common coffee diseases is coffee leaf rust (CLR) (Kushalappa 1989; Prakash et al. 2004; Wintgen 2004), which is caused by the fungus *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. CLR, by damaging leaves and ultimately causing them to fall, resulting in loss of physiological activity in the affected branches and thereby diminished coffee crop yield (Wintgens 2004). The disease is prevalent in the major coffee-producing countries worldwide (Wintgens 2004). In South America, CLR was first identified in Brazil in 1970 and then spread to other countries. The recent (2012–2013) outbreak of this disease lowered harvests by 10–70% in several Latin American countries, including Peru, where coffee is the key agricultural export (JNC 2014).

‘Catimor’ and ‘Caturra’ are among the most popular coffee varieties in South America. The ‘Caturra’ variety is well-adapted to Colombia and Central America, where it has been the subject of high-density coffee-growing practices (Wintgens 2004). However, a major problem of this variety is its susceptibility to all the main coffee diseases and pests (Wintgens 2004). Developing leaf rust-resistant varieties has been a breeding objective of the highest priority in many countries (Prakash et al. 2004; Avellino et al. 2015), and one of the results was the ‘Catimor’ variety, a coffee hybrid that resulted from a cross of ‘Caturra’ and the Timor hybrid, and which should be resistant to the prevailing strains of CLR (Kushalappa 1989; Wintgens 2004). ‘Catimor’ is now widely distributed in the coffee-growing countries, not only in Latin America but also in Africa, Asia and Oceania (Silva et al. 2006). However in Peru the coffee varieties susceptible to CLR are still planted on approximately 95% of the area of coffee plantations (JNC 2014).

Coffee is traditionally grown under the shade of trees, forming a typical agroforestry system (Wintgens 2004). This system has many advantages compared to coffee grown in full sun, including providing a refuge for forest biota (Perfecto et al. 1996; Moguel and Toledo 1999), reducing pressure for further forest conversion to agriculture (Noponen et al. 2013), serving as a source of fuel-wood and construction material (Rice and Ward 2008), stabilizing microclimatic conditions (Lin 2007; Siles et al. 2010), and protecting soil (Siebert 2002). On the other hand, shade trees may compete with coffee for resources

such as light, water and soil nutrients (Siles et al. 2010).

Influence of the tree shade on CLR is centre subject of controversy (Avelino and Rivas 2013). Increase in CLR incidence with increasing shade (Monterroso 1999) was one of the reasons for shade elimination in numerous plantations in South and Central American and Caribbean countries in the 1990s (Rice and Ward 1996). However, Eske et al. (1982) reported the opposite trend, i.e., CLR incidence decreasing with increasing shade. Various authors recommend intermediate levels of shading (Eske et al. 1982; Kushalappa 1989; Staver et al. 2001). On the other hand, Matovu et al. (2013) reported that low and medium shade intensity had the highest CLR incidence followed by high and no-shade levels. Some studies have even not detected any dependence between CLR and shade (Soto Pinto et al. 2002; Salgado et al. 2007).

The effects of other plant and environmental variables on susceptibility to CLR have also been examined. Avelino et al. (1991) found older coffee leaves to be more vulnerable to CLR. Additionally, CLR incidence is generally higher in high-yielding plants (Zambolim et al. 1992; Avelino and Savary 2002; Wintgens 2004; Avelino et al. 2006; Lopez-Bravo et al. 2012) and in plantations with high coffee plant density (Kushalappa 1989).

The ideal type of soil for coffee growing is slightly acidic (4.5–6), deep, permeable, and porous (Wintgens 2012). Lamouroux et al. (1995) found that CLR was generally associated with pH values that overlap with the lower part of this range (<4.7) and also with poor soil structure (especially soils with organic matter content < 3%). Avelino et al. (1998) and Pellegrin et al. (1995) noted that a low soil pH combined with high yield can also predispose coffee shrubs to the CLR infection.

Seasonal fluctuation in temperature and rain distribution also influences the incidence of CLR. Optimum temperatures for uredospore germination and infection range from 21 °C to 25 °C (Nutman et al. 1960; Kushalappa et al. 1983). High temperatures are restrictive to coffee rust growth, with germination inhibited above 28–30 °C (Rayner 1961; Nutman et al. 1960; Kushalappa et al. 1983) and lesion growth suppressed after several exposures to 40 °C (Ribeiro et al. 1978). In high altitude regions, coffee rust epidemics are less intense due to lower temperatures (Bock 1962; Avelino et al. 1991, 2006). Rain

contributes to the transport of urediniospores for short distance, and water (i.e., H<sub>2</sub>O in liquid form) is necessary for germination until leaf penetration (Avelino and Rivas 2013). CLR epidemics develop during the rainy season and declines when the rainy season stops (Galvez et al. 1980; Santacreo et al. 1983; Holguin, 1985; Avelino et al. 1991). However, lack of rain does not seem to be a significant limiting factor for CLR epidemic development. Other sources of free water such as dew can facilitate the germination of spores during the absence of rain (Muller 1975).

To elucidate the above factors in relation to coffee shrub susceptibility to CLR, we performed field research in four coffee plantations in Peru. Data collection was conducted at the end of both the dry and the wet seasons. The following main questions were investigated:

(a) What is the effect of coffee variety on CLR incidence in actual farm conditions? Various studies have examined CLR resistance of coffee varieties and the genetic basis for resistance of various hybrids. However, field research examining interactive effects on CLR incidence of coffee variety and other factors in actual plantation conditions is broadly lacking.

(b) How does shading influence the incidence of CLR? This issue remains unclear, yet it is important to resolve. Agroforestry systems bring many environmental benefits, but the fear of CLR has already resulted in some of them changing to monoculture plantations.

(c) How do coffee plant age, plant density and soil properties affect CLR incidence and how do these variables interact with coffee variety?

## **9.4 Materials and methods**

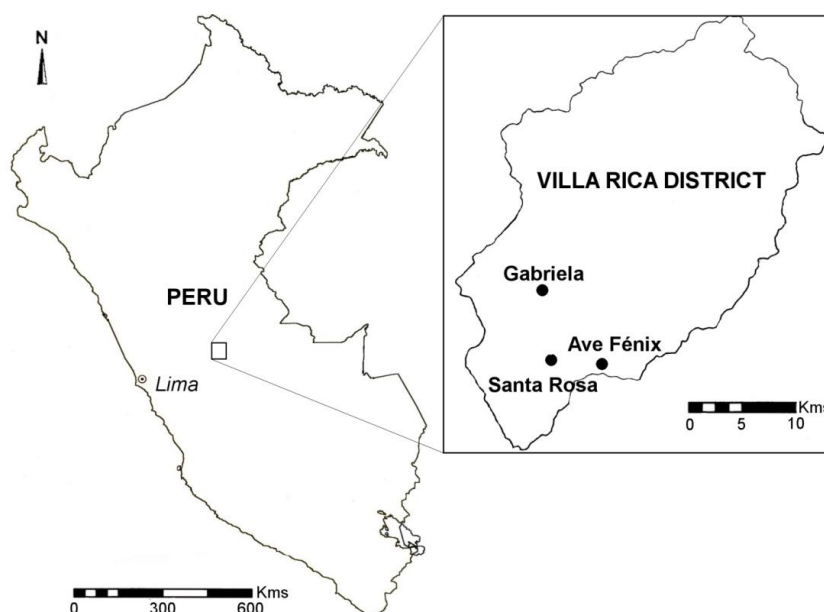
### **9.4.1 Description of study sites**

This study was conducted in the Villa Rica district, Pasco region, Peru (Fig. 1), which is located in the foothills of Peruvian Andes in the tropical humid mountain forest zone. Villa Rica district is one of the centres of coffee production in Peru (Hamlin and Salick 2003), so the landscape is shaped by coffee plantations with some cattle farming. The mean annual rainfall of the area is 1,590 mm, and the average annual temperature is 17.8 °C (Ponce et al. 2008). Soils in the region are classified as dystric Cambisols (Brack 2012; Michéli et al. 2006). The majority of coffee plantations in the district are using

agroforestry (Greenberg et al. 1999). CLR is a serious problem in the Pasco region: in December 2013, about 33% of coffee shrubs were infected with it (JNC 2014).

At the end of the dry season (i.e., October) of 2011, three coffee plantations were selected for the first data collection: Ave Fénix; Santa Rosa and Carrillo. Data were collected again at the end of the wet season (February) of 2014 at Ave Fénix and Santa Rosa, and data were also collected at La Torre (instead of Carrillo). Locations of all studied plantations are shown on Table 1 and Fig. 1.

Organic farming management is used in all selected plantations. Management is relatively simple and is applied identically across all the coffee plantations at each location. Coffee is pruned systematically with one third of the rows are pruned each year to a height of 0.4 m, the next rows pruned the following year and so on, such that each row is pruned every three years (see schematic depiction in Fig. 2). The farmers leave the organic material from pruning on the soil to decompose.



**Fig. 1. Locations of studied plantations**

Ave Fénix plantation, shaded mainly by *Inga* spp., is located in the village of Alto Palomar. During the measurement, 7.4 ha of this plantation were shaded by *Inga* spp. and 1 ha was unshaded. Santa Rosa plantation, shaded mainly by *Pinus* spp., is located near Lake Oconal. It consists of first-generation coffee plants on former pastureland, and is one of the first coffee agroforestry plantations shaded by *Pinus* spp. in the region. Carrillo plantation also comprises first-generation coffee plants, which in this case are shaded



mainly by *Eucalyptus* spp. which were planted as part of the conversion process from pastureland to plantation. It is located 4 km north of the town of Villa Rica. Data collection at this plantation was not possible in February 2014 because of the elimination of coffee shrubs from this site. La Torre plantation, located next to Lake Oconal, was also shaded mainly by *Eucalyptus* spp. planted for conversion from pastureland to plantation. Data were collected at this plantation in 2014 instead of the Carrillo plantation.

**Table 1**

**Descriptions of studied coffee plantations in terms of location, area, mean altitude, dominant tree species and average age. (UTM - Universal Transverse Mercator, m.a.s.l. - meters above sea level, Cati - 'Catimor', Catu - 'Caturra', Cata - 'Catuai', T- typical, B - Bourbon, P - 'Pache' )**

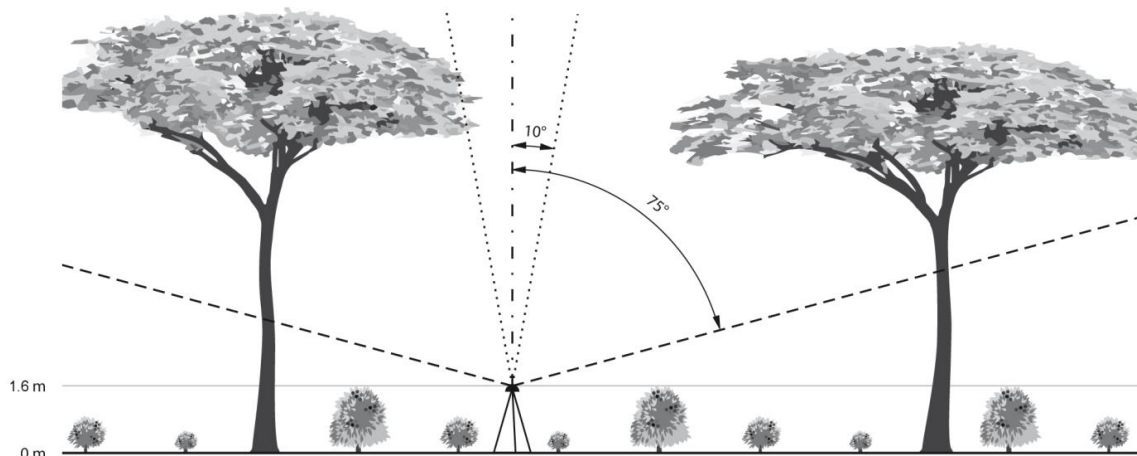
Plantation	X (UTM)	Y (UTM)	Area (ha)	Altitude (m.a.s.l.)	Dominant species	Average age (years)	Coffee varieties
Santa Rosa	471531	8809929	3.98	1540	<i>Pinus</i> spp.	15	Cati, Catu, Cata
La Torre	469052	8811679	0.85	1530	<i>Eucalyptus</i> spp.	11	Cati, Catu, T, B
Ave Fénix	475784	8808864	7.37	1550	<i>Inga</i> spp.	15	Cati, Catu, Cata, T, P
Carrillo	471882	8816212	0.96	1660	<i>Eucalyptus</i> spp.	7	Cati, Catu

#### 9.4.2 Data collection

A total of 75 circular plots (25 at each of the 3 original plantations), each having an area of 100 m<sup>2</sup>, were established randomly within the studied plantations, in October 2011 (dry season). In February 2014 (wet season), data were collected again from the 50 plots at the Ave Fénix and Santa Rosa plantations and 25 new plots were established and data collected from them at the La Torre plantation. CLR presence/absence, coffee variety and coffee plant age were recorded for each coffee plant on the plots. The coffee plant density was calculated for each plot. A coffee plant would be categorized as infected by CLR if the orange chlorotic spots were observed on the upper surface of the leaves. Five age classes of coffee plants were distinguished: (1) from 1 to 5 years old; (2) from 6 to 10 years old; (3) from 11 to 15 years old; (4) from 16 to 25 years old; and (5) more than 25 years old. These age classes reflected the age of the whole plant (and thus did not take into account shoot ages as affected by pruning).

Hemispherical photographs to assess canopy openness were taken looking upwards from the centre of each coffee measurement plot, above coffee plant at the height of 1.6 m (using a Canon EOS 550D camera with Sigma 4.5mm f/2.8 EX DC lens) at the same

times that data were collected. The photographs were intentionally underexposed by two stops (-2EVs) as shown by Beckschäfer et al. (2013) to be the minimum required underexposure for hemispherical photographs for the purposes of forest canopy openness estimation. They were pre-processed in Lightroom 4 (Adobe Corporation), where image contrast was increased to make canopy/sky classification easier and each entire image was checked for bright areas (from direct or reflected sunlight) on stems, branches and the ground. These areas were darkened manually to ensure they were not misclassified as sky during automatic image classification. Photographs were then classified using the IsoData method in ImageJ vers. 1.48v. Finally, two canopy openness values were calculated from each photograph, but employing CIMES vers. 9 (Gonsamo et al. 2011) The first, with a  $10^\circ$  zenith angle, was calculated to assess the openness directly above the coffee plant, while the second, with a  $75^\circ$  zenith angle, was intended to characterize the overall situation (Fig. 2).



**Fig. 2.** Location of camera for the hemispherical photographs, showing marked zenith angles of  $10^\circ$  and  $75^\circ$ . The depiction of coffee plants (below the trees) also illustrates the systematic coffee pruning described in the text.

Soil samples were collected in 2012 from a total of 24 of the coffee survey plots at the Ave Fénix, Santa Rosa and Carrillo plantations (three of these plots at each plantation). All soil sampling plots were selected in similar slope (approximately  $15^\circ$ ). From each soil sampling plot, three soil samples were taken from the depth of 0–10 cm, and were mixed together to get a mixed soil sample used for further analysis. Soil water content (denoted as moisture) was assessed by oven-drying at  $105^\circ\text{C}$ ; texture (sand 0.05–2 mm, silt 0.002–0.05 mm and clay  $< 0.002$  mm percentage) was assessed using a hydrometer (Bouyoucos

1962); soil reaction (pH/KCl or pH/H<sub>2</sub>O) was assessed from suspension of soil sample:1M KCl or H<sub>2</sub>O, respectively at a 1:1 ratio (v:w); aluminium content (Al) was assessed according to Yuan (1958); total organic carbon (TOC) was assessed according to Walkley and Black (1934); nutrient content (K<sub>2</sub>O in kg·ha<sup>-1</sup>, Ca and Mg in Cmol·kg<sup>-1</sup>) was assessed from suspension of soil sample:1N ammonium acetate at a 1:10 ratio (v:w) using atomic adsorption spectrophotometry from a solution of 1N ammonium acetate at pH 7; cation exchange capacity (CEC) was assessed as effective in 1N KCl when soil sample:eluent ratio was 1:10 (v:w); and base saturation (BS) was expressed as the base cation percentage of CEC. All soil samples were processed at the laboratory of the Universidad Agraria Nacional de la Selva, Tingo Maria, Peru.

Air temperature and air humidity at the Ave Fénix plantation were measured continuously at the shaded and non-shaded sites at a height of 2 m using a Minikin RTD (EMS, Brno, Czech Republic) with sensor accuracy  $\pm 0.2$  °C and  $\pm 2$  %, respectively. The microclimatic measurements were conducted from February 2011 to January 2014.

### 9.4.3 Statistical analysis

We used boxplots to show the distributions of age, plant density and openness of all studied plantations from the data collected in 2011 and 2014. Next, we analysed whether there were differences in CLR infection probabilities on different plantations using generalised linear mixed effect models (GLMM) with binomial distribution of errors, logit link function and treating plot ID as a random effect.

Our main goal in statistical analysis was to reveal the main factors influencing CLR infection probability. Because we found in the preliminary analysis that plantations were fairly distinct in their ranges of explanatory variable values and that the overall dataset was rather unbalanced, we decided to conduct separate analyses for each plantation/season. We again used GLMM with plot ID as a random effect, binomial distribution of errors and logit link function. Our response variable was coffee plant infection probability and explanatory variables (fixed effects) were coffee variety, age, canopy openness and density. We chose to examine only the most important coffee varieties, ‘Caturra’ and ‘Catimor’, as the other varieties were often missing, making analysis difficult to perform. First, we calculated simple models with only one fixed effect

and then we combined several variables to find the overall best model and its alternatives. We also included interactions of age, canopy openness and density with coffee variety because we expected that the responses of these variables could be different for resistant and susceptible varieties. We reported final models with all significant combinations of variables, along with the values for their AIC (Akaike Information Criterion) and marginal and conditional pseudo  $R^2$  (Nakagawa and Schielzeth 2013).

We simplified the analyses of soil variables because we had a relatively small sample size – a total of 24 samples from all plantations. Therefore, we analysed all plantations together instead of doing separate analyses for each plantation. Additionally, because we had just one value for each soil variable for each sample plot, we used a generalized linear model (GLM) approach with quasibinomial distribution of errors and link function logit instead of the more sophisticated GLMM. In the first model (M1), each soil variable was used as the only fixed effect variable. Because we found coffee plant age and variety to be the most important variables, we also fitted one model (M2) with the interaction of the particular soil variable and the mean coffee plant age on the plot and one model (M3) with the interaction of the particular soil variable and percentage of resistant ‘Catimor’ variety on the soil sampling plot. Next, to have a general overview of all soil variables, we generated ordination plots using principal component analysis (PCA). Statistical analyses were carried out in the software environment of R version 3.2.3 (R Core Team 2015), GLMM in lme4 package version 1.1-11 (Bates et al. 2014), conditional and marginal pseudo  $R^2$  in MuMIn package version 1.15.6 (Bartoń 2015), and PCA in vegan package version 2.3-5 (Oksanen et al. 2016).

## **9.5 Results**

### **9.5.1 Basic characteristics of coffee plantations**

Data distribution for age, coffee plant density and canopy openness is shown in box plots (Fig. 3). We divided the studied plantations into two groups regarding coffee plant age: even-aged (Carrillo and La Torre) and uneven-aged coffee plantations (Ave Fénix and Santa Rosa). The lowest coffee plant density was at the Carrillo plantation and the highest at the Ave Fénix plantation. Canopy openness 75 was lower in 2014 than in 2011 and its

variability was low in all plantations. Canopy openness 10 also decreased between the years 2011 and 2014, but had greater variability in all plantations.

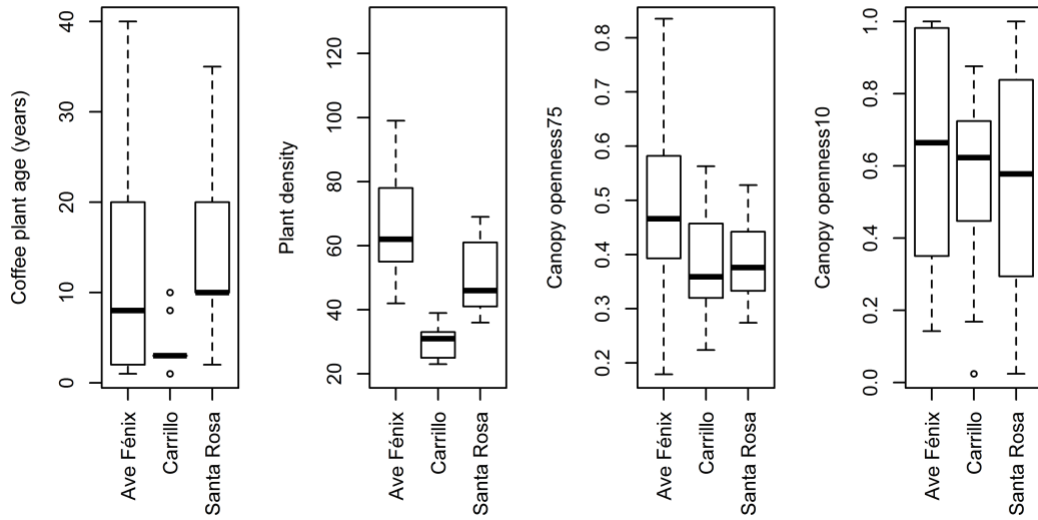
According to the results of the soil analyses, (Table 2 and Fig. 4) the plantations are generally characterized by loamy texture, having strongly acidic pH/KCl, high to very high TOC content, medium to high content of Mg, low (Santa Rosa) to moderately low CEC and high to very high BS. The soil parameters were well-grouped at Santa Rosa, especially compared with Ave Fénix, which has a larger area with more varied conditions.

**Table 2**

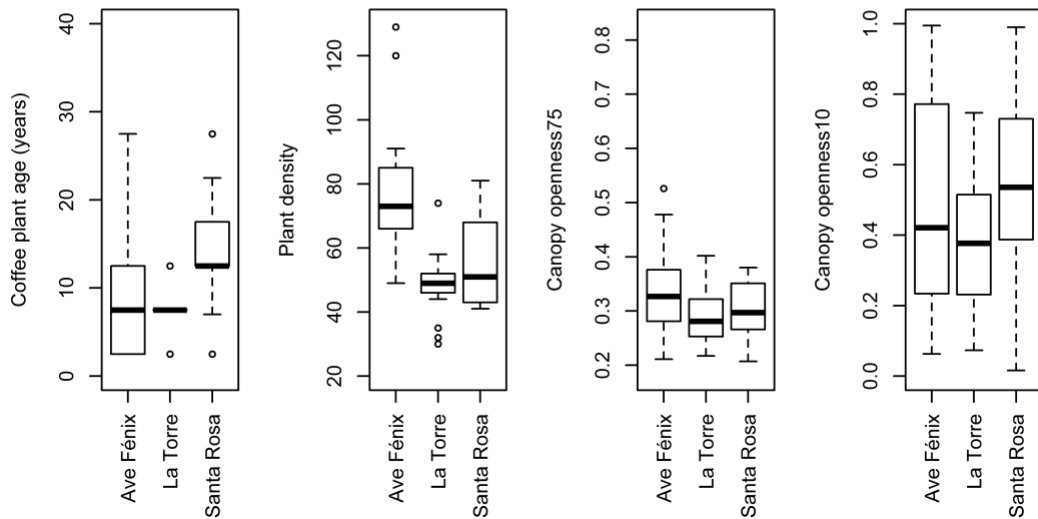
**Basic soil properties – means and standard deviations (SD) in 1<sup>st</sup> 10 cm layer of soil in each plantation and p-values reported from analysis of the effects of soil variables on CLR incidence. M1 - simple model with soil characteristic only; M2 - model with soil characteristic, mean plot age and their interaction; M3 - model with soil characteristic, plot ‘Catimor‘ plant representation (as percentage of all coffee plants on plot) and their interaction; p-value of interaction term is reported.**

Soil property	Ave Fénix	Carillo	Santa Rosa	M1 p-value	M2 p-value	M3 p-value
<b>Soil texture</b>						
Sand content [%]	42.7 ± 11.9	47.7 ± 8.3	48.0 ± 6.3	0.333	0.425	0.952
Clay content [%]	24.9 ± 7.6	19.0 ± 2.6	15.0 ± 2.3	0.404	0.543	0.109
Silt content [%]	32.4 ± 5.9	33.3 ± 6.3	36.9 ± 5.2	0.512	0.487	0.140
<b>Soil reaction</b>						
Potential soil reaction pH/KCl	3.8 ± 0.5	4.4 ± 0.3	4.1 ± 0.3	0.590	0.140	0.289
Active soil reaction pH/H <sub>2</sub> O	4.1±0.41	4.7 ± 0.2	4.3 ± 0.3	0.525	0.167	0.242
Total organic carbon [%]	2.0 ± 1.1	1.8 ± 0.7	2.4 ± 0.5	0.435	0.166	0.463
Nutrient content in total amount K <sub>2</sub> O [kg/ha]	459.6 ± 112	315.4 ± 143.5	330.6 ± 84.2	0.431	0.342	0.189
Ca exchangeable [Cmol/kg]	6.8 ± 4.5	12.2 ± 3.1	5.1 ± 1.1	0.359	0.342	0.677
Mg exchangeable [Cmol/kg]	1.6 ± 0.6	1.8 ± 0.6	1.1 ± 0.2	0.396	0.296	0.148
Cation exchange capacity [Cmol/kg]	11.5 ± 4.6	15.1 ± 3.2	7.5 ± 1.1	0.720	0.245	0.163
Base saturation [%]	70.4 ± 16.9	92.6 ± 3.4	81.8 ± 6.4	0.837	0.320	0.117

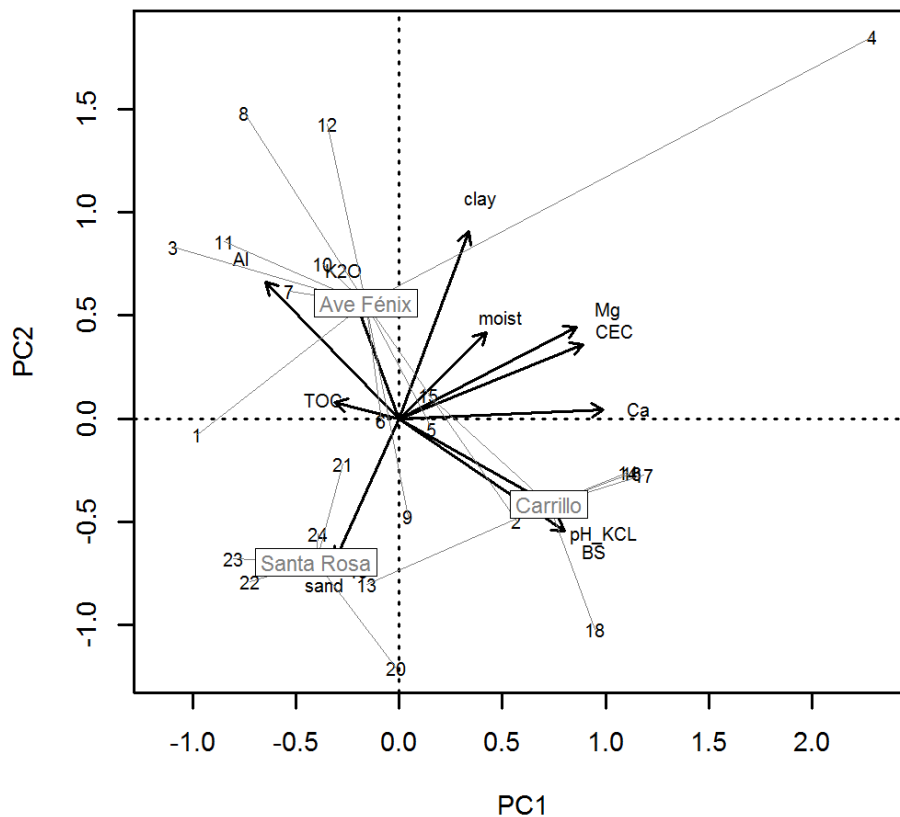
2011



2014

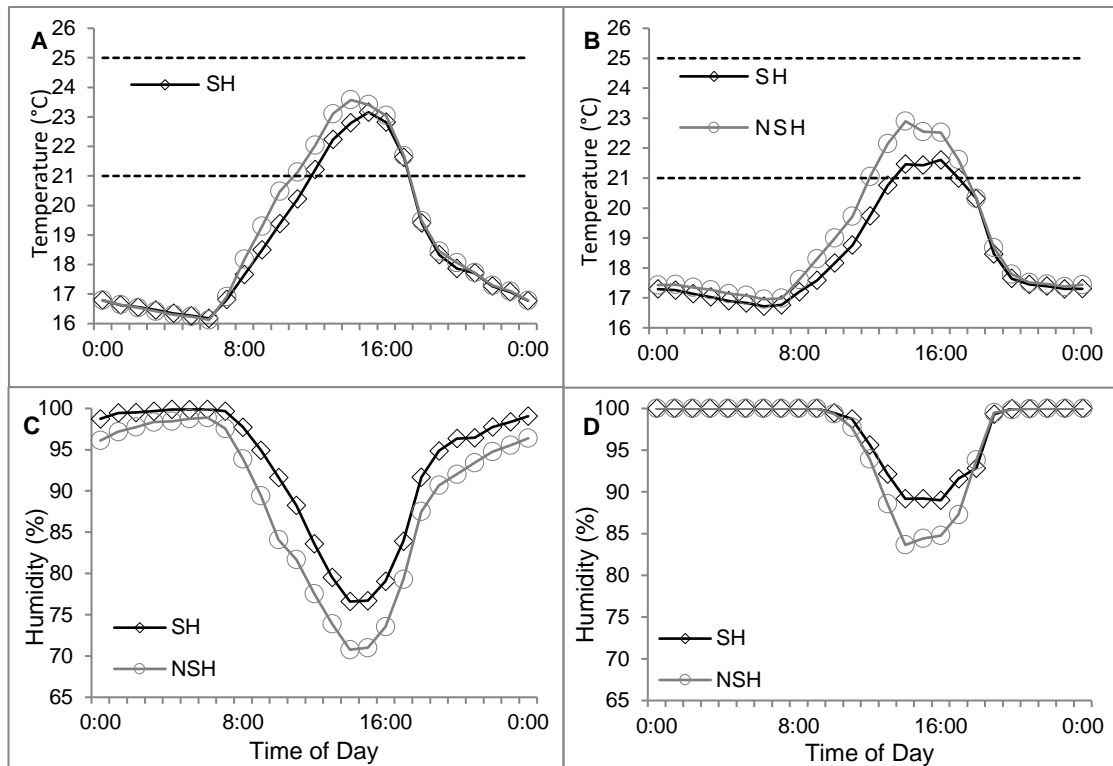


**Fig. 3. Boxplots showing distributions of age, plant density and canopy openness (10° and 75°) of all studied plantations from 2011 and 2014. The horizontal line in each box represents the median; the hinges represent the 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentiles; the whiskers represent 1.5 times the interquartile range and open circles represent values outside this interval**



**Fig. 4. Ordination of studied soil properties showing interactions among them and individual plantations obtained by principal component analysis. Plots within the same plantation are distinguished using a spider plot.**

Average daily temperature in October 2011 (dry season) at the shaded site was  $18.6 \pm 0.5$  °C and at unshaded site it was  $19.0 \pm 0.5$  °C. Average daily temperature in February 2014 (wet season) was  $18.4 \pm 0.3$  °C at the shaded site and  $18.9 \pm 0.4$  °C at the non-shaded site. Average daily humidity on October 2011 was  $87.7 \pm 3.17$  % at shaded site and  $82.5 \pm 3.24$  % at the non-shaded site; in February 2012 it was  $97.4 \pm 1.12$  % at shaded site and  $96.4 \pm 1.47$  % at the non-shaded site. All standard deviations were calculated from daily means. In the dry season, October 2011, temperatures were optimal for CLR from 12:00 to 17:00 at the shaded site and from 11:00 to 17:00 at the non-shaded site. In the wet season, February 2014, it was from 14:00 to 16:00 at the shaded site and from 12:00 to 17:00 at the non-shaded site. The difference between the shaded and non-shaded sites was higher in the wet season (Fig. 5).



**Fig. 5.** Average hourly air temperature (A, B) and air humidity (C, D) in the dry season, October 2011 (AC) and in the wet season, February 2014 (BD). SH – shaded site; NSH – non-shaded site. Temperatures between the dotted lines are optimal for CLR development.

### 9.5.2 Influence of coffee variety, shade, age and plant density on CLR incidence

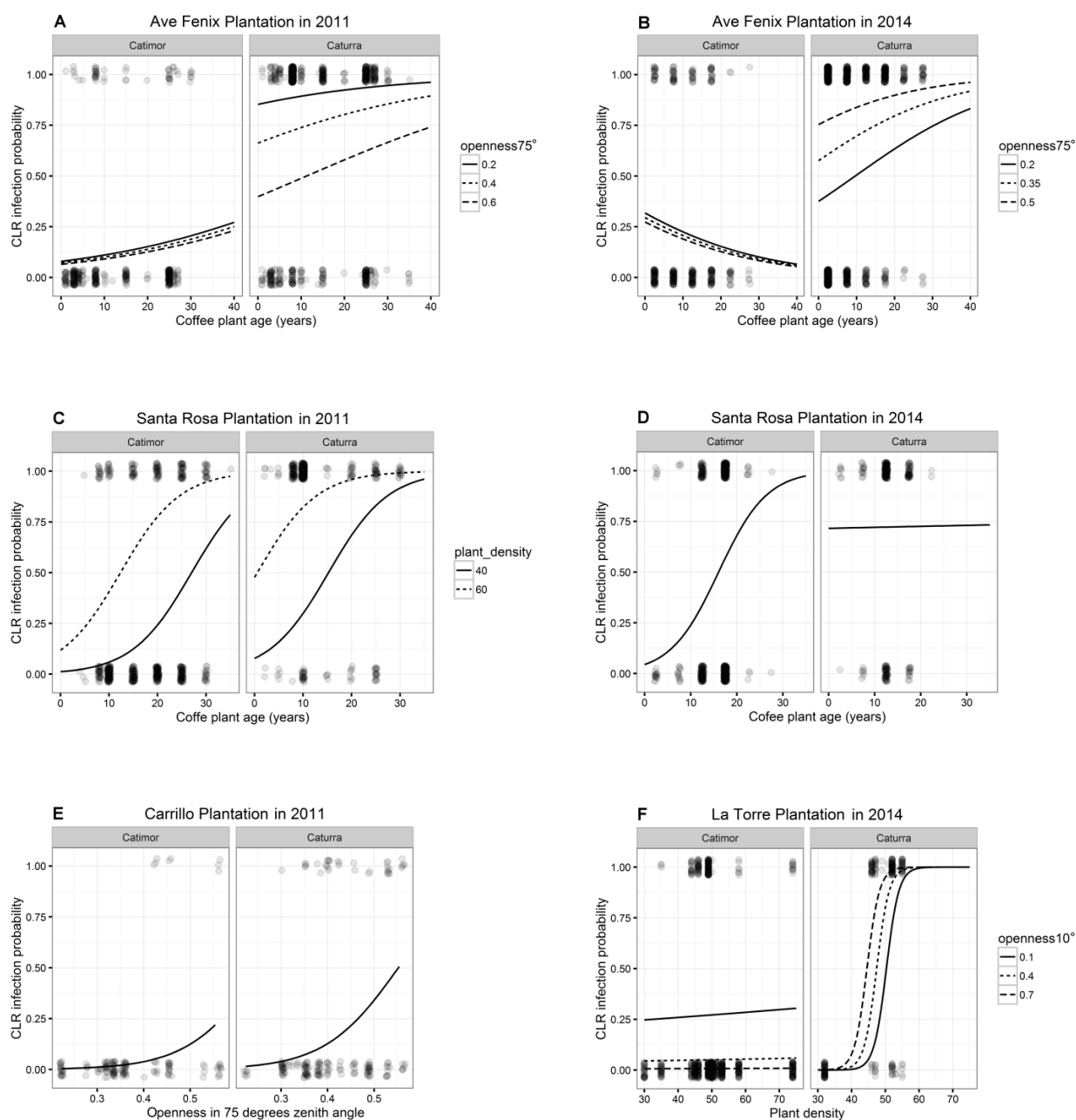
The most important factors influencing CLR incidence were coffee variety and the age of the coffee plants. ‘Catimor’ had less CLR incidence than the ‘Caturra’ variety at all plantations in both 2011 and 2014 ( $p < 0.001$ , at the Carrillo plantation  $p = 0.004$ , Fig. 6). Coffee plant age was the second-most important factor: with increasing age the probability of CLR infection increased at the majority of plantations ( $p < 0.001$ , for Ave Fénix 2014  $p = 0.027$ , Carrillo and La Torre – not significant, Table 3 and Fig. 6A-D). The effect of shade (here characterised in terms of canopy openness) on CLR incidence was not very clear. Canopy openness measured using a  $10^\circ$  angle significantly influenced CLR incidence in the wet season ( $p$ -values from 0.002 to 0.037), but it was not significant in the dry season. On the other hand, canopy openness measured using a  $75^\circ$  angle significantly influenced CLR incidence in the dry season ( $p$ -values from 0.001 to 0.026) but it was not significant in the wet season (with the exception of the ‘Caturra’ variety at Ave Fénix).



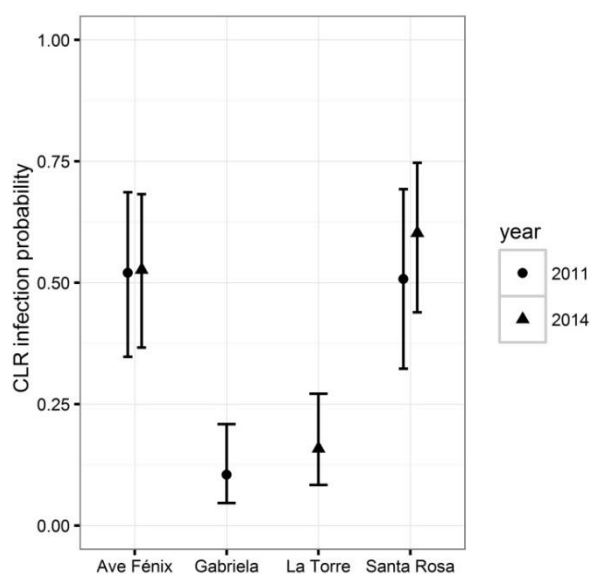
Coffee plant density influenced the CLR incidence at just half of the studied plantations/seasons, and it had mostly a positive effect on CLR incidence with the exception of ‘Caturra‘ at Ave Fénix and ‘Catimor‘ at Santa Rosa ( $p < 0.001$  for Santa Rosa 2011, interaction of density and variety p-values ranged from 0.004 to 0.038 for La Torre, Ave Fénix 2011 and Santa Rosa 2014, Table 3 and Fig. 6C, 6F). Soil characteristics were not significant either when considered by itself or in interaction with coffee variety or age.

For the two plots (at Ave Fénix and Santa Rosa plantations) from which data were collected in both October 2011 and February 2014, we found that CLR incidence was significantly higher ( $p < 0.001$ ) in 2014. The increase in CLR infection was more pronounced in the Santa Rosa plantation (from 51% to 60%) than in Ave Fénix (52 to 53%). Fig. 7 shows CLR incidence in studied plantations/seasons.

Final models are provided in the supplementary data in Table S1.



**Fig. 6.** The probability of CLR infection in relation to the most important variables (separately for plantations and seasons: A, B - Ave Fenix; C, D - Santa Rosa; E - Carrillo, F - La Torre). Dots represent observed values jittered around the x and y axes and semi-transparent to be more informative because there were just two possible values 1 and 0 (CLR present/not present).



**Fig. 7.** Probability of CLR infection by plantation and season (October 2011 and February 2014). Mean values for plantations and seasons were calculated using GLMM and their 95% confidence intervals are shown. Pairwise comparisons of plots in Ave Fénix and Santa Rosa plantations (using GLMM) showed significant differences between the two seasons ( $p < 0.001$ ).

**Table 3**

Overview of the effects of studied variables on CLR incidence shown for traditional ‘Caturra’ and resistant ‘Catimor’ coffee varieties and for different plantations and seasons. Codes: ‘++’ strong positive effect (i.e., CLR incidence increase); ‘+’ positive effect; ‘.’ non-significant effect; ‘(-)’ negative effect (i.e., CLR incidence decrease); ‘--’ strong negative effect. Plantations with very narrow gradient for the particular variable and variety are indicated by a grey background.

Season	Plantation	Age		Openness10		Openness75		Density	
		Catimor	Caturra	Catimor	Caturra	Catimor	Caturra	Catimor	Caturra
2011	Ave Fenix	+	+	.	.	-	--	+	-
2014	Ave Fenix	-	+	-	+	.	+	.	.
2011	Santa Rosa	++	++	.	.	-	+	+	+
2014	Santa Rosa	++	.	+	-	.	.	(-)	+
2011	Carrillo	.	.	.	.	+	+	.	.
2014	La Tore	.	.	-	+	.	.	.	+

## **9.6 Discussion**

Average CLR incidence for each plantation ranged from 10 to 51% in the dry season (October 2011) and from 16 to 60% in the wet season (February 2014). This is in the range of CLR infection reported in Peru (10–70%) (JNC, 2014), but higher than other authors have found elsewhere: on plots in Mexico, Soto Pinto et al. (2002) found the percentage of CLR ranged from 5.1% to 20.2%; Avelino et al. (1991) reported 24% CLR in Mexico; and Brown et al. (1995) found an 18% incidence of CLR in Papua New Guinea.

Our study found coffee variety to have an important effect on CLR incidence. In particular, the ‘Caturra’ was the susceptible variety and ‘Catimor’ the resistant one as others have also found (Wintgens 2004; Silva et al. 2006). Moreover, we found that the effect of other factors – especially canopy openness and coffee plant density differed for the ‘Catimor’ and ‘Caturra’ varieties (significant interaction of these variables and variety) (Table 2, Fig. 3).

The second-most important factor influencing CLR incidence was age. With increasing age, CLR incidence increased for both studied varieties. We did not find other studies examining the effect of plant age on CLR presence. However, Eskes and Toma-Braghini (1982) studied the influence of leaf age on incomplete resistance to CLR in Brazil and found that for the susceptible variety ‘Catuai’ there was no effect of leaf age on the latency period, but for ‘Catimor’, the resistance to CLR decreased with increasing leaf age. Additionally, the results of Coutinho et al. (1994) indicated that ‘Caturra’ showed increased resistance with increasing leaf age. However, our results cannot be directly compared with the results of Eskes and Toma-Braghini (1982) or Coutinho et al. (1994), because the age of whole plants does not reflect the age of leaves, mainly because plants in plantations such as those studied are pruned regularly. In the context of our study, it is important to mention that approximately 70 % of the coffee plantations in Peru are older than 20 years (JNC 2014) and hence the risk of CLR epidemic is large. In particular, we found that the critical age at which CLR infection increases substantially even for the resistant ‘Catimor’ variety seems to be between 15 and 20 years. Therefore, when coffee plants reach this threshold, they should be replaced with new ones.

Our study, like previous research (Avelino and Rivas 2013), shows that the influence of

shade on CLR is not straightforward. Although Eskes (1982) found that increased shading was associated with increased *Coffea arabica* resistance to CLR, that study's methodology incorporated artificial inoculation of leaves, making a direct comparison with our study difficult. Monterroso's (1999) comparative study of shaded (80%) and open-sun coffee fields in the uplands of southern Nicaragua showed rust levels to be higher in the shade; this was attributed primarily to increased humidity. Although our findings regarding shade differed from those of Monterroso (1999), we also suggested increased humidity to be associated with higher CLR incidence during the wet season.

Our results regarding effects of shade (in terms of canopy openness) differed when assessed for the angles 10° and 75° (canopy openness 10° and canopy openness 75°, respectively). Interestingly, canopy openness 10° had an effect on CLR incidence only in the wet season, whereas canopy openness 75° had an effect on CLR incidence in the dry season (except for the 'Caturra' variety at Ave Fénix). The importance of canopy openness 10° during the wet season could be explained by the effect of shade trees growing directly over the coffee in decreasing the amount of rain that falls on coffee plants (interception effect). In contrast, canopy openness 75° is more representative of lateral light, which is likely more important in the dry season when the shade from neighbouring is important in the morning and afternoon. Particularly interesting is that the 'Catimor' and 'Caturra' varieties showed opposite trends in response to canopy openness in most cases. For 'Caturra', increasing canopy openness results in increasing CLR incidence in the majority of plantations/seasons, whereas for 'Catimor', increasing canopy openness was associated with decrease CLR incidence in most of the plantations/seasons.

Our results also indicate that increasing coffee plant density generally increased the incidence of CLR. This is in accordance with Avelino and Rivas (2013), who reported that the practice of planting coffee at high densities favoured CLR incidence in standardized fruit ripening conditions (i.e., same quantity of ripe fruit per branch). Moreover, high coffee plant density increases the leaf area index (Arcila-Pulgarín and Chaves-Córdoba 1995; Cannel 1975), which favours urediniospore interception (Avelino et al. 2004). High densities can also favour the spread of the disease from plant to plant by increasing contact between plants (Burdon and Chilvers 1982). However, on 'Caturra'

plants at Ave Fénix in 2011 the CLR incidence decreased with increasing coffee shrub density. This might best be understood in terms of increased coffee planting density implying greater self-shading between coffee plants (Avelino et al. 2004), which, therefore, would produce similar effects to those of increased shade, which mostly resulted in decreased CLR incidence for ‘Caturra’ in our study.

Soils at all the plantations had pH values near or below the lower limit favourable for coffee growing, with the pH/KCl in particular not in the range of appropriate values for this activity (Wintgens 2012). Moreover, these values were in the range that increases susceptibility to CLR (Lamouroux et al. 1995; Avelino et al. 1998; Pellegrin et al. 1995). In contrast, the soil structure we found does not favour CLR presence (Lamouroux et al. 1995), and the soil nutrient status (Ca, Mg and K content evaluated according to the criterion of Costantini 2009) did not limit coffee growth at any of the studied plantations. Finally, we did not find any soil variable to have a significant effect on CLR incidence. However, the range of soil properties in our study was relatively narrow, which resulted in low potential to detect significant trends.

It is known that incidence of CLR is influenced by microclimate conditions (Avelino and Rivas 2013; Avelino et al. 2007; Carvalho et al. 1961; Smith 1981). In our case, CLR optimal temperatures were observed for a longer time in October 2011 (dry season) than in February 2014 (wet season) at Ave Fénix, at both the shaded and non-shaded sites. This would suggest that we would find a higher CLR incidence in October 2011. However, we found the opposite, i.e., a higher CLR incidence in February 2014. We suppose that in February 2014 the determining factor was the wetter climate rather than temperatures. Other authors have also reported similar results (Galvez et al. 1980; Santacreo et al. 1983; Holguin 1985; Avelino et al. 1991), showing that CLR epidemics develop during the rainy season and decline when the rainy season ends.

## **9.7 Conclusions**

Our study showed that, of the factors we considered, the ones with the most important influence on CLR incidence are coffee variety and the age of the coffee plants. The importance of coffee plant age is an especially important finding because of the overall lack of studies focused on this factor. The effect of canopy openness on CLR incidence

differed between the different zenith angles used for openness assessment, and among varieties and plantations. Canopy openness 10° had effect on CLR incidence only in the wet season, and canopy openness 75° had effect on CLR incidence in the dry season. Especially noteworthy is the fact that ‘Catimor’ and ‘Caturra’ varieties showed opposite trends in response to canopy openness in most cases. These results indicate the need of study the influence of shade effects in concert with other factors influencing CLR incidence.

Our general recommendation for coffee growers is to use resistant coffee varieties and to replace coffee plants when they become too old to be resistant to CLR infection. On the other hand, conversion of agroforestry to monoculture plantations is not recommended as a way to reduce the CLR presence, as the relationship between the amount of shade and the CLR presence remains unclear, and, moreover, such a transition would result in loss of the various benefits provided by agroforestry.

## **9.8 Acknowledgement**

This study was supported mainly by the POPRAR project [CZ.1.07/2.2.00/28.0303.] of the Faculty of Forestry and Wood Technology, Mendel University in Brno and by the company MapGeosolution. The authors are grateful to the Marín, Carrillo and Torre families and to Ms. Selena Contreras for their help and for letting us conduct this study on their plantations. Special thanks also to Petr Kupec, the chief manager of the POPRAR project, to Jorge Mattos, the director of MapGeosolution and also to Jonathan Rosenthal for English correction.

## 9.9 Supplementary data

**Table S1**

Overview of final models estimating CLR infection probability for studied plantations and seasons. Models were fitted using generalised linear mixed models with binomial distributions. AIC differences ( $\Delta$ AIC) from the best model for particular plantations, and marginal and conditional pseudo R-square values are shown. Marginal pseudo R-squared values are associated with fixed effects only, whereas conditional pseudo R-square values are associated with both fixed and random effects.

	Model specification	$\Delta$ AIC	Marginal pseudo R <sup>2</sup>	Conditional pseudo R <sup>2</sup>
<b>2011</b>				
Ave Fenix	Sort*Plant density + Sort * Openness75 + Age	-	0.484	0.707
	Sort*Openness75 + Age	1.1	0.465	0.696
Carrillo	<b>Sort + Openness75</b>	-	0.350	0.451
Santa Rosa	Sort*Openness75 + Age + <b>Plant density</b>	-	0.350	0.570
	Sort + Age + Plant density	4.7	0.303	0.550
	Sort*Openness75 + Age	9.3	0.201	0.589
<b>2014</b>				
Ave Fenix	<b>Sort * Age</b> + Sort * Openness75	-	0.209	0.412
	Sort * Openness75	12.3	0.199	0.422
	Sort * Openness10	22.6	0.173	0.432
La Torre	<b>Sort * Plant density + Sort * Openness10</b>	-	0.449	0.775
Santa Rosa	<b>Sort * Age + Sort * Openness10</b>	-	0.160	0.439
	<b>Sort * Plant density + Sort * Openness10</b>	16.5	0.169	0.434



## 9.10 References

- Arcila-Pulgarín J, Chaves-Córdoba B (1995). Desarrollo foliar del cafeto en tres densidades de siembra. *Cenicafé*. 46:5–20
- Avelino J, Muller RA, Cilas C, Velasco PH (1991) Development and behavior of coffee orange rust (*Hemileia vastatrix* Berk. and Br.) in plantations undergoing modernization, planted with dwarf varieties in South-East Mexico. *Café Cacao Thé*. 35(1): 21-37
- Avelino J, Seibr R, Zelaya H, Ordonez M, Merlo A (1998) Enquete-diagnostic sur la rouille orang er du caffi er Arabica au Honduras. In 17th Colloque Scientifique International sur le Caf e. ASIC, Paris, 613–620
- Avelino J, Savary S (2002) Rational and optimized chemical control of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). In Plantations, recherche, d veloppement: recherche et caffi culture. Montpellier, France: CIRAD 134–143
- Avelino J, Willocquet L, Savary S (2004) Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics. *Plant Pathology* 53:541–547
- Avelino J, Zelaya H, Merlo A, Pineda A, Ordonez M, Savary S (2006) The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling* 197(3–4):431–447
- Avelino J, Cabut S, Barboza B, Barquero M, Alfaro R, Esquivel C, Durand JF, Cilas C (2007) Topography and crop management are key factors for the development of American leaf spot epidemics on coffee in Costa Rica. *Phytopathology* 97:1532–1542
- Avelino J, Rivas G (2013) La roya anaranjada del cafeto, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>, 47 p.
- Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, Bornemann G, L derach P, Anzueto F, Hruska AJ, Morales C (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security* 7:303–321
- Becksch fer P, Seidel D, Kleinn C, Xu J (2013) On the exposure of hemispherical photographs in forests. *iForest* 6:228-237
- Bock KR (1962) Seasonal periodicity of coffee leaf rust and factors affecting the severity of outbreaks in Kenya colony. *Transactions of the British Mycological Society*. 45:289–300
- Bouyoucos GJ (1962) Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 54:464–465

*EHRENBERGEROVÁ, L., KUČERA, A., CIENCIALA, E., TROCHTA, J., VOLAŘÍK, D. Identifying key factors affecting coffee leaf rust incidence in agroforestry plantations in Peru. Agroforestry systems. Submitted: 2016*

Brack AE (2012) *Ecología del Perú*. Bruno. Lima

Burdon JJ, Chilvers GA (1982) Host density as a factor in plant disease ecology. *Annual Review of Phytopathology* 20:143–166

Cannell MGR (1975) Crop physiological aspects of coffee bean yields: a review. *Journal of Coffee Research* 5:7–20

Carvalho A, Krug CA, Mendes JET, Antunes F, Junqueira AR, Aloisi J, Rocha TR, Moraes MV (1961) Melhoramento do caggeiro. *Bragantia* 20:1045–1142

Costantini EA (2009) *Manual of methods for soil and land evaluation*. Enfield, Science Publishers, 564

Coutinho TA, Rijkenberg FHJ, van Asch MAJ (1994) The effect of leaf age on infection of *Coffea* genotypes by *Hemileia vastatrix*. *Plant Pathology* 43(1):97–103

Duke JA (1978) The quest for tolerant germplasm. In: *ASA Special Symposium 32, Crop tolerance to suboptimal land conditions*. Am. Soc. Agron. Madison, 1–61

Eskes AB (1982) The effect of light intensity on incomplete resistance of coffee to *Hemileia vastatrix*. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 88:191–202

Eskes AB, Toma-Braghini M (1982) The effect of leaf age on incomplete resistance of coffee to *Hemileia vastatrix*. *Neth. J. Plant Pathology* 88:219–230

Gálvez GC, Flores MJ, Portillo D (1980) Determinación de razas fisiológicas de roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) en El Salvador. *Boletín Técnico* 4:1–10

Gonsamo A, Walter JM, Pellikka P (2011) CIMES: A package of programs for determining canopy geometry and solar radiation regimes through hemispherical photographs. *Computers and Electronics in Agriculture*. 79:207–215

Greenberg R, Rice RA (1999) *Manual de café bajo sombra y biodiversidad en el Perú*, Centro de Aves Migratorias Smithsonian Institution, 52

Hamlin CH, Salick J (2003) Yanesha Agriculture in the Upper Peruvian Amazon: Persistence and Change Fifteen Years Down. *Economic Botany* 57:163–180

Holguín F (1985) Epidemiología de la roya del cafeto bajo diferentes condiciones ecológicas, in: *2 Reunión Regional del PROMECAFE sobre el Control de la Roya del Cafeto*, IICA: Tegucigalpa, Honduras, 150-158

[JNC] Junta Nacional del Café (Peruvian National Board of Coffee) (2014) *Plan Nacional de Renovación de Cafetales*.

Kushalappa AC, Akutsu M, Ludwig A (1983) Application of survival ratio for monocyclic process of *Hemileia vastatrix* in predicting coffee rust infection rates. *Phytopathology* 73:96–103

- Kushalappa AC (1989) Advances in coffee rust research. *Annual Reviews of Phytopathology* 27:503–531
- Lamouroux N et al (1995) The *Coffea arabica* Fungal Pathosystem in New Caledonia : Interactions at Two Different Spatial Scales. *J. Phytopathology* 413:403–413
- Lin BB (2007) Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144:85–94
- López-Bravo D F, Virginio-Filho EDM, Avelino J (2012) Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions. *Crop Protection* 38:21–29
- Matovu RJ, Kangire A, Phiri NA, Hakiza GJ, Kagezil GH, Musoli PC (2013) Ecological factors influencing incidence and severity of Coffee Leaf Rust and Coffee Berry Disease in major Arabica coffee growing districts of Uganda. *14:87–100*
- Michéli E, Schad P, Spaargaren O, Dent D, Nachtergale F (2006) World reference base for soil resources. *World Soil Resources Reports* 103. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Moguel P, Toledo VM (1999) Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation biology* 13:11–21
- Monterroso D (1999) Interacción patosistema-sombra en el sistema café. *Actas de la IV Semana Científica, CATIE, Turrialba, Costa Rica*, 156–161
- Muller RA (1975) L'irrigation précoce, assurance pour une production régulière de haut niveau du caféier Arabica. *Café Cacao Thé* 19(2):95–122
- Nakagawa S, Schielzeth H (2013) A general and simple method for obtaining  $R^2$  from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution* 4:133–142
- Noponen MR, Haggard JP, Edwards-Jones G, Healey JR (2013) Intensification of coffee systems can increase the effectiveness of REDD mechanisms. *Agricultural Systems* 119:1–9
- Nutman FJ, Roberts FM, Bock KR (1960) Methods of uredospore dispersal of the coffee leaf rust fungus, *Hemileia vastatrix*. *Transactions of the British Mycological Society* 43(3):509–515
- Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Wagner H (2016) Package 'vegan', Community Ecology Package. R package version 2.3-5. Available on <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vegan.pdf>.

- Pellegrin F, Nandris D, Waestrelin S, Kohler F (1995) Situation pathologique des Arabica en Nouvelle-Calédonie, Corrélations entre pathogenese et environnement. In 16th Colloque Scientifique International sul le Café. ASIC, Paris, 690–698
- Perfecto I, Rice RA, Greenbergr R, Van der Voort ME (1996) Shade Coffee: Disappearing Refuge for Biodiversity. *Bioscience* 46:596–608
- Ponce MG, et al (2008) Plan de Desarrollo Concentrado de Villa Rica 2009–2018. Municipalisas distrital de Villa Rica, provincia Oxapampa – Región Pasco
- Prakash NS, Marques DV, Varzea VMP, Silva MC, Combes MC, Lashermes P (2004) Introgression molecular analysis of a leaf rust resistance gene from *Coffea liberica* into *C. arabica* L. *Theor. Appl. Genet.* 109:1311–7
- Rayner RW (1961) Germination and penetration studies of coffee rust (*Hemileia vastarix* B. and Br.). *Ann. Appl. Biol.* 49:497–505
- Ribeiro IJA, Monaco LC, Tisseli Filho O, Sugimori MH (1978) Efeito de alta temperatura no desenvolvimento de *Hemileia vastatrix* em cafeeiro suscetivel. *Bragantia* 37:11–6
- Rice RA, Ward J (1996) Coffee, conservation and commerce in the western hemisphere. The Smithsonian Migratory Bird Center and the Natural Resources Defense Council. Washington DC. 40
- Rice RA, Ward J (2008) Agricultural intensification within agroforestry: The case of coffee and wood products. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128:212–218
- Salgado BG, Macedo RLG, Carvalho VLD, Salgado M, Venturin N (2007) Progress of rust and coffee plant cercosporiose mixed with grevilea, with ingazeiro and in the full sunshine in Lavras - MG. *Ciencia e Agrotecnologia* 31(4):1067–1074
- Santacreo R, Reyes E, Oseguera S (1983) Estudio del desarrollo de la roya del cafeto *Hemileia vastatrix* Berk. & Br. y su relación con factores biológicos y climáticos en condiciones de campo en dos zonas cafetaleras de Honduras, C.A., in: VI Simposio Latinoamericano sobre Caficultura, IICA: Panamá, Panamá. 199–213
- Siebert SF (2002) From shade- to sun-grown perennial crops in Sulawesi, Indonesia: implications for biodiversity conservation and soil fertility. *Biodiversity and Conservation* 11:1889–1902
- Siles P, Harmand JM, Vaast P (2010) Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry systems* 78: 269–286
- Silva C, Várzea V, Guerra-guimarães L (2006) Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease, *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18(1):119–147

- Smith ESC (1981) The interrelationships between shade types and cocoa pest and disease problems in Papua New Guinea. In Beer J (1987) Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cocoa and tea. *Agroforestry Systems* 5:3–13
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Caballero-Nieto, J., 2002. Shade over coffee: its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 55, 37–45.
- Staver C, Guharay F, Monterroso D, Muschler RG (2001) Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry systems* 53:151–70
- Wintgens JN (2004) *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production* (monografie). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 983
- Yuan T (1958) Determination of exchangeable hydrogen in soils by a titration method. *Florida Agric. Experiment Station. Soil Sci.* 88:164–167
- Zambolim L, Silva-Acuña R, Do Vale FXR, Chaves GM (1992) Influencia da produção do cafeeiro sobre o desenvolvimento da ferrugem (*Hemileia vastatrix*). *Fitopatologia Brasileira* 17:32–35

## 10 Shade tree timber as a source of income diversification in agroforestry coffee plantations

**Authors:** L. Ehrenbergerová\*<sup>1</sup>, Z. Šeptunová<sup>1</sup>, H. Habrová<sup>1</sup>, R. H. Puerta Tuesta<sup>2</sup>, R. Matula<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mendel University in Brno, Zemědělská 3, Brno 61 300, Czech Republic

<sup>2</sup> Universidad Nacional Agraria de la Selva, Av. Universitaria km 1.5, Tingo María, Peru

### 10.1 Abstract

Coffee is traditionally grown in agroforestry systems. Shade trees in the coffee plantations provide important ecosystem services, and their timber may also be a good source of income for coffee growers. However, key information on the value of timber contained in shade trees and its potential contribution to the economy of the coffee growers based on empirical data is lacking. Here, we estimate the income that could be obtained from shade trees and determine the extent to which the timber from the shade trees may substitute income from coffee under different coffee price and yield scenarios. We used timber volume and annual tree growth data from shade trees collected in four coffee plantations with different shade tree species composition located at the foothills of the Peruvian Andes. To estimate marketable timber volume in standing trees, we developed allometric equations, which were previously lacking. Our results showed that the value of the timber stored in shade trees varied significantly. It represented only 2% (the lowest relative value) of the annual income from coffee production in the coffee plantation dominated by native *Inga* spp. trees in years with maximum coffee prices but it was considerably higher in the coffee plantation with non-native *Pinus* spp. and *Eucalyptus* spp. tree where it reached up to 72% in years with minimum coffee prices and yield. The economic value of annual timber production of shade trees was negligible in all scenarios. It is evident that shade trees may be a good economic reserve for coffee growers especially in years of low coffee prices but only when non-native tree species are planted. However, using individual-tree data we also found that the relatively rare native shade tree *Retrophyllum rospigliosii* had much higher timber value compared with that of non-native tree species. This result suggests that using native tree species with high timber

value as shade trees instead of commonly planted exotic species may increase economic income of coffee growers as well as is likely to support ecosystem services provided by the shade tree layer in coffee plantations.

## 10.2 Key words

Agroforestry system, allometric equations, *Eucalyptus*, *Inga*, *Pinus*, Peru

## 10.3 Introduction

Agroforestry is widely considered as a potential way of improving socioeconomic and environmental sustainability in developing countries (Jiménez-Avila and Martínez, 1979; Barradas and Fanjul, 1984; Beer, 1987; Garrett et al., 2000; Alavalapati and Nair, 2001; Nair, 2001). Shade trees in agroforestry systems serve as a source of wood and firewood (Rice, 2008). This contributes to the growing demand for wood products in domestic markets of developing countries, and it may offer significant economic opportunities for small-scale agroforestry producers (Scherr, 2004). Agroforestry also helps to reduce emissions from deforestation and forest degradation (REDD) by serving as a source of wood and firewood, and this has high global importance (Paris agreement 2015). In addition to wood and firewood, shade trees provide a variety of products, such as fibre, foot, and medicinal products, as well as oil and gum, and play a critical role in meeting the basic needs of the local population (Nair, 1993).

Coffee is one of the key traded commodities for developing countries (ICO 2003), and its cultivation in agroforestry systems represents the potential to diversify production and thereby, incomes of coffee growers (Rice, 2008). Coffee prices in the international market are highly unstable (Fig. 1), which causes socio-economic problems for local coffee growers (Daviron and Ponte, 2005; ICO, 2003). The major factors that have caused drastic changes in coffee prices in previous years (well demonstrated in Fig. 1) include the occurrence of frost in the production areas of Brazil in 1994, plummeting stocks in 1997 (Wintgens, 2012) and increased coffee production in 2012. Coffee is the primary agro-exportation product in Peru and positions this country among the world's largest coffee producers (Méndez et al., 2015). Moreover, coffee production continues to increase in this country (JNC, 2013; ICO, 2015). Approximately 63% of Peruvian coffee plantations are owned by small-scale farmers, and the size of the plantations is less than

10 ha (Cuadras, 2006), which results in high vulnerability to the instability in coffee prices.

Timber from shade trees may serve as an additional income for local coffee producers and may help to offset the fluctuation in farm income due to varying coffee production and prices. On the basis of a questionnaire survey, Rice (2008) assumed that in Peruvian smallholder coffee plantations,  $28.5 \pm 1.87\%$  of the total income originated from shade-derived sources and in Guatemalan plantations, shade-derived income represented  $18.77 \pm 2.08\%$  of the total value. However, an evaluation of the extent to which the timber production contributes to the economy of coffee producers based on field measurement is still lacking. To estimate the potential timber value stored in the coffee plantations, allometric equations, which can be used to easily calculate the timber volume of standing shade trees, are crucial but are generally lacking. Generalized biomass prediction equations have been developed for tropical species (Chave et al., 2005), but the majority of equations serve to calculate total tree biomass mainly for carbon storage estimation; therefore, they cannot be used to calculate the volume of marketable timber.

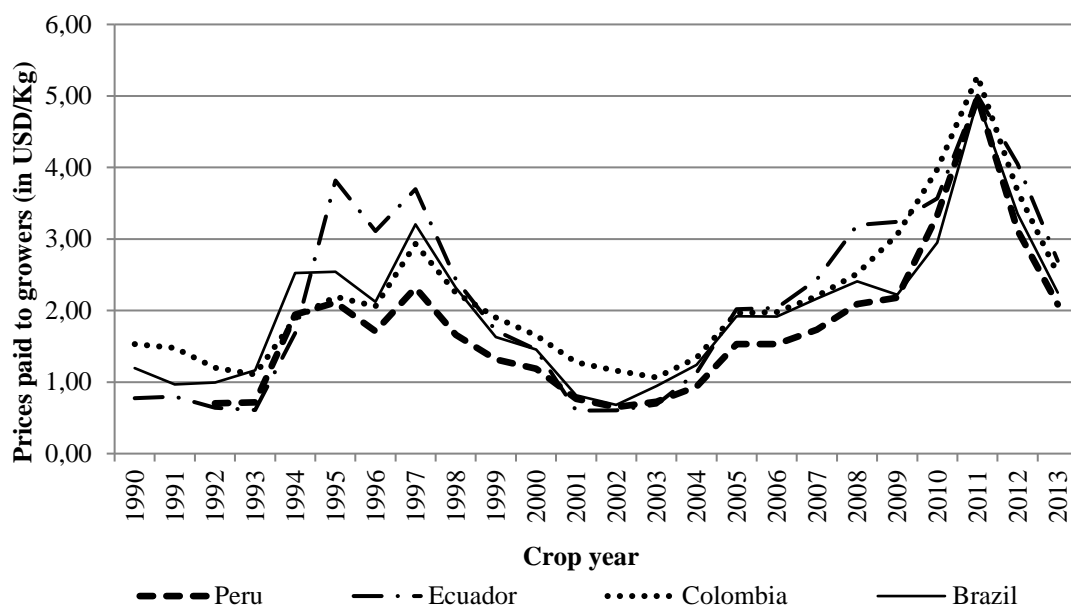


Fig. 1. Prices paid to coffee growers in USD/kg in Peru and neighboring countries from 1990 to 2013 (ICO, 2015). Prices of Peruvian coffee for the period 2006–2013 were calculated from Group indicator prices (ICO, 2015) and verified by coffee growers in Villa Rica and Tingo María.



Economic considerations are among the most important factors that determine the ultimate value and feasibility of agroforestry for the land user. However, the great majority of agroforestry research has concentrated on the biological and physical factors that affect productivity (Nair, 1993), but information on shade tree timber production and its economic value, the key aspects of agroforestry systems, is still lacking. Therefore; the main goals of this paper was to estimate the timber value of shade trees and the extent to which the income from the shade tree timber may contribute to the economy of coffee producers under different coffee price and production scenarios. Specifically, we aimed to estimate timber volumes and the annual timber production of the shade trees and to recalculate these timber volumes as the real economic value that farmers were able to realize in local markets. In addition, to be able assess the timber volume of standing trees, we developed allometric equations for the studied species based on easily measurable stem diameter, which can serve to quick but precise estimation of timber in shade trees. We used data from four fully-sensed coffee plantations dominantly shaded by commonly used shade tree species: native *Inga* spp. (hereinafter *Inga*), non-native *Eucalyptus* spp. (hereinafter *Eucalyptus*) and *Pinus* spp. (hereinafter *Pinus*) as well as prices paid for the timber by local saw-mills.

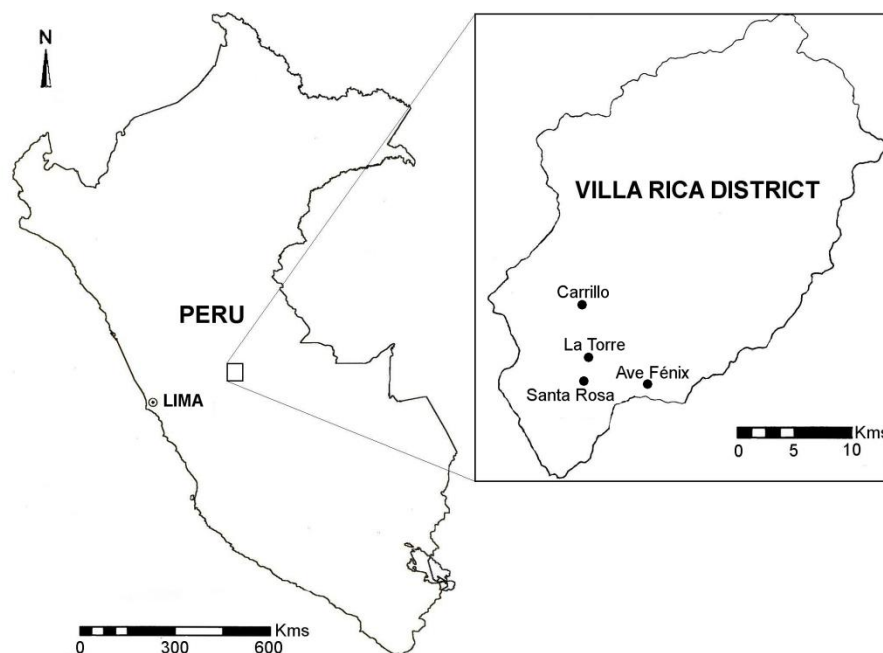
## **10.4 Materials and methods**

### **10.4.1 Study area description**

This study was conducted in the Villa Rica district, Pasco region, Peru. The average annual rainfall in this tropical humid mountain forest zone is 1,590 mm, and the average annual temperature is 17.8 °C (Ponce, 2008). The soils, which are classified as dystric Cambisols (Brack, 2012; Michéli et al. 2006), have low structural stability. The Villa Rica district is one of the most important coffee production areas in Peru due to its landscape, which is characterized by shaded coffee plantations with some cattle farming. Four coffee agroforestry plantations with different dominant shade tree species were selected near Villa Rica town: Avé Fénix (dominated by *Inga*), Santa Rosa (dominated by *Pinus*), La Torre and Carillo (both dominated by *Eucalyptus*). The characteristics and locations of the studied plantations are shown in Table 1 and Fig. 2. The shade trees in these plantations are typically planted at the same time as the coffee shrubs, are removed after 15–20 years and are then replaced by new trees.

**Table 1** Selected plantations, their location (UTM coordinates), area (ha), mean altitude (m a.s.l.), dominant tree species and age (years). (UTM - Universal Transverse Mercator, m a.s.l. – metres above sea level).

Plantation	Site name	X	Y	Area	Altitud e	Dominant tree species	Average age
Santa Rosa	<i>Pinus</i>	471531	8809929	3.98	1540	<i>Pinus</i>	15
La Torre	<i>Eucalyptus</i> I	469052	8811679	0.85	1530	<i>Eucalyptus</i>	11
Ave Fénix	<i>Inga</i>	475784	8808864	7.37	1550	<i>Inga</i>	15
Carillo	<i>Eucalyptus</i> II	471882	8816212	0.96	1660	<i>Eucalyptus</i>	7



**Fig. 2.** Location of the studied plantations

#### 10.4.2 Tree measurement and allometric equations

Diameter at breast height (DBH) and total height were measured, and shade tree species were identified for all trees with DBH  $\geq 10$  cm in all studied plantations. The DBH measurements were then repeated two years after the initial measurements.

The stem diameter at 6 different heights of 258 standing trees of *Pinus*, *Eucalyptus* and *Retrophyllum* was measured for to calculate stem volume. Applying a non-destructive method, stem diameter at the first three heights (0.3 m, 1.3 m and 1.8 m) was measured mechanically using callipers, and stem diameter at the other three heights was measured by remote diameter measurement using FieldMap (Jílové u Prahy, Czech Republic)

technology (these heights were as follows: half of the distance between the ground and the tree crown, at the base of the tree crown and at the top of the tree). The stem diameters from the 6 different heights were used to calculate the stem biomass, using FieldMap software which is based on calculation developed by Černý and Pařez (2005).

The stem volume was estimated from the model profile based on the equation of Riemer et al. (1995), which is:

$$d_h = 2 \left( \frac{i}{1 - e^{q(1.3-H)}} + \left( \frac{d_{1.3}}{2} - i \right) \left( 1 - \frac{1}{1 - e^{p(1.3-H)}} \right) + \frac{\left( \frac{d_{1.3}}{2} - i \right) e^{1.3p}}{1 - e^{p(1.3-H)}} e^{-ph} - \frac{i e^{-qH}}{1 - e^{q(1.3-H)}} e^{qh} \right)$$

where  $d_h$  is stem diameter at height  $h$ ,  $H$  is the total height of the tree,  $d_{1.3}$  is DBH, and  $i$ ,  $p$ ,  $q$  are model parameters. Specifically,  $i$  is the common asymptote for the bottom and top part of the stem, and  $p$  characterizes the bottom part and  $q$  characterizes the top part of the stem.

To calculate the usable timber volume for trees that were not measured at the 6 heights, we developed species-specific as well as general allometric equations, where the commercial stem volume was predicted using either DBH or total height. A visual evaluation of the plotted data suggested that they followed either the power law or Gompertz or logistic functional forms, which were fitted to the data and compared. The formulas used for the models were:

- a) Power law:  $y = a \cdot x^b$
- b) Gompertz:  $y = a \cdot \exp(-b \cdot c^x)$
- c) Logistic:  $y = a / (1 + \exp(b-x)/c)$

where  $y$  is the usable stem volume,  $x$  is the value of the given parameter (DBH or height), and  $a$ ,  $b$  and  $c$  are the model coefficients. The models were created and tested for both the individual species (species-specific models) and for the pooled data (general models). Because there was apparent heteroscedasticity in the majority of the data, we used generalized non-linear models (GNLMs). The best models (species-specific and general) were selected based on the lowest AIC and highest  $R^2$  values. All analyses were performed in R [27] using the “nlme” package [28]. Model selection, fitting and

evaluation followed the recommended procedures and R script reported by Paine et al. (2012).

Using the equations of the best models, we calculated the commercial timber volume of individual trees and then summed these values for each plantation to obtain the total timber stock per plantation. Species-specific allometric equations were used when possible, but for those for which species-specific models were not available, we calculated timber volume using the general model equation. The difference in the total volume between the studied years was the annual timber production. To calculate the total timber value, this timber stock was standardized per unit hectare and multiplied by the local timber prices.

#### 10.4.3 Wood and coffee prices

To assess the real income that a farmer would receive from selling shade tree timber, we determined the timber prices paid to local farmers by the sawmills nearest to Villa Rica town (Table 2). The common practice is that farmers sell standing trees to the sawmill, and the sawmill performs the extraction and other wood treatments; therefore, the price multiplied by the volume of timber sold is the real gain realized by the coffee growers.

**Table 2 Timber prices in Villa Rica town. Prices are indicated for the cubic metres (m<sup>3</sup>) of standing trees. Sources: personal communication with Ivan La Torre, Villa Rica, Selena Contreras (Santa Rosa plantation, Villa Rica), Rianne van der Bom (NGO Amazonas, Villa Rica).**

Species	Maximum prices of timber	Minimum prices of timber
	wood (USD/ m <sup>3</sup> )	wood (USD/ m <sup>3</sup> )
<i>Pinus</i>	5.61	4.49
<i>Eucalyptus</i>	5.61	3.36
<i>Retrophyllum rospigliosii</i>	11.21	11.21

To compare incomes from shade trees with incomes from coffee yield, we surveyed coffee bean production and the relevant selling prices. Due to high variability in coffee prices (Fig. 2), we calculated the incomes from coffee production for three price scenarios: minimum, maximum and average coffee price (Table 3). In addition, we used minimum, maximum and average coffee yields from the studied plantations reported by farmers (Table 3). For all calculations, we used the exchange rate: 1 USD (United States dollar) = 3.15 PEN (Peruvian sol). We did not use the costs of coffee management in our calculations because we considered the income from the timber of shade trees as

a possible means to replace non-stable income from coffee. We assumed that the costs of coffee management are stable.

**Table 3 Coffee prices (USD per kg) and yields (kg per ha), which were used in the calculations. Sources: personal communication with Selena Contreras (Santa Rosa plantation, Villa Rica) and Rianne van der Bom (NGO Amazonas, Villa Rica) and data from cooperativa Divisoria, Tingo María.**

	Minimum	Average	Maximum
<b>Coffee price</b>	0.65 (2002)	3.43 (2014)	4.98 (2011)
<b>Coffee yield</b>	920	1,465	1,840

## 10.5 Results

### 10.5.1 Timber volume allometric equations

The models for stem volume estimation using DBH as a predictor were superior to the models with height as a predictor ( $\Delta AIC > 22.1$ ). Among the models that used DBH, the power law was the best functional form for *Retrophyllum* and *Pinus*, whereas a 3-parameter logistic model was the best for *Eucalyptus* and other species. The selected models proved to predict precisely the volume of stem timber (Table 4).

**Table 4 The best models for stem volume prediction for each of the most frequent tree species and a general model for all other species.**

Species	Model	Model Coefficients			R <sup>2</sup>
		a	b	c	
<i>Eucalyptus</i> sp.	Logistic	6.13	517.76	102.85	0.92
<i>Pinus</i> sp.	Power law	1.53E-07	0.08	-	0.95
<i>Retrophyllum</i>	Power law	3.97E-07	0.05	-	0.97
Others	Logistic	6.40	550.09	107.49	0.91

### 10.5.2 Economic evaluation of individual trees

*Pinus*, *Eucalyptus* and *Retrophyllum* had similar mean volume per individual tree, i.e., approximately 1 m<sup>3</sup>, whereas the mean tree volume of *Inga* was slightly lower (Table 5). The absolute annual timber increment was highest for *Eucalyptus* followed by *Retrophyllum* (Table 5). *Inga* had the lowest timber increment (absolute and relative) of all species. Due to the comparatively higher timber price of *Retrophyllum*, the value of its individual trees was almost double the value of the other species. In addition, *Eucalyptus* trees had a slightly higher value than *Pinus* trees (Table 5).

**Table 5 Mean characteristics and economic evaluation of individual trees: mean timber volume (m<sup>3</sup> per tree); mean annual timber increment (dm<sup>3</sup> per tree); unit price (USD per m<sup>3</sup>) and mean tree price (USD).**

Species	Mean timber volume	Mean annual timber increment	Unit price	Mean tree price
<i>Eucalyptus</i>	1.07a	89.25a	5.65	6.07
<i>Pinus</i>	0.97a	57.96b	5.65	5.49
<i>Retrophyllum rospigliosii</i>	1.02a	82.24c	11.30	11.54
<i>Inga</i>	0.80b	40.5d	-	not traded

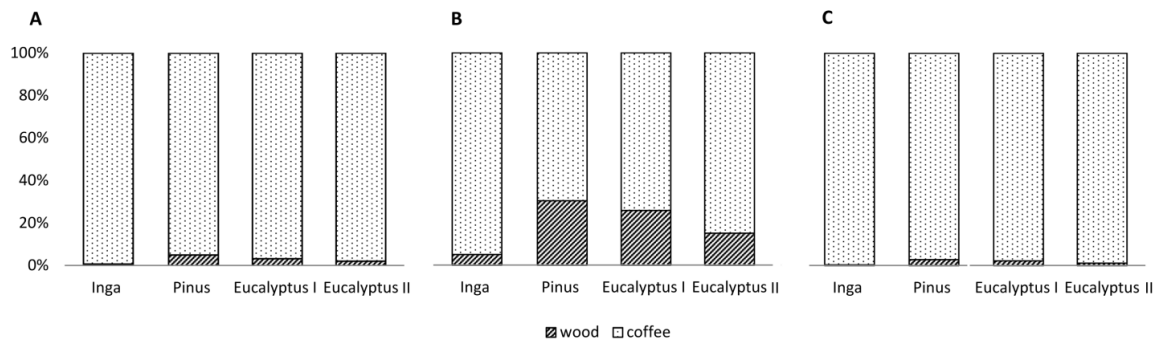
### 10.5.3 Economic evaluation of plantations

We found large differences in growers' income from coffee among the different yield-price scenarios. The income from coffee was 15 times lower in the year with minimum price and yield than in the year with maximum yield and price. The volume of usable timber varied widely, with the lowest value for the *Inga* site and the highest for the *Eucalyptus* site (Table 6). The annual increment of usable timber followed the variation in total timber volume, ranging from 1.75 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> to 48.10 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. The *Inga* site had the lowest price for commercial wood per ha due to the low volume of marketable timber. The *Eucalyptus* I site, which was dominated by 15-year-old *Eucalyptus*, had the highest price (Tab. 6).

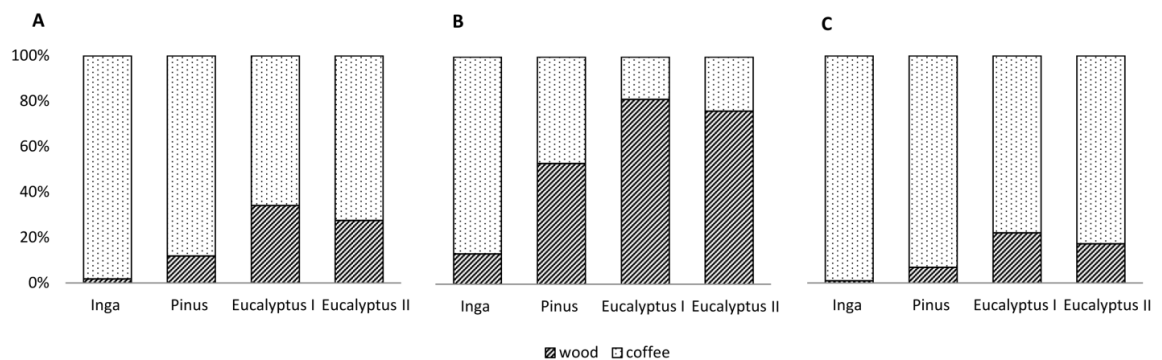
**Table 6 Characteristics and economic evaluation of plantations (min – minimum timber price; max – maximum coffee price).**

Site	Shade tree density Number/ha	Timber volume m <sup>3</sup> /ha	Price USD	Value of timber USD/ha	Timber volume increment m <sup>3</sup> /ha/year	Value of timber increment USD/ha
<i>Inga</i>	176	50.8	min	82	1.7	4
			max	92		4
<i>Eucalyptus</i> II.	472	407.3	min	1151	23.6	66
			max	1908		110
<i>Pinus</i>	124	113.1	min	539	10.9	52
			max	677		66
<i>Eucalyptus</i> I.	209	635.9	min	1546	48.1	145
			max	2599		244

The value of annual timber production was low in comparison with the income from coffee production (Fig. 3). This ratio was highest for the *Pinus* site (30%) where the minimum coffee price and yield values were used, but even under this scenario, the value was only 2.8% for the *Inga* site. The value of total timber volume was high in comparison with the value of coffee production under the lowest coffee price and yield scenario (at the *Eucalyptus* I site, the timber value represented 72% of the total income), but under the scenario of maximum coffee price and yield, the potential income from timber for all studied plantations represented the lowest proportion of total income, generally lower than 14% (Fig. 4).



**Fig. 3. Percent contribution of the annual income from timber wood and coffee for the studied plantations using the following data: A average coffee price and yield; B minimum coffee price and yield; C maximum coffee price and yield. The maximum price was used for the timber wood.**



**Fig. 4. Percentage contribution of the timber wood income and annual coffee income for the studied plantations using the following data: A average coffee price and yield; B minimum coffee price and yield; C maximum coffee price and yield. The maximum price of timber wood was used.**

## 10.6 Discussion

There are various types of motivation for growers to change a monoculture coffee plantation to an agroforestry system, and the vision of an economic benefit is one type of motivation. Our study demonstrated that the contribution of annual timber production from shade trees to the total income of coffee farms may vary significantly due to high variation in coffee prices and yield; however, for most of the coffee price/yield scenarios, this contribution was negligible. Only under a scenario of low coffee price combined with low coffee bean yield and plantations with *Pinus* or *Eucalyptus* does the annual timber produced by shade trees represent a significant proportion (30% or 25%) of farmers' income. Even if the coffee price and yield were minimum, the annual value of *Inga* timber was only 5% and for average coffee price and yield, it was only 0.6%. Similarly, Rice (2008) found that in Peruvian smallholder coffee plantations, shade tree timber only generated 1.7% of farmers' total income (the remainder of the income was generated by coffee, fuelwood, fruit and animals), and in Guatemala it was even less – 1.1%. Hernández et al. (1997) also mentioned that without considering the possibility of negative effects on the environment, it is better for large producers to grow coffee in plantations without shade, but for small growers with limited capacity, agroforestry systems are the best alternative.

Even if the annual increase in timber value is not significant in most cases, the income from shade tree timber is relatively high when the value of the total timber volume of shade trees is compared with the annual coffee production value. In fact, this represents a real case scenario because trees are usually harvested at the same time. The relatively high value of timber stored in shade trees means that shade trees represent an especially good alternative source of income when coffee prices and/or yields are low. However, after the trees are harvested, the plantations do not have shade, and there are costs associated with replanting the shade trees. On the other hand, our study probably overestimates the income and thus contribution of coffee to total income because our analyses only included the value of the coffee beans produced and not coffee plant management and collection. Therefore, these values do not represent the net income of the farmers. In addition, we did not evaluate the potential indirect income from firewood because it is not traded in the study region. It is, however, used for cooking, which decreases the energy costs of farmers.



The relatively high value stored in shade trees that we found in some of the coffee plantations agrees with Peeters (2003), who stated that the value of shade tree timber in terms of traditional shade vegetation is considerable because it serves as a constant and free source of construction material as well as an economic reserve. In addition, shade trees also provide environmental and socioeconomic benefits to growers (Rice 2008). However, our study demonstrated that non-native shade tree species such as *Eucalyptus* and *Pinus* have higher economic value than most native species, which are likely to be more beneficial for local ecosystems. The exception was *Retrophyllum*, a species native to Peru. The value of its timber is much higher than that of the other species. Therefore, it is a potentially good shade tree species for coffee plantations in Peru and may provide both good income as well as ecosystem services.

Tree density determines timber volume and therefore the commercial value stored in the shade trees. In previous studies, the shade tree density varied between 16–278 trees per ha (Dossa et al., 2007; Soto Pinto et al., 2000; Siles et al., 2009; Hergoulac'h et al., 2012; Häger, 2012; Lin, 2007; Rice, 2008), which is comparable to our studied plantations except for the *Eucalyptus* II plantation that had 472 trees per ha, but these trees were young. The relationships between tree density and timber volume in our study are in line with Hernández et al. (1997), who found that 100 and 300 shade trees of *Cordia alliodora* contained 132 and 267 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectively, of timber. However, Peeters et al. (2003) reported that coffee plantations with 176 and 277 *Inga* trees per ha only contained 2.7 and 29 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectively, of timber, which is much less than in our study and the study of Hernández et al. Such low timber volumes in comparison with given tree densities appear to be an underestimate, which may have been due to the young age of the measured trees or to the fact that species- or site-specific allometric equations were not used for volume calculations.

Our study clearly demonstrated that the income from timber wood cannot replace the income from coffee. However, it also showed that non-native *Eucalyptus* shade trees resulted in the highest annual yield and total commercial timber value, but native and relatively rare *Retrophyllum* trees had comparable yield and much higher timber value. There may also be other native species with good growth and high timber value that may provide both high economic yield as well as have positive effects on the ecosystem.

Because agroforestry does not provide growers with sufficient income from timber wood, there is a need for financial motivation and support for agroforestry plantations. This was proposed by Gobbi (2000), who suggested incentives for certified biodiversity-friendly coffee plantations, such as tax relief, payment for environmental services, and soft credits, which could help make the investment more attractive. These financial mechanisms should also promote the use of native tree species as shade trees, which, as we showed, may provide even higher profit than common non-native trees. However, further research on the large-scale production and growing of these native trees is crucially needed.

## **10.7 Acknowledgements**

The authors are grateful to the Marín, Carrillo and La Torre families and Ms. Selena Contreras for their help and for letting us conduct this study on their plantations. We are also thankful for Jorge Mattos Olavarria, director of MapGeosolution, who provided the FieldMap technology. The investigation was financially supported by the POPRAR project CZ.1.07/2.2.00/28.0303 and by project LG15034 - The active involvement of Czech scientists in international research activities of the IALE - International Association for Landscape Ecology.

## **10.8 References**

- Alavalapati, J.R.R., Nair, P.K., 2001. Socioeconomic and institutional perspectives of agroforestry. 71–81 In: Palo, M., Uusivuori, J., (eds). *World Forests, Society, and Environment – Markets and Policies*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Barradas, V.L., Fanjul, L., 1984. La importancia de la cobertura arbórea en la temperatura del agroecosistema cafetalero. *Biótica*. 9 (4), 415–421.
- Beer, J., 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems* 5, 3–13.
- Brack, E. A., 2012. *Ecología del Perú*, ed. Bruno, Lima. 496 p.
- Chave, J., 2005. Measuring wood density for tropical forest trees. *Lab. Evolution et Diversité Biologique*. 1–7.
- Cuadras S., 2006, Peru un país de cafés de altura, cited from: [http://www.forumdelcafe.com/pdf/F\\_07-Peru.pdf](http://www.forumdelcafe.com/pdf/F_07-Peru.pdf), 16.8.2015
- Černý, M., Pařez, J. 2005. Zjišťování objemu a sortimentace stojících stromů s využitím modelu tvaru kmene. *Lesnická práce*. 12 (84), 22–25.
- Daviron, B., Ponte, S., 2005. The coffee paradox: Commodity trade and the elusive

promise of development. London: Zed Books.

- Dossa, E.L., Fernandes, E.C.M., Reid, W.S., Ezui, K., 2007. Above- and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agroforestry Systems*. 72, 103–115.
- Garrett, H.E., Rietveld, W.J., Fisher R.F., 2000. *North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 402 pp.
- Gobbi, J. A., 2000. Is biodiversity-friendly coffee financially viable? An analysis of five different coffee production systems in western El Salvador. *Ecol. Econ.* 33, 267–281.
- Häger, A., 2012. The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 86, 159–174.
- Hergoulac'h, K., Blancart, E., Skiba, U., Hénault, C., Harmand, J.M., 2012. Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 148, 102–110.
- Hernández, O.G., Beer, J., Henning von Platen, 1997. Rendimiento de café (*Coffea arabica* cv Caturra), producción de madera (*Cordia alliodora*) y análisis financiero de plantaciones con diferentes densidades de sombra en Costa Rica. *Agroforestería en las Americas*. 13(4), 8–13.
- ICO (International Coffee Organization). 2003. Impact of the coffee crisis on poverty in producing countries. London: ICO. INIDE (Instituto Nacional de Información de Desarrollo). Cited from web page: <http://www.ico.org/documents/icc89-5r1e.pdf>
- ICO (International Coffee Organization). 2015. Historical Data on the Global Coffee Trade, cited from web page: [http://www.ico.org/new\\_historical.asp?section=Statistics](http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics)
- Jiménez-Avila, E., Martínez, V.P., 1979. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero II. Producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. *Biótica*. 4, 109–126.
- JNC (Junta Nacional del Café), 2013. Evolución de la producción de café en el Perú (1999 – 2012). Cited from web side: <http://juntadelcafe.org.pe/publicaciones/produccion-de-cafe-entre-los-anos-1999-y-2012>
- Lin, B.B., 2007. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*. 144, 85–94.

- Michéli, E., Schad, P., Spaargaren, O., Dent D., Nachtergale, F., 2006. World reference baser for soil resources. World Soil Resources Reports 103. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Méndez, J. M., Pantigoso, P., Paredes, J. & Bellina, J. C. Guía de Negocios e Inversión en el Perú Contactos I EY Perú. (2015).
- Nair, P.K.R.. 2001. Agroforestry in Our Fragile World: Challenges and Opportunities for Sustainable Development, Forerunner to The Encyclopedia of Life Support Systems, Chapter 1.25: 375–393. UNESCO, Paris, France & EOLSS, UK
- Nair, P.K.R., 1993. An Introduction to Agroforestry. Kluwe Academic Publishers. 499 p.
- Paine, C. E. T., Marthews T. R., Vogt D. R., Purves D., Rees M., Hector A., Turnbull L. A., 2012. How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. *Methods in Ecology and Evolution*. 3, 245–256.
- Peeters, L. Y. K., Soto-Pinto, L., Perales, H., Montoya, G., Ishiki, M., 2003. Coffee production, timber, and firewood in traditional and Inga shaded plantations in Southern Mexico. 95, 481–493.
- Ponce, M.G., 2008. Plan de Desarrollo Concentrado de Villa Rica 2009–2018. Municipalisas distrital de Villa Rica. provincia Oxapampa – Región Pasco. 163 pp.
- Rice, R.A., 2008. Agricultural intensification within agroforestry: The case of coffee and wood products. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 128, 212–218.
- Sloboda, B., 1995. Ein Modell zur Beschreibung von Baumschaften. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*. 166(7), 144–147.
- Scherr, S. J., 2004. Building opportunities for small-farm agroforestry to supply domestic wood markets in developing countries. *Agroforestry Systems*. 61, 357–370.
- Siles, P., Harmand, J.M., Vaast, P., 2009. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. *Agroforestry Systems*. 78, 269–286.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernandez, J., Caballero-Nieto, J., 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 80, 61–69.
- Wintgens, J.N. 2012. Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers, WILEY-VCH Verlag CmbH & Co. KCA, Weinheim. 983 p.

## 11 Celkový závěr

Agrolesnické systémy hrají zvláště důležitou roli ve vázání uhlíku v tropických oblastech, kde došlo v posledním století k drastickému úbytku původních lesních ekosystémů. Množství vázaného uhlíku na kávových plantážích závisí na typu plantáže (agrolesnická nebo monokulturní) a dále na druzích použitých jako stínící dřeviny, pokud je plantáž pěstována v zástinu. V předložené práci byly sledovány tři agrolesnické plantáže s různými druhy dominantních stínících dřevin a část plantáže Ave Fénix bez zástinu. Celkové množství vázaného uhlíku (v nadzemní biomase kávovníků a stínících dřevin s DBH > 100 mm, v opadu, v kořenech stínících dřevin a v půdě do hloubky 300 mm) bylo na sledovaných stanovištích následující: stanoviště s dominancí dřevin *Inga* spp. (Ave Fénix 1):  $119,9 \pm 19,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , stanoviště bez zástinu (Ave Fénix 2):  $99,7 \pm 17,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , stanoviště zastíněné převážně druhy rodu *Pinus* (Santa Rosa):  $177,5 \pm 14,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a stanoviště, kde dominovaly druhy rodu *Eucalyptus* (Carrillo):  $162,3 \pm 18,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . Z měření vyplývá, že introdukované dřeviny (*Pinus* spp. a *Eucalyptus* spp.) vážou více uhlíku, nežli původní druhy reprezentované při tomto měření rodem *Inga* spp. Je nutné si uvědomit, že se sice introdukované dřeviny jeví jako nejvýhodnější z hlediska vázání uhlíku, ale stále se s jejich použitím spojují i možné negativní dopady. Z tohoto důvodu by se měly programy na podporu vázání uhlíku zaměřit nejen na jeho množství, ale i na další ukazatele, jako je například biodiverzita, úrodnost půdy, hydrické vlastnosti a výskyt chorob kávovníku. Pokud se zaměříme na prostorové rozložení uhlíku na plantážích, zjistíme, že nejvíce uhlíku bylo vázáno v půdě (57 až 99 %), následovala nadzemní biomasa stínících dřevin (23–32 %), podzemní biomasa stínících dřevin (8–9 %), biomasa kávovníků (0,2–2 %) a opad (1 %). Výsledky této studie mohou být zobecněny pro agrolesnické kávové plantáže, kde je kávovník pěstován ve srovnatelné nadmořské výšce a na podobných půdních podmínkách. Zjištění předloženého měření lze využít pro zapojení agrolesnických kávových plantáží například do projektů REDD+. Zvláště by měly být programy na podporu vázání uhlíku zaměřeny na motivaci přechodu z monokulturních agrolesnických plantáží na plantáže agrolesnické.

Vzhledem k značné obavě z negativních dopadů změny klimatu na zemědělskou produkci v tropických oblastech, je důležité zjistit, jak ovlivňuje zástin mikroklima na kávových plantážích. Z námi naměřených dat ze zastíněné a nezastíněné části plantáže Ave Fénix vyplývá, že stínící dřeviny udržují nižší teplotu vzduchu a půdy a vyšší vlhkost stanoviště

oproti nezastíněným plantážím. Po celou dobu měření byla průměrná měsíční teplota vzduchu nižší na zastíněné ploše o  $0,4 \pm 0,04^\circ\text{C}$  oproti ploše zastíněné a vlhkost vzduchu vyšší o  $3,9 \pm 0,4 \%$ . Půda měla také nižší průměrnou měsíční teplotu na zastíněné ploše o  $1,7 \pm 0,3^\circ\text{C}$ . V zástinu byly denní výkyvy v chodu teploty vzduchu a půdy a vlhkosti vzduchu mírnější. Půdní vodní potenciál vykazoval sušší podmínky na zastíněné ploše oproti ploše bez zástinu. Během měření začínalo období sucha dříve a končilo později na zastíněných plochách, což může být způsobeno kompeticí o vodu mezi stínícími dřevinami a kávovníkem. V horní vrstvě půdy (hloubka 100 mm) bylo stanoviště sušší na nezastíněné ploše a naopak na zastíněné ploše, bylo stanoviště sušší ve větší hloubce (400 mm). Tyto výsledky se dají interpretovat tak, že dřeviny si konkurují s kávovníkem o vodu ve větších hloubkách půdy, kdežto horní vrstvy jsou zástinem chráněny proti nadměrnému vysoušení, které se projevovalo v horních vrstvách půdy na nezastíněné ploše. Celkově výsledky mikroklimatických měření na agrolesnické kávové plantáži Ave Fénix naznačují, že stínící dřeviny pomáhají kávovníku na místech, kde trpí klimatickými extrémy tím, že zmírňují denní výkyvy teploty (vzduchu a půdy) a vlhkosti vzduchu. Tato skutečnost je velmi důležitá, neboť agrolesnické systémy takto mohou pomoci kávovníku vyrovnat se s klimatickými extrémy. Na druhou stranu výsledky naší studie také ukazují, že zejména v sušších obdobích roku, si může kávovník se stínícími dřevinami konkurovat o vodu.

Kávová rez (*Hemileia vastarix*) je jednou z nejobávanějších chorob kávovníku vyskytující se na všech územích, kde je kávovník pěstován. Problémy pěstitelů kávy s kávovou rzí na plantážích v okolí městečka Villa Rica, vedly autorku k provedení výzkumu závislosti výskytu kávové rzí na různých faktorech. Z výsledků měření vyplývá, že nejdůležitější roli ve výskytu této choroby hraje varieta kávovníku. Ze zkoumaných dvou odrůd kávovníku ('Catimor' a 'Caturra') odolávala nejlépe kávové rzí odrůda 'Catimor'. Dalším důležitým faktorem ovlivňujícím nemocnost byl věk kávovníku, kdy s rostoucím věkem roste pravděpodobnost výskytu této choroby. Ve zhruba dvacátém roce stáří kávovníku prudce roste výskyt *Hemilia vastarix* u obou sledovaných odrůd, a proto je pěstitelům doporučeno začít s obnovou plantáží mezi 15. až 20. rokem stáří kávovníků. I přesto, že jedním z cílů výzkumu bylo objasnit roli zástinu na výskyt kávové rzí, jeho role nevyplývala z provedených studií příliš jasně. Výsledky se lišily v závislosti na plantážích i na sezóně. Jistý trend v nemocnosti se dal vyzorovat, pokud se od sebe oddělily výsledky pro měření openness  $10^\circ$  a  $75^\circ$ . Při užším výseku hemisférické fotografie

(10°) byl efekt zástinu statisticky významný pro období dešťů (měření z roku 2014) a při širším záběru hemisférické fotografie (75°) byl efekt zástinu statisticky významný pro období sucha (měření z roku 2011). Navíc se z výsledků efektu zástinu na výskyt kávové rzi zdá, že u odrůdy 'Catimor' se zvyšujícím se zástinem nemocnost roste a naopak u odrůdy 'Caturra' se zvyšujícím se zástinem nemocnost klesá. Zjištění, že zástin nepodporuje výskyt kávové rzi na sledovaných plantážích je důležité zejména proto, že jedním z argumentů proti pěstování kávovníku v agrolesnických systémech, je větší pravděpodobnost výskytu této choroby se zvyšujícím se zástinem. Se zvyšující se hustotou výsadby se zvyšovala pravděpodobnost onemocnění kávovou rzí ve většině sledovaných kombinací sezóna/odrůda/plantáž. Vliv půdy na onemocnění kávovou rzí nebyl prokázán. Prokazatelně byly sledované kávovníky více nemocné v období dešťů (měření z roku 2014), nežli v období sucha (měření z roku 2011).

Existují různé motivace majitelů monokulturních kávových plantáží k tomu, aby přešli na agrolesnické systémy, a možnost příjmů z prodeje dřeva je jednou z nich. V předložené práci byly porovnány agrolesnické kávové plantáže s různými stínícími dřevinami za účelem zjistit, jak vysoký může být příjem z prodeje dřeva stínících dřevin v porovnání s příjmy z prodeje kávy. Po srovnání možných příjmů z prodeje dřeva s různými kombinacemi velikosti cen a sklizně, jsme došli k závěru, že druh stínící dřeviny hraje významnou roli. Nejnižší finanční hodnocení měly plantáže s dominancí dřevin rodu *Inga*, nejlepší naopak plantáže, na kterých dominovaly druhy rodů *Pinus* a *Eucalyptus*. Nejvíce by se mohly podílet na příjmech plantáže s dominující stínící dřevinou *Eucalyptus* spp. v období nízkých cen a nízké sklizně kávy, a to 72 %. Pokud se podíváme na možný roční příjem z přírůstů dřevin, tak zjistíme, že i v období nízkých cen a sklizně kávy je největší možný příjem u stínících dřevin *Pinus* spp., a to 30 % z příjmů za kávu. Uvedené výsledky ukazují, že stínící dřeviny nemohou plně nahradit kolísání cen kávovníku, ale mohou krátkodobě pomoci pěstitelům vyrovnat se s propadem cen. V každém případě je třeba hledat další motivace, jako například platby za environmentální služby, certifikace pro plantáže, které jsou pěstovány v souladu ochrany přírody a další ekonomické nástroje, které mohou motivovat pěstitel k přechodu na agrolesnické plantáže. Dalším důležitým zjištěním, byl fakt, že původní druh *Retrophyllum rospigliosii*, který je v současné době zastoupen na plantážích jen v malých počtech, má větší objem dřeva jednotlivých stromů a také prodejní cenu dřeva než introdukované stínící dřeviny. Tento výsledek poukazuje na to, že je možné pěstovat i

místní druhy s výnosy srovnatelnými nebo i vyššími než mají introdukované dřeviny, a navíc tím podpořit biodiverzitu agrolesnických plantáží.

Výsledky jednotlivých studií ukazují, že vliv rozdílných typů zástinu na vybrané vlastnosti plantáží *Coffea arabica* je velmi různorodý. Při hodnocení množství vázání uhlíku a příjmů ze stínících dřevin ve vztahu k agrolesnickým plantážím, byly nejlépe hodnoceny plantáže zastíněné introdukovanými dřevinami *Eucalyptus* spp. a *Pinus* spp. Vliv zástinu na mikroklima ve vztahu ke kávovníku lze hodnotit pozitivně i negativně, záleží na množství srážek v daném období a dalších attributech. Nejvíce kontroverzní téma, tedy vliv zástinu na výskyt kávové rzi, nebylo výzkumem zcela objasněno. Výsledky však ukazují, že zástin nezpůsobuje jednoznačný nárůst výskytu kávové rzi, jak deklarovaly některé starší studie.

Z provedených studií vyvstalo mnoho nových otázek pro další výzkum. Nejen agrolesnické systémy s kávovníkem, ale i s dalšími plodinami, jsou velmi významným tématem a autorka by se mu ráda věnovala i do budoucna.



## 12 Summary

Agroforestry systems play an important role in fixing carbon in agricultural landscapes that have lost their original forest cover. The amount of sequestered carbon depends on the type of plantation (agroforestry or monoculture) and on the tree species used for shading, if there is shade. This study investigated three coffee plantations with different dominant shading trees, including *Inga* spp., *Pinus* spp. and *Eucalyptus* spp. These agroforestry systems were also compared to a coffee plantation without shading trees. The total carbon stock for the site dominated by *Inga* spp. was  $119.9 \pm 19.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , while for the sites dominated by *Pinus* spp. it was  $177.5 \pm 14.1 \text{ Mg ha}^{-1}$  and for the site dominated by *Eucalyptus* spp. it was  $162.3 \pm 18.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ . In the Sun coffee site the ecosystem carbon stock was  $99.7 \pm 17.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Most carbon was fixed in the soil compartment (57–99 %), followed by aboveground tree biomass (23–32 %), tree belowground biomass (8–9 %), coffee shrubs (0.2–2 %) and litter (1 %). The results should be generally applicable to agroforestry coffee plantations with organic certification, where the coffee is grown at a comparable altitude, in a similar climate and with comparable soil conditions. The carbon sequestration potential can also be considered in REDD+ programs in which Peru could participate.

There is substantial concern about the impacts of climate change on agricultural production in the tropics. It is important to find out how shade affects the microclimatic conditions in the coffee plantations. Our measurement shows that shading reduced the mean air temperatures by  $0.4 \pm 0.04 \text{ }^\circ\text{C}$  and increased the air humidity by  $3.9 \pm 0.4 \text{ %}$  compared to the non-shaded site. Soil temperature was lower on the shaded site by  $1.7 \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$  compared to the non-shaded site. The daily fluctuations of air and soil temperatures were lower on shaded site. We recorded drier soil conditions at the shaded site, where the dry season (defined in terms of soil water availability) always started earlier and lasted longer. We believe that in our study, the reason that the dry season always started earlier and lasted longer at the shaded site is that shade tree roots exhausted a significant part of the soil water during the dry season. This would suggest that the shade trees had a competitive effect on the coffee plants in terms of water availability. Moreover, at the non-shaded site, the soil was drier at the depth of 100 mm, while at the shaded site the soil at 400 mm was drier. These may be explained by the non-shaded site being dried more by the sun whereas the shaded site was dried more by tree roots. Our

results showed that shaded trees can protect crops in areas subjected to temperature climate extremes. On the other hand, the high air humidity during the wet season could be problematic because of the increased risk of coffee shrub fungal diseases.

Coffee leaf rusts (CLR), caused by *Hemileia vastarix*, is one of the most serious diseases of coffee plantations and cause great losses in coffee production. The problems with CLR in plantations around the Villa Rica village lead the author to evaluate the investigation about the dependence of different factors to CLR incidence. At all plantations, coffee variety had a significant effect on CLR incidence, with the ‘Catimor’ variety infected less frequently than ‘Caturra’. Coffee plant age had a significant positive effect on CLR incidence. Increasing coffee density also increased CLR incidence for some of the studied plantations/seasons. Comparing those plots from which data were collected in the dry and wet seasons, we found that CLR presence was significantly higher in the wet season. The effect of shade on CLR incidence was not clear. ‘Catimor’ and ‘Caturra’ varieties showed opposite trends of CLR incidence in response to shade quantity in most cases (‘Caturra’ variety CLR incidence was decreasing with shading increase and ‘Catimor’ CLR incidence decreasing with decreasing shading). Canopy openness 10° had effect on CLR incidence only in the wet season, and canopy openness 75° had effect on CLR incidence in the dry season. The conversion of agroforestry to monoculture plantations is not recommended as a way to reduce the CLR presence, as the relationship between the amount of shade and the CLR presence remains unclear, and, moreover, such a transition would result in loss of the various benefits provided by agroforestry. Finally, the soil properties did not affect CLR incidence.

There are various types of motivation of coffee growers to change a monoculture coffee plantation to an agroforestry system, and the vision of an economic benefit is one type them. Here, we estimated the incomes that could be obtained from shade trees from different types of agroforestry plantations and we determined the extent to which the timber from the shade trees may substitute income from coffee under different coffee price and yield scenarios. Our results showed that the value of the timber stored in shade trees varied significantly. It represented only 2% (the lowest relative value) of the annual income from coffee production in the coffee plantation dominated by native *Inga* spp. trees in years with maximum coffee prices and yield. In the other hand it was considerably higher in the coffee plantation with non-native *Pinus* spp. and *Eucalyptus* spp. Trees,

where it reached up to 72% in years with minimum coffee prices and yield. The economic value of annual timber production of shade trees was negligible in all scenarios and even in the lowest price and yield scenarios it was just 30% of incomes from coffee (in *Pinus* spp. dominated plantation). It is evident that shade trees may be a good economic reserve for coffee growers especially in years of low coffee prices if non-native (*Eucalyptus* spp. and *Pinus* spp.) tree species are planted. In each case agroforestry does not provide growers with sufficient income from timber wood, there is a need for financial motivation and support for agroforestry plantations. Using individual-tree data we also found that the relatively rare native shade tree *Retrophyllum rospigliosii* had much higher timber value compared to that of non-native tree species. This result suggests that using native tree species with high timber value as shade trees instead of exotic species may increase economic income of coffee growers as well as is likely to support ecosystem services provided by the shade tree layer in coffee plantations.

Results of presented study indicate, that the influence of different type of shade on attributes of plantations of *Coffea arabica* vary a lot. When evaluating the carbon stock and incomes from shade trees in agroforestry plantations, the plantations dominated by non-native species *Eucalyptus* spp. and *Pinus* spp. were more advantageous. The influence of shade to microclimate can be evaluated positively or negatively, depending on rains in the given period and on other attributes. The most controversial theme, the influence of shade on CLR incidence, was not exactly explained. However our results show that there is no increase of CLR incidence with increasing shading.

There are many new questions obtained from the studies made in this thesis. Not just coffee agroforestry systems, but agroforestry systems in general are very important theme and the author wants to study it more in the future.

### 13 Seznam použitých symbolů, zkratek a převodní faktory

apod.	a podobně
CLR	Coffee Leaf Rust (rez kávová)
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
DBH	průměr kmene ve výšce 1,3 m od povrchu země (výčetní výška)
et al.	a ostatní
FAO	Food and Agriculture Organization
g	gram; jednotka hmotnosti (1 000 g = 1 kg)
ha	hektar; plošná míra (1 ha = 10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )
ICRAF	World Agroforestry Centre
IGA in	Interní Grantová Agentura MENDELU v
kg	kilogram; jednotka hmotnosti (1 kg = 1 000 g)
km	kilometr; jednotka délky (1 km = 1 000 m)
m	metr; jednotka délky (1 m = 1 000 mm)
m n. m.	nadmořská výška (metrů nad mořem),
MENDELU	Mendelova univerzita v Brně
Mg	Megagram (častěji tuna) – jednotka hmotnosti, 1 000 kilogramů
mm	milimetr; délková míra (1 mm = 10 <sup>-3</sup> m) a míra srážek (1 mm = 1 litr vody na 1 m <sup>2</sup> plochy)
N	dušík
např.	například
obr.	Obrázek
POPRAR	Projekt OP VK: Podpora praktických kompetencí projekční činnosti v regionálním rozvoji
tab.	tabulka
USA	Spojené státy americké
UTM	Univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic
var.	varieta
X (UTM)	souřadnice y v univerzálním Mercatorově systému souřadnic
Y (UTM)	souřadnice y v univerzálním Mercatorově systému souřadnic
°C	stupeň Celsia
°; ', "	stupeň, minuta, vteřina (zeměpisné souřadnice)
%	procento (1/100 celku)

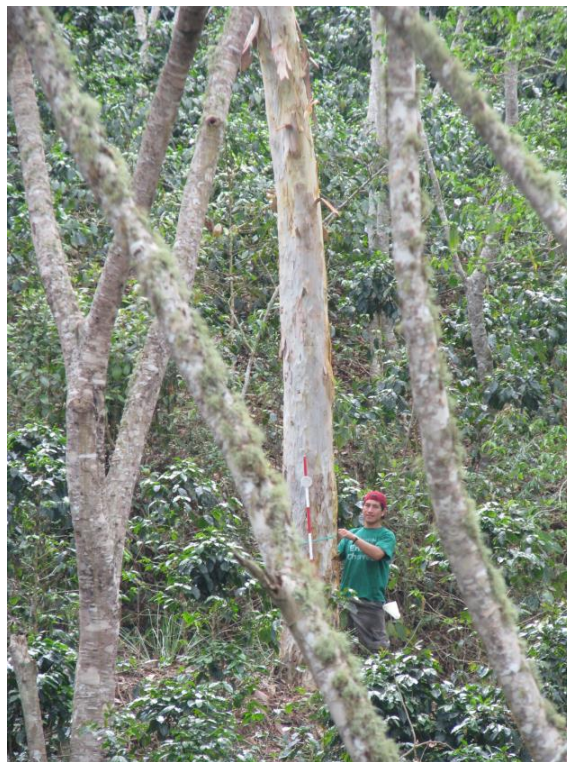
## **14 Fotografické a obrázkové přílohy**

- Obr. I. Měření s technologií Field Map na plantáži Ave Fénix
- Obr. II. Měření s technologií Field Map na plantáži Ave Fénix
- Obr. III. Odběr půdních vzorků na plantáži Ave Fénix
- Obr. IV. Opakované měření výšek na plantáži Santa Rosa
- Obr. V. Stahování dat z přístroje Minikin
- Obr. VI. Stahování dat z půdních čidel MicroLog na plantáži Ave Fénix
- Obr. VII. Měření stínících dřevin na plantáži La Torre
- Obr. VIII. Instalace informační tabule o výzkumu agrolesnických kávových plantážích v okolí Villa Rica
- Obr. IX. Rodokmen kávovníku





**Obr. I. Měření s technologií Field Map na plantáži Ave Fénix.**



**Obr. II. Měření s technologií Field Map na plantáži Ave Fénix.**

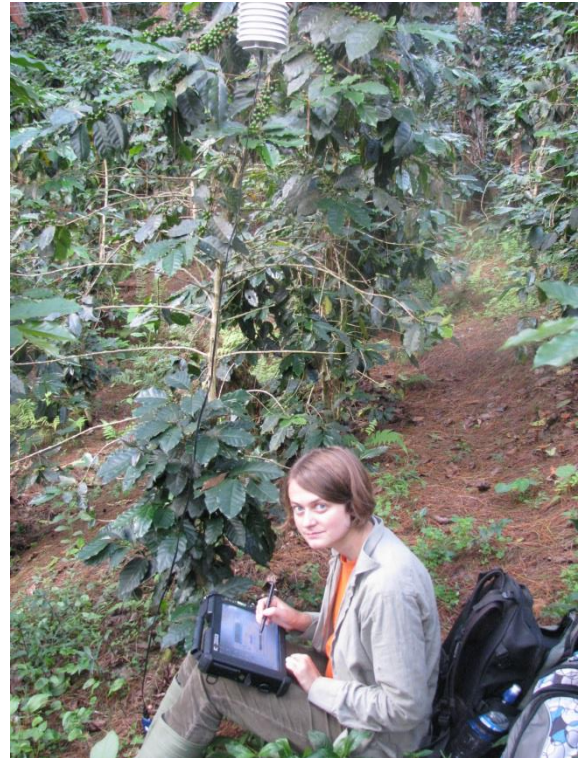


**Obr. III. Odběr půdních vzorků na plantáži Ave Fénix.**





**Obr. IV. Opakované měření výšek na plantáži Santa Rosa.**



**Obr. V. Stahování dat z přístroje Minikin.**



**Obr. VI. Stahování dat z půdních čidel MicroLog na plantáži Ave Fénix.**





Obr. VII. Měření stínících dřevin na plantáži La Torre.



Obr. VIII. Instalace informační tabule o výzkumu agrolesnických kávových plantáží v okolí Villa Rica u příležitosti školení místních studentů a ukázce výzkumných ploch paní Zuzaně Šeptunové. Na fotografii je také zástupce firmy Map Geosolution, Jorge Mattos a vedoucí neziskové organizace ONG Amazonas Rianne Van der Bom.



