



**UNIVERSIDADE  
E D U A R D O  
MONDLANE**

**FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL**

**SECÇÃO DE USO DE ÁGUA E TERRA**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MÉTODOS DIRECTOS E INDIRECTOS NA  
MEDIÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR NO SISTEMA DE CULTIVO  
CONSOCIADO DE MILHO E FEIJÃO NHEMBA**



**Autor: Joel Horácio Luís**

Maputo, Fevereiro de 2025

Joel Horácio Luís

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE MÉTODOS DIRECTOS E INDIRECTOS NA  
MEDIÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR NO SISTEMA DE CULTIVO  
CONSOCIADO DE MILHO E FEIJÃO NHEMBA**

Projecto Final submetido à Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Agronómica.

**Supervisor: Eng<sup>o</sup> João Benedito Nuvunga (MSc)**

**Co-Supervisores: Prof. Doutor Sebastião Famba**

**Prof. Doutor Emílio Magaia**

Maputo, Fevereiro de 2025

## **DEDICATÓRIA**

Aos meu Pais

Horácio Luís e Aissa Cheia

Que me fizeram crescer

DEDICO

Ao meu irmão Carêncio, pelo apoio  
sustentação para cobrir minhas despesas  
na universidade

OFEREÇO

## AGRADECIMENTOS

À Deus, todo poderoso, pela vida, amor, protecção, por estar sempre presente nas minhas dificuldades, lutar minhas batalhas, por ter erguido meu ânimo e força toda vez que tive vontade de desistir na minha jornada;

Ao projecto *On – farm Plot Monitoring* (financiamento do CIRAD) pelo apoio financeiro para a realização de actividades de campo;

Ao projecto *InterCropVALUES* (financiamento da União Europeia) pelo apoio para impressão e encadernação do relatório final;

Aos meus irmãos Domingos Horácio, Mariza Horácio, Fernando Horácio, Carlitos Horácio e Artur Horácio por me darem força e apoio sempre que preciso;

Ao Eng<sup>o</sup> João Nuvunga (MSc), pela supervisão, ensinamentos não só para a realização deste trabalho, mas também para a vida toda, a pessoa mais paciente e humilde que conheci durante a realização deste trabalho;

Ao Professor Doutor Sebastião Famba por sempre estar pronto para me ouvir e me ajudar na realização do trabalho;

Ao Professor Doutor Emílio Magaia, por sempre me corrigir e oferecer melhores alternativas para a realização do trabalho;

Ao Professor Doutor François, pelo despertar de consciência, ensinamentos e supervisão;

Ao meu Pastor Lovemore, que me ensinou os caminhos do Senhor e tem me ajudado a me manter firme na palavra do Senhor;

Aos meus queridos amigos, Domingos Carlitos, Yud Caetano, Zacarias Cairo, Filipe Milando, Cainde Torres e Altaf Taria pela ajuda com os trabalhos de campo e companhia;

Às minhas queridas amigas Luísa Joaquim, Yolanda Adalmira, Lucrécia Langa, Maria Augusta, Chantel Faria, Shelcia Nhacudine, Amélia Tamele, Helena Isabel, Isoldina Rafael, Anatórcia Armando, Cristiana Cardoso, Cátia Banguene e Eurídice Chiwissa pelo apoio durante a realização das tarefas no campo, pela companhia e carinho;

Aos meus colegas e minhas colegas, Paulo, Marcelino, Árabe, Catarina, Fernanda, Nilza e Dircy pela assistência durante a realização deste trabalho;

À minha Tia Maria Teresa e ao meu Tio Ângelo Missiasse pelo apoio moral e emocional;

Aos meus amigos e amiga de longa data, Edilson Ucolor, Ananias Manuel, Domfilipe Ruano, Virgínia Jeque, por terem estado comigo, sempre me ensinando e fortalecendo;

Ao Sr Betuel, que me ajudou desde o primeiro dia até o fim do ensaio, pelos ensinamentos, repreensões, ter estado presente sempre que precisasse. Foi como um pai, amigo;

Aos técnicos Edy, Sr Ricardo, Sr Moisés e Sr Basílio pelo auxílio com materiais e equipamentos para a realização deste trabalho;

Aos Eng<sup>os</sup> Kemal Vaz, Francisco Munguambe e Aires Mavulula, por directa e indirectamente terem me dado assistência e ensinamentos relevantes para a realização deste trabalho;

À todos que de forma directa e indirectamente contribuíram e ajudaram para a realização deste trabalho;

TAKHUTA!

### **DECLARAÇÃO DE HONRA**

Declaro, por minha honra, que este trabalho é de minha autoria e nunca foi apresentado na sua essência ou parte dela para a obtenção de qualquer grau acadêmico e que constitui o resultado de investigação feita por mim. Estando no texto e na bibliografia as fontes utilizadas. A autenticidade dos resultados deste trabalho tem como testemunho os supervisores da mesma.

---

(Joel Horácio Luís)

Maputo, aos ..... de ..... de 2025

## ÍNDICE

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	ii
<b>DECLARAÇÃO DE HONRA</b> .....	iv
<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Problema e justificação de estudo.....	2
1.2. Objectivos .....	3
1.2.1. Geral.....	3
1.2.2. Específicos .....	3
1.3. Hipótese .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1. Índice de área foliar, conceito e importância .....	4
2.2. Factores que influenciam o índice de área foliar .....	4
2.3. Métodos directos de medição do IAF .....	7
2.3.1. O Método Directo ImageJ .....	7
2.3.2. O Método Directo Petiole Pro .....	9
2.3.3. Medições Lineares.....	11
2.3.4. O Método Gravimétrico .....	11
2.4. Métodos Indirectos de Medição do IAF .....	12
2.4.1. O Método Indirecto LAI-2200C (Li-Cor), descrição e funcionamento .....	14
2.4.2. O Método Indirecto AccuPAR LP-80, descrição e funcionamento.....	17
2.5. Avaliação de incertezas de medição.....	18
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
3.1. Descrição da área de estudo.....	24
3.2. Delineamento experimental .....	24

3.3.	Maneio do Ensaio .....	25
3.4.	Variáveis e procedimentos nas Medições do IAF .....	27
3.5.	Determinação do Rendimento das culturas.....	34
3.6.	Análise de Dados .....	35
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
4.1.	Precisão (“ <i>Precision</i> ”) das Medições do índice de área foliar .....	37
4.2.	Exactidão (“ <i>Accuracy</i> ”) das Medições do índice de área foliar .....	38
4.3.	Relação entre o índice de área foliar e rendimento das culturas.....	41
5.	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	42
5.1.	Conclusões .....	42
5.2.	Recomendações.....	42
6.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	43
7.	<b>ANEXOS</b> .....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interface do ImageJ .....	8
Figura 2: Interface do Petiole Pro .....	9
Figura 3: Papel de calibração para área foliar.....	10
Figura 4: Vista espacial do analisador da canópia da planta LAI-2200C .....	15
Figura 5: Tampas de visão .....	15
Figura 6: Arranjo das lentes, filtro óptico e bandas angulares no sensor óptico.....	16
Figura 7: Vista espacial do AccuPAR LP-80/LAI Ceptômetro.....	17
Figura 8: Área de amostragem.....	27
Figura 9: Medições de leituras A e B .....	29
Figura 10: Colecta e preparação das amostras .....	30
Figura 11: Calibração da escala no imageJ.....	31
Figura 12: Conversão da imagem em monocromática .....	31
Figura 13: Limiarização da imagem .....	32
Figura 14: Determinação da área foliar com o <i>ImageJ</i> .....	32
Figura 15: Determinação da área foliar com o Petiole Pro.....	33
Figura 16: Comparação da exactidão dos métodos indirectos no cultivo puro de milho .....	39
Figura 17: Comparação da exactidão dos métodos indirectos no cultivo puro de Feijão Nhemba .....	39
Figura 18: Comparação da exactidão dos métodos indirectos no cultivo consociado.....	40
Figura 19: Relação entre o índice de área foliar e rendimento das culturas .....	41
Figura 20: Limites de concordância de medições do IAF no Cultivo Puro de Milho .....	53
Figura 21: Limites de concordância de medições do IAF no Cultivo Puro de Feijão Nhemba .....	53
Figura 22: Limites de concordância de medições do IAF no Cultivo Consociado de Milho e Feijão Nhemba.....	53
Figura 23: (A) Testagem do sistema de rega e (B) limpeza do campo .....	54
Figura 24: (A) Emergência e (B) estágios iniciais de desenvolvimento das culturas.....	54
Figura 25: Pesticidas usados, (A) Cipermetrina, (B) Bulldock, (C) Belt .....	55
Figura 26: (A) Estágios avançados do desenvolvimento e (B) início de senescência das culturas.....	56
Figura 27: Parte do processo de planimetria para (A) milho e (B) Feijão Nhemba .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

IAF	Índice de Área Foliar
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
FAEF	Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal
SLA	<i>Specific Leaf Area</i> (Área Foliar Específica)
IIAM	Instituto de Investigação Agrária de Moçambique
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
MAE	<i>Mean Avarage Error</i> (Erro Médio Absoluto)
RMSE	<i>Root Mean Squared Erro</i> (Raiz do erro Quadrado Médio)
RRMSE	<i>Relative Root Mean Squared Erro</i> (Raiz do erro Quadrado Médio Relativo)
ICC	Coefficiente de Correlação Intraclasse
GCOS	Comunidade para pesquisas de mudancas climaticas a nivel global
ISO	Organização Internacional para Padronização

## RESUMO

O índice de área foliar (IAF) quantifica o material foliar na canópis, servindo-se de base para compreensão do funcionamento da canópis, podendo ser usado para modelar ou monitorar o crescimento das plantas. Medir o índice de área foliar das culturas que reflecta situações mais próximas da realidade e sem causar sua destruição é crucial para prever a dinâmica do crescimento das culturas, particularmente na consociação das culturas, que é uma técnica característica da agricultura familiar maioritariamente praticada em Moçambique. O presente estudo foi realizado no campo experimental da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, na cidade de Maputo, entre Outubro de 2023 e Fevereiro de 2024. Um ensaio foi estabelecido numa área de 576 m<sup>2</sup> seguindo o Delineamento de Blocos Completos Casualizados em arranjo factorial 3x2 totalizando seis tratamentos. Os factores foram, 3 sistemas de cultivo (milho puro, feijão nhemba puro e consociação de milho e feijão nhemba) e 2 níveis de adubação (sem adubação e adubação). O cultivo consociado foi baseado na proporção de 100% de milho e adição de 50% feijão nhemba. Os níveis de adubação usados serviram para induzir diferentes níveis de desenvolvimento da cultura e variados IAF. O estudo teve como objectivo comparar a exactidão de medição do índice de área foliar de dois métodos indirectos, a saber, o LAI-2200C e AccuPAR LP-80 comparados ao método gravimétrico no sistema de cultivo consociado de Milho e Feijão Nhemba. Para determinar o IAF o AccuPAR LP-80 tem como princípio a medição da radiação directa, fotossinteticamente activa, interceptada pela canópis enquanto que o LAI-2200C usa a radiação difusa interceptada pela canópis. O método gravimétrico foi tido como método de referência, o qual consistiu na determinação da relação entre a área da superfície foliar e o respectivo peso seco. Neste caso, para a determinação da área foliar foram usados, por um lado, dois aplicativos ‘softwares’ (*ImageJ e Petiole Pro*) e por outro lado foi feita a medição das dimensões das folhas usando uma régua graduada. Os instrumentos LAI-2200C e AccuPAR LP-80 indicaram boa exactidão na medição do índice de área foliar nos cultivos puros e relativamente reduzida na consociação das culturas. No entanto, o LAI-2200C forneceu maior exactidão em relação ao AccuPAR LP-80 na medição do índice de área foliar no sistema de cultivo consociado. Pelo que, o LAI-2200C é o mais recomendado para a medição de IAF no cultivo consociado de milho e feijão nhemba

**Palavras -chave:** índice de área foliar, consociação milho e feijão, LAI-2200C, AccuPAR LP-80

## ABSTRACT

Leaf area index (LAI) quantifies the amount of leaves in a canopy and can be used to evaluate the canopy functioning to either model or monitor plants growth. Measuring accurate crops leaf area index non-invasively is crucial in order to forecast crops growth's dynamic, particularly in the context of intercropping systems, a practice commonly used by the majority of Mozambican subsistence farmers. This research was conducted at the Faculty of Agronomy and Forestry Engineering experimental field site in Maputo City, between October 2023 and February 2024. An experiment was established in a 576 m<sup>2</sup> area, on a randomized complete Blocking design in a factorial arrangement with six treatments altogether. The factors were, three cropping patterns (sole maize, sole cowpea and maize-cowpea intercropping) and two levels of fertilizations (full fertilization and no fertilization). The intercropping pattern was based on a proportion of 100% maize and 50% cowpea add-on. The levels of fertilization were used to control different growth's patterns and LAI. The research aimed to evaluate and compare the accuracy of leaf area index measured by the Plant Canopy Analyzer LAI-2200C and AccuPAR LP-80 Meter in maize-cowpea intercropping system. AccuPAR LP-80 computes leaf area index by measuring direct photosynthetically active radiation (PAR) through the canopy, whereas LAI-2200C is based on diffuse radiation measurement above and below the canopy. The gravimetric method was used as the reference method, which consisted on the relation between leaf area and its dry weight. The obtaining of leaf area, on one hand was made through software such as *ImageJ* and mobile app *Petiole Pro*, on the other hand there were measured leaf dimensions with a ruler. The results showed higher accuracy in sole cropping than in intercropping system. Meanwhile, Plant Canopy Analyzer LAI-2200C showed higher accuracy than AccuPAR LP-80 in maize-cowpea intercropping system. The Plant Canopy Analyzer LAI-2200C is highly recommended for leaf area index measurement in the context of maize-cowpea intercropping systems.

**Keywords:** leaf area index, maize-cowpea intercropping, LAI-2200C, AccuPAR LP-80.

## 1. INTRODUÇÃO

Actualmente as tendências da agricultura têm envolvido o uso de medidas e técnicas agronómicas que visam promover e contribuir para a intensificação dos sistemas de produção agrícolas de forma a melhorar não só a sua produtividade, mas também a sua sustentabilidade. Uma dessas técnicas agronómicas é a agroecologia onde pode-se enquadrar a consociação, que é uma das principais características da agricultura familiar maioritariamente praticada em Moçambique.

Nos sistemas de cultivo consociado, a quantidade de luz interceptada por cada uma das culturas componentes depende principalmente de características morfológicas como a altura e a distribuição espacial das folhas, onde as culturas mais altas e com folhas mais horizontais causam sombreamento às culturas de porte mais baixas (Keating, 1993).

Medir o índice de área foliar nos sistemas de cultivo consociado é crucial para compreender e identificar o melhor arranjo espacial a estabelecer para as culturas envolvidas, de modo a maximizar a produção pela optimização da intercepção e eficiência do uso da radiação solar.

Assim, a medição exacta do índice de área foliar, que reflita situações mais próximas da realidade e que permita a posterior gestão da cultura sem causar sua destruição para assegurar que as práticas culturais sejam respostas do que a cultura realmente precisa nesse momento, é essencial para compreender e prever a dinâmica de crescimento das culturas. No contexto de sistemas de cultivo consociado particularmente, essa necessidade torna-se ainda mais evidente devido à complexidade do seu arranjo espacial e da heterogeneidade da sua canópia.

Por um lado, métodos directos de medição de índice de área foliar são bastante demorados, pouco práticos e geralmente destrutivos. Por outro lado, os métodos indirectos como, a fotografia hemisférica digital, AccuPAR LP-80 (ceptómetro), SS1 SunScan, TRAC e LAI-2200C, oferecem a possibilidade de fazer medições não destrutivas, flexíveis, automáticas e instantâneas repetidas vezes ao longo do ciclo das culturas, com aplicabilidade e praticidade para uma vasta gama de canópias e extensas áreas, com elevada exactidão para os cultivos puro, porém não tão bem conhecidos para o caso da consociação.

É neste contexto que surge o presente estudo com o intuito de avaliar e comparar a exactidão de medição de índice de área foliar dos métodos indirectos caso dos instrumentos LAI-2200C e AccuPAR LP-80 com o método directo, no caso o método gravimétrico usado como o método de referência no sistema de cultivo consociado de milho e feijão nhemba.

## **1.1. Problema e justificação de estudo**

Na busca pela sustentabilidade dos sistemas de produção agrícolas, sistemas de cultivo consociado, como o de milho e feijão nhemba, têm se mostrado uma alternativa promissora como via para diversificar a produção, garantir maior aproveitamento da terra, minimizar os riscos de perda total da produção e obter maior retorno económico (Pierre et al., 2022).

Contudo, a gestão sustentável desses sistemas exige uma compreensão minuciosa do crescimento e da geometria das culturas componentes, da arquitectura da sua folhagem e da sua interacção com o ambiente. Essa compreensão pode ser em partes obtida por via da determinação do índice de área foliar desse sistema (Ananthi et al., 2017; Pandey et al., 2020).

Porém, devido a complexidade das interacções e heterogeneidade das canópias nos sistemas consociados, a determinação exacta do índice de área foliar desse sistema constitui uma incerteza e um desafio quando são utilizados métodos indirectos de medição de índice de área foliar (Thimonier et al., 2010; Schaefer et al., 2014; Fang et al., 2019).

Métodos directos de medição do índice de área foliar são tidos como os mais exactos, porém oferecem abordagens trabalhosas e geralmente destrutivas. Como alternativa, os métodos indirectos, como o uso de instrumentos LAI-2200C e AccuPAR LP-80, têm se tornado cada vez mais populares e oferecem uma abordagem mais conveniente e não destrutiva de medição do índice de área foliar (Yan et al., 2019).

Apesar da aplicabilidade dos instrumentos LAI-2200C e AccuPAR LP-80 para uma vasta gama de canópias sobretudo em sistemas de cultivo puro ou em sistemas homogéneos, sua exactidão nos sistemas de cultivo consociado ou em sistemas heterogéneos ainda não é totalmente conhecida e precisa ser rigorosamente avaliada (Fleck et., 2020).

Devido a escassez de informações sobre a aplicabilidade e exactidão do LAI-2200C e AccuPAR LP-80 na medição do índice de área foliar em sistemas de cultivo consociado, este trabalho visa contribuir com os conhecimentos para o mundo científico e instigar interesse para que se façam ainda mais pesquisas nesta área.

## **1.2.Objectivos**

### **1.2.1. Geral**

- Comparar a exactidão de medição do índice de área foliar do LAI-2200C e AccuPAR LP-80 no sistema de cultivo consociado de milho e feijão nhemba

### **1.2.2. Específicos**

- Determinar a precisão e exactidão de medição do índice de área foliar do LAI-2200C e AccuPAR LP-80;
- Identificar o instrumento que fornece medição do índice de área foliar com maior exactidão no contexto de sistemas consociados;
- Determinar a relação entre o índice de área foliar e o rendimento das culturas.

## **1.3.Hipótese**

- A exactidão de medição do índice de área foliar do LAI-2200C e AccuPAR LP-80 é reduzida no sistema de cultivo consociado de Milho e Feijão Nhemba;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Índice de área foliar, conceito e importância

O índice de área foliar (IAF) é um dos parâmetros biofísicos mais usados para medir a estrutura da canóia das plantas, tanto para os agricultores como para os cientistas para monitorar e ou modelar o crescimento e o bem-estar das plantas (Pokovai e Fodor, 2019) e também é usado em modelos biogeoquímicos, hidrológicos e ecológicos (GCOS, 2016; Fang et al., 2019). O IAF quantifica o material foliar na canóia e, serve de base para compreensão do funcionamento da canóia dado que muitas trocas de massa e energia na biosfera-atmosfera ocorrem ao nível da superfície da folha (Yan et al., 2019).

Por definição, o índice de área foliar é o quociente entre a área total de uma das faces da folha ( $m^2$ ) e a área da superfície horizontal do solo ( $m^2$ ) ocupada pela planta (Watson, 1947). O IAF é obtido pelo uso da expressão proposta por Watson (1947):

$$IAF = \frac{AF}{AS} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: IAF é o índice de área foliar ( $m^2/m^2$ ); AF é a área foliar ( $m^2$ ); AS é a área da superfície do solo ( $m^2$ ).

O IAF é uma medida adimensional por ser uma razão de áreas. Uma canóia com um índice de área foliar igual a dois, significa que a superfície do solo estaria coberta duas vezes pela mesma área com folhas ordenadas em camadas segundo a espécie (Garrity, 2014).

O IAF tem sido usado como um parâmetro de análise de crescimento em população de plantas e representa a capacidade que a população de plantas tem para explorar o espaço disponível, por isso, geralmente tem uma relação directa com a densidade de plantas e inversa com as infestantes, fazendo com que o índice de área foliar óptimo corresponda a densidade óptima de plantas (Reis, 1978).

### 2.2. Factores que influenciam o índice de área foliar

O IAF varia com a espécie, estágio fenológico e pode ser afectado pela densidade de plantas, disponibilidade de nutrientes, água, luz, pragas e doenças directamente ou indirectamente:

- **Espécie vegetal:** diferentes espécies possuem arquitecturas e estratégias de crescimento das folhas variadas. A morfologia e fisiologia específica de cada espécie determinam como as folhas da planta se distribuem no espaço, o que pode impactar na quantidade de área foliar disponível por unidade de solo. O índice de área foliar óptimo para

determinada população de plantas depende do ângulo de inserção das folhas em relação ao caule, sendo também influenciado pelo tamanho e forma das folhas. Por um lado, plantas com folhas de inclinação mais verticais podem fazer melhor uso tanto da radiação difusa quanto da radiação directa, atingindo um maior IAF, por outro lado, plantas com folhas mais horizontais tendem a se sobrepor, resultando num baixo IAF (Reis, 1978).

- **Estágio fenológico:** o IAF tende a aumentar à medida que a planta cresce, atingindo um valor máximo e então decrescendo devido à senescência foliar (Welles, 1990).
- **Densidade de planta:** o IAF geralmente tem uma relação directa com a densidade de plantas fazendo com que o IAF óptimo corresponda a densidade óptima de plantas. (Fageria et al., 2006).
- **Disponibilidade de nutrientes:** a adubação apropriada, principalmente com nitrogénio promove o crescimento foliar, o que aumenta o IAF, e deficiências nutricionais limitam a expansão foliar resultando em folhas menores e menos densas reduzindo o IAF (Lambers et al., 2008).
- **Disponibilidade de água:** a água é essencial para a turgescência celular que promove o crescimento das folhas. A falta de água pode limitar a produção e expansão foliar e causar senescência precoce, reduzindo o IAF (Weiss et al., 2004),
- **Luminosidade:** a luz é fundamental para a fotossíntese e consequentemente para o crescimento das folhas. Em ambientes com boa disponibilidade de luz, as plantas desenvolvem mais folhas, aumentando o IAF. Em ambientes com pouca luz, as plantas podem apresentar menor quantidade de folhas, reduzindo o IAF (Reis, 1978).
- **Temperatura:** a temperatura influencia a taxa de crescimento das plantas, e cada planta possui uma faixa de temperatura ideal para o seu crescimento, fora dessa faixa, o metabolismo pode ser prejudicado levando a uma menor produção de folhas ou à queda de folhas devido ao stress térmico, resultando num baixo IAF (Briggs et al., 1920).
- **Pragas e doenças:** a perda de tecido foliar devido ao ataque de pragas, como desfolhadores ou mastigadores ou a necrose causada por doenças reduz a área fotossintetizante, impactando directamente no IAF (Silva et al., 1993).

A arquitectura da canópia do milho possui uma distribuição do ângulo foliar predominantemente esférica e com folhas erectófilas permitindo que a luz penetre e atinja as folhas mais inferiores tendendo à uma distribuição mais uniforme da luz dentro da canópia, o que pode aumentar a eficiência fotossintética e conseqüentemente a produtividade ( Bilalis et al., 2010).

O IAF no milho varia ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura atingindo seus valores máximos entre 3 e 6. O IAF entre 5 e 6 no milho, tem sido indicativo de uma eficiente captura de luz e alta produtividade e, valores entre 3 e 4 indicam em algumas vezes uma baixa a média produtividade, que pode ser devido à stresses e práticas culturais deficientes (Hatfield et al., 2008).

A arquitetura planófila das folhas de algumas variedades de feijão nhemba faz com que o topo da canópia capte mais luz, porém permite pouca passagem da luz para as folhas mais inferiores o que pode reduzir a eficiência geral de uso da luz. Um índice de área foliar acima de 3 representa para o feijão nhemba pico do desenvolvimento da canópia. Durante o ciclo de desenvolvimento da cultura de feijão nhemba, os valores do índice de área foliar podem atingir valores máximos entre 4 e 6 (Summerfield, 1985).

Na consociação, culturas componentes são selecionadas de tal maneira que suas diferenças morfológicas como arquitectura da canópia, tipo de metabolismo e sistema radicular se complementam, otimizando assim a utilização de recursos como terra, água, nutrientes e particularmente a luz. A quantidade de luz interceptada por cada uma das culturas componentes na consociação depende da geometria e arquitectura da sua canópia, onde plantas mais altas podem causar sombreamento para as plantas mais baixas (Keating e Carberry 1993).

O impacto negativo da competição entre as culturas na consociação pode ser limitada com a escolha adequada das espécies, taxa de sementeira e arranjo espacial das plantas. A uma baixa densidade de milho, leguminosas como o feijão nhemba geralmente recebem 50% da radiação incidente no sistema (Ofori e Stern 1987).

A medição do IAF pode ser feita por via de dois métodos distintos principais: métodos directos e indirectos. Cada método possui suas vantagens e desvantagens e, a escolha do método a usar depende inteiramente dos objectivos da pesquisa para os quais o IAF é medido ( Garrity, 2014).

### **2.3.Métodos directos de medição do IAF**

Os métodos directos consistem na medição directa da área foliar para o respectivo cálculo do IAF pela definição (Yan et al., 2019). A amostragem para a colecta das folhas pode ser destrutiva ou não destrutiva. À medida que a área foliar é determinada por medições repetidas em folhas individuais e o somatório das áreas é feita, torna estes métodos mais exactos (Zheng e Moskal, 2009) e são geralmente utilizados como referência e padrão para calibração e validação dos métodos indirectos (Cutini et al., 1998; Gower et al., 1999; Bréda, 2003).

Apesar da sua exactidão, os métodos directos são extremamente demorados e cansativos fazendo com que sejam pouco práticos para extensas áreas e particularmente para o monitoramento à longo prazo da dinâmica do crescimento e desenvolvimento espacial e temporal da canópia, em que são necessárias várias amostragens em diferentes datas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura (Chason et al., 1991; Pokovai e Fodor, 2019). Uma vez feita a colecta das folhas, a determinação da área foliar pode ser feita por meio de técnicas planimétrica ou gravimétrica (Daughtry, 1990).

A planimetria se baseia no princípio da correlação entre a área individual da folha e o número de unidades de área cobertas por essa folha num plano horizontal. A folha é horizontalmente fixada numa superfície plana onde o seu contorno é medido com um planímetro e sua área é calculada com base nesse contorno (Jonckheere et al., 2004; Zheng e Moskal, 2009).

Os planímetros podem ser de scaneamento, que utilizam métodos digitais de aproximação de rectângulo, tais como planímetro Li-3000, Li-3100, CI-202 (portátil) e planímetros à base de sistema de análise de imagens num computador ou smartphone com um software apropriado como imageJ ou PetiolePro, onde uma imagem das folhas é digitalizada pelo scaneamento numa impressora ou captura com a câmara aprimorada para distinguir as folhas do fundo (Jonckheere et al., 2004).

#### **2.3.1. O Método Directo ImageJ**

O ImageJ é um software de domínio público para processamento e análise de imagens, desenvolvido por Wayne Rasband no National Institute of Mental Health, EUA, em linguagem de programação Java, disponível para Windows, Mac OS X e Linux (Dias, 2008).

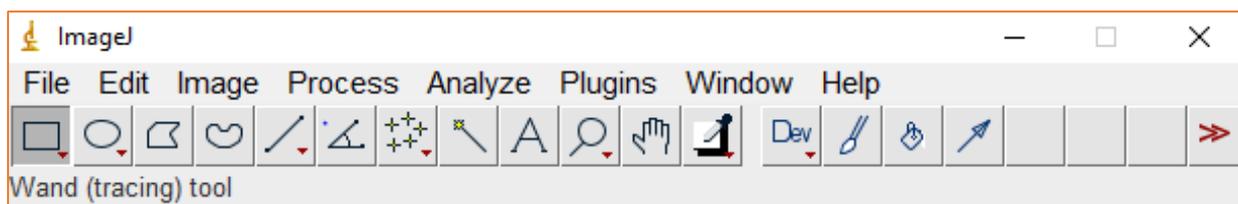


Figura 1: Interface do ImageJ

Fonte: Rasband e Ferreira (2012)

O imageJ baseia-se na contagem de valores digitais inteiros denominados pixels, em regiões selecionadas pelo usuário ou por um algoritmo específico duma imagem digitalizada, e sua relação com características geométricas como área, diâmetro ou perímetro (Rasband e Ferreira 2012).

A discriminação das folhas do fundo da imagem é feita pela segmentação por níveis de cinza, também denominada limiarização, que é a conversão de uma imagem com níveis de cinza em uma imagem monocromática (branco e preto). A limiarização, que é uma técnica baseada na similaridade de regiões, indica que os pixels pertencem ao mesmo objecto na imagem (Soile 1999).

O imageJ é um software gratuito com uma ampla gama de funcionalidades para processamento e análise de imagens e compatível com vários formato de imagem (TIFF, JPEG, PNG, DICOM) e sistemas operacionais (windows, macOS e Linux). Apesar de extensas funcionalidades, o seu uso eficaz requer aos usuários uma especialização e por ser um software de código aberto, o desenvolvimento contínuo da sua documentação, fóruns e tutoriais para o suporte depende muito da contribuição dos utilizadores activos em comunidade, que pode variar em qualidade e consistência (Hannickel et al., 2012). Apesar da morosidade, o ImageJ possui elevada exactidão na medição de área foliar. Rocha (2015), ao usar o ImageJ na determinação de área foliar na fruteira de jabuticabeira (*Plinia cauliflora*), obteve um erro em torno de 13%.

Pickering et al. (2019) encontraram um erro relativo em torno de 3.2% ao usar o image J para determinação de área de uma folha artificial cuja área era conhecida e um ajuste quase perfeito ( $R^2= 0.9963$ ), a principal inconveniência encontrada foi o tempo.

Easlon e Bloom (2014) relataram como principal inconveniência, a necessidade de calibração ou definição da escala a cada imagem que é analisada, que leva à morosidade na determinação da área foliar. Os mesmos autores relataram um erro em torno de 7.21% na determinação da área foliar da cultura do trigo.

### 2.3.2. O Método Directo Petiole Pro

O Petiole Pro é um aplicativo gratuito de *smartphone* desenvolvido pela Petiole Group, que oferece várias ferramentas para medições de características da planta como, perímetro, área foliar, conteúdo de clorofila, taxa de germinação, diâmetro, comprimento, largura da folha usando a câmera do *smartphone* (Petiole group, 2017).

O uso do Petiole Pro é compatível com *smartphones* tanto com sistema operacional Android quanto iOS. Para *smartphone* com sistema operacional Android, a versão deve ser igual ou superior a 5.0 e o mesmo deve possuir uma câmera traseira com resolução de pelo menos 8 MP. Para iOS, a versão do sistema operacional deve ser iOS 11.0 ou superior, também compatível com *iPhone*, *iPad* e *iPod touch*, o mesmo deve possuir uma câmera traseira com pelo menos 8 MP de resolução (Kuzmenko e Seleznov, 2021).

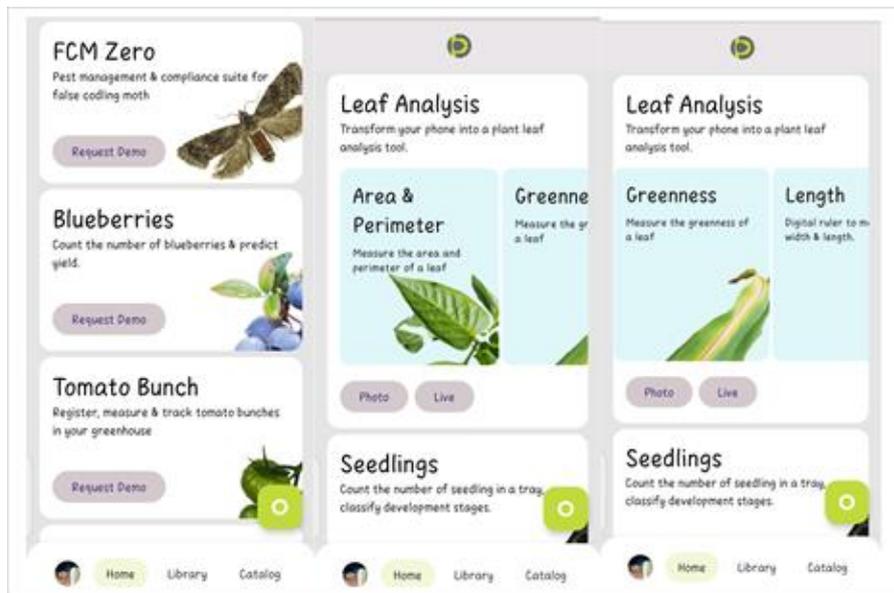


Figura 2: Interface do Petiole Pro

Fonte: Petiole Pro (2017)

O Petiole Pro baseia-se na captura de imagens das folhas sobre uma placa ou papel de calibração e análise das imagens capturadas com algoritmos de processamento de imagem, na qual estão incluídas técnicas detecção de bordas, análise de cores e reconhecimento de padrões para identificar e medir características desejadas (Kuzmenko e Seleznov, 2024).

A placa ou papel de calibração possui uma referência constante de cor e tamanho, para compensar variações de luz e, marcas de escala e padrões, para permitir ao aplicativo calcular

distâncias e tamanhos de forma exacta, essenciais para parâmetros que dependem de uma escala correcta, como a área foliar (Kuzmenko e Seleznov, 2024).

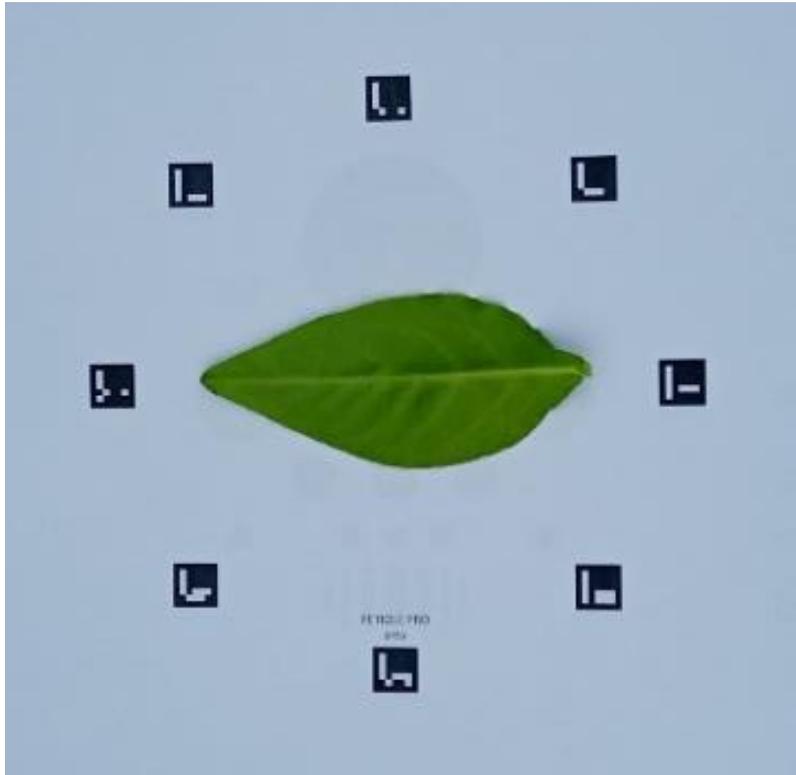


Figura 3: Papel de calibração para área foliar

Fonte: Petiole Pro (2024)

Os marcadores pretos em formato de “L” no papel de calibração têm tamanho e posição exactas que fornecem ao software um padrão geométrico conhecido, a ser usado como referência para garantir a exactidão na medição da área foliar. A disposição circular dos marcadores permite ao software identificar o ângulo e a posição exacta da superfície foliar a ser medida e o campo de visão exacto da câmara para garantir que apenas a área dentro do círculo delimitado seja usado no cálculo (Petiole Pro, 2017).

Por ser um aplicativo móvel, pode ser usado em qualquer lugar, o que facilita o trabalho de campo reduzindo a necessidade de transportar equipamentos e materiais pesados e volumosos, a necessidade de utilização de métodos manuais que são mais trabalhosos, assim economizando tempo e esforço e oferece resultados instantâneos, o que permite uma resposta rápida aos possíveis problemas identificados nas culturas (Proshkin et al.; 2023).

A precisão e exactidão das medições pode ser limitada pelo hardware e *software* do *smartphone* utilizado. *Smartphone* com versão inferior a 5.0 para caso de Android e 11.0 para IOS , com

resolução de câmara inferior à 8 MP pode não fornecer resultados precisos e exactos comparado aos celulares com versões mais avançadas (Tefide, 2023).

### **2.3.3. Medições Lineares**

Medições lineares constituem a técnica mais antiga e tradicional de determinação da área foliar, com régua ou escala para a medição de dimensões lineares como comprimento e largura da folha. Esta técnica pressupõe que a área foliar pode ser obtida pelas dimensões lineares (C e L) dos rectângulos circunscritos aos limbos foliares (Baros et al., 1973).

$$LA = C \times L \quad (\text{Eq.2})$$

LA é a área foliar dado em  $\text{cm}^2$ , obtida como um produto do comprimento da folha pela sua largura; L é a largura da folha dada em cm, tida como a parte mais larga do limbo foliar; C é o comprimento da folhar dado em cm, tido como o maior comprimento da nervura do limbo.

A aplicação da técnica de medições lineares pode reduzir a necessidade de remoção das folhas da planta, permitindo sua utilidade directamente no campo e, é uma técnica de baixo custo, simples e fácil de usar. A maior desvantagem da técnica é não considerar a forma geométrica real da folha, concentrando-se apenas nas dimensões lineares, o que reduz a sua exactidão (Monteiro et al., 2005). Rocha (2015), ao usar medições lineares na determinação de área foliar da fruteira jaboticabeira, encontrou um erro relativo em torno de 13%.

### **2.3.4. O Método Gravimétrico**

O método gravimétrico é uma adaptação do método planimétrico, baseado na relação entre o peso da matéria seca das folhas e a sua área foliar. Esta relação é conhecida como Área foliar específica, (SLA), que é definida como sendo a área foliar por unidade de matéria seca da folha e representa a quantidade de fotoassimilados que a planta aloca exactamente na folha. É um valor que varia com o estágio da cultura e tem o seu pico na fase de crescimento exponencial rápido onde, a área foliar é máxima e decresce com a senescência das folhas (Ali et al., 2017; Xu et al., 2010).

O método gravimétrico correlaciona o peso seco das folhas e sua área foliar, isto é, SLA, que é determinado de uma sub-amostra obtida da amostra principal no campo. A área foliar da sub-amostra é determinada pelas técnicas da planimetria e, posteriormente a sub-amostra é submetida à secagem numa estufa à  $85^\circ\text{C}$  até atingir peso constante, que é subsequentemente determinado com uma balança de precisão e, o SLA é determinado.

Conhecido o SLA, a amostra é igualmente submetida à secagem nas mesmas condições da subamostra e a área foliar é determinada pelo producto entre o peso seco da amostra principal e o SLA da sub-amostra (Jonckheere et al., 2004).

$$SLA = \frac{Ls}{Ld} \quad (\text{Eq.3})$$

$$LA = SLA (m^2/g) \times Ldw (g) \quad (\text{Eq.4})$$

Onde: SLA é a área foliar específica, dado em m<sup>2</sup>/g ou cm<sup>2</sup>/g; Ls é a área foliar da subamostra dada em cm<sup>2</sup> ou em m<sup>2</sup>; Ld é o peso foliar seco da subamostra, dado em grama (g), LA é a área foliar da amostra principal; Ldw é o peso foliar seco da amostra principal.

O método gravimétrico é apropriado para maiores tamanhos de amostras de folhas, e para além da determinação da área foliar, também permite fazer inferência da quantidade de matéria seca na folha, fazendo com que a destruição da amostra seja inevitável (Oliveira e Rakocevic, 2003).

Rocha (2015) caracterizou este método como sendo extremamente demorado por necessitar da secagem da folha, dependendo principalmente das condições da estufa ou climáticas quando a secagem for ao ar livre. Este autor, obteve exactidão em torno de 13% na determinação da área foliar da jabuticabeira.

#### **2.4. Métodos Indirectos de Medição do IAF**

Os métodos indirectos inferem o índice de área foliar sem medir directamente a área foliar, e geralmente são mais flexíveis, automáticos, por isso, podem ser aplicados para maiores tamanhos de amostras e evitam a destruição da biomassa (Jonckheere et al., 2004).

Os métodos indirectos têm se tornado cada vez mais populares e cientificamente aceites ainda que o facto da variável IAF não ser medida directamente, implique a ocorrência inevitável de fontes de erros (Danner et al., 2015).

Os métodos indirectos podem ser *in situ* ou aéreos e espaciais. Os métodos aéreos e espaciais geralmente são aplicados para florestas e baseiam-se nas diferenças da reflexão espectral entre a vegetação e outros tipos de cobertura como solo, água ou áreas urbanas, através de uso de técnicas como Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Majasalmi et al., 2013).

Os métodos *in situ* podem envolver medições directas sobre as plantas, tais como métodos alométricos que relacionam o IAF com o diâmetro da altura do peito (DAP), método do Quadrado de Ponto Inclinado e métodos ópticos, que não envolvem medições directas sobre as

plantas, baseados na medição da transmissão da luz na canóvia (Jonckheere et al., 2004; Garrity, 2014).

Os métodos ópticos indirectos têm como base teórica a lei de Beer-Lambert, também conhecida como lei de Beer, considerando que a quantidade total da radiação interceptada pela camada da canóvia depende da radiação incidente, estrutura e das propriedades ópticas da canóvia (Monsi e Saeki, 1953).

Esses métodos envolvem a medição da transmitância total, directa e ou difusa da radiação à nível do solo, com o uso de sensores de quantum lineares ou radiômetros, quadrados de pontos à laser e sensores de capacitância (Jonckheere et al., 2004).

**Lei de Beer-Lambert:** Diz que *Quando um feixe monocromático de radiação passa por uma superfície, absorvância e a transmitância ocorrem e a radiação incidente é atenuada*. Da mesma forma, quando um feixe de radiação solar transmite-se pela canóvia, as folhas absorvem fracção da luz visível e reflecte luz infravermelha, o que resulta nas mudanças da radiação solar antes e depois de atravessar as folhas (De Wit, 1965). A lei de Beer explica e modela que à medida que a folha absorve radiação fotossinteticamente activa, o padrão sucessivo de absorção reduz exponencialmente a disponibilidade da luz com o aumento do IAF (Parker, 2020).

$$I = I_0 \cdot e^{-K \cdot IAF} \text{ (Eq.5)}$$

Onde: I é a intensidade da luz transmitida através da canóvia,  $I_0$  é a intensidade da luz incidente e K é o coeficiente de extinção.

Actualmente vários instrumentos dos métodos ópticos indirectos têm sido desenvolvidos para determinar o IAF em tempo real e, podem ser classificados em dois grupos: grupos que contêm instrumentos baseados na análise de fracção de espaços/lacunas (*gap fraction*) e grupos baseados na distribuição do tamanho das lacunas (*gap size*) (Jonckheere et al., 2004; Zheng e Moskal, 2009).

**Fracção de espaços (“Gap Fraction”):** representa a proporção de espaços vazios (lacunas) dentro de uma área específica da canóvia e, esse valor pode ser calculado a partir de medições da luz que passa por esses espaços (Jonckheere et al., 2004). A fracção de espaços descreve a probabilidade que um feixe de radiação tem de não entrar em contacto com elementos da vegetação até atingir um nível de referência, como solo (Jone, 1992).

Ao medir a fracção de espaços, instrumentos como LAI-2200C e AccuPAR LP-80 calculam o IAF pela comparação de medições do diferencial de luz acima e abaixo da canóia e, geralmente o IAF máximo mensurável por esses instrumentos é inferior ao obtido por métodos directos, devido principalmente à saturação da fracção de espaços à medida que o IAF atinge um nível de saturação assintótico em torno de valores de cinco e seis (Gower et al., 1999).

Uma implicação característica de instrumentos baseados na abordagem de fracção de espaços é não distinguirem tecido foliar fotossinteticamente activo das folhas relativamente a de outros elementos da planta como caules, ramos, galhos ou flores. Por isso, a medição da fracção de espaços é feita sob pressupostos de corpo negro da folha e distribuição aleatória das folha (Chen e Black, 1996).

**Coefficiente de extinção:** Para descrever a função da canóia ao deixar passar feixe de radiação, ou seja, quanta radiação é atenuada ao passar pela canóia, foi desenvolvido o coeficiente de extinção que representa geometricamente a área da sombra projectada numa superfície horizontal pela canóia dividida pela área das folhas na canóia ou da projecção média das folhas numa superfície horizontal (Campbell, 1986).

$$K = \frac{G(\theta)}{\cos(\theta)} \text{ (Eq.6)}$$

Onde:  $G(\theta)$  é o coeficiente de projecção da folha num pano perpendicular à radiação incidente.

Diferenças na morfologia da folha como o ângulo de distribuição da folha, forma da folha, agregação das folhas (*clumping*), faz com que o coeficiente de extinção varie de espécie para espécie, por isso, plantas com distribuição planófila das folhas possuem maior coeficiente de extinção em relação a plantas com distribuição erectófila (Jonckheere et al., 2004).

O coeficiente de extinção é obtido automaticamente pelos instrumentos como LAI-2200C e AccuPAR LP-80, que baseiam-se no princípio da fracção de espaços (*gap fraction*) para a inferência do IAF (Garrity, 2014; Danner et al., 2015).

#### **2.4.1. O Método Indirecto LAI-2200C (Li-Cor), descrição e funcionamento**

LAI-2200C, **analisador da canóia**, é um instrumento portátil que serve para estimar o índice de área foliar, desenvolvido pela Li-Cor Biosciences em Lincoln, Nebraska na década de 1990, como um aprimoramento do seu modelo predecessor LAI-2000 fornecendo melhorias e funcionalidades adicionais como Sistema de Posicionamento Global (GPS) para oferecer medições mais exactas, facilitadas e eficientes do índice de área foliar (Li-Cor, 2013).

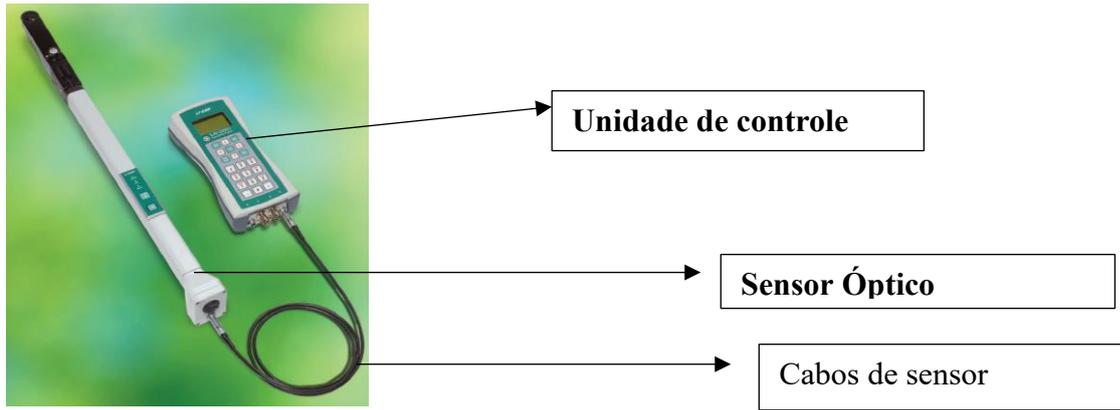


Figura 4: Vista espacial do analisador da canópias da planta LAI-2200C

Fonte: Li-cor (2013)

A unidade de controlo também denominada consola, é usado para configurar as definições do instrumento, armazenar dados e determinar resultados. Um módulo de GPS interno fornece a localização onde os dados foram colectados. A consola é equipada com quatro pilhas alcalinas ‘AA’ que podem fornecer até noventa horas de operação. Uma pilha de recuperação interna de Lítio mantém o funcionamento do relógio quando as pilhas principais são removidas (Li-Cor, 2013).

O sensor óptico LAI- 2250 é a componente de colecta de dados do LAI-2200C, que é equipada com duas pilhas alcalinas ‘AA’ que podem fornecer mais de cento e quarenta horas de operação e pode ser usado independente da unidade de controlo. Neste sensor, uma tampa protectora é fornecida para cobrir o conector do anteparo na extremidade do sensor. Este sensor óptico contém componentes de alta exactidão óptica, incluindo lentes, filtros ópticos e sensores de luz e é tratado como uma lente de câmara e protegida de impactos e vibração intensa (Li-Cor, 2013).

O instrumento possui cinco tampas de restrição de visão que servem para garantir que o sensor óptico veja a mesma porção do céu durante as leituras acima e abaixo da canópias sem a necessidade de rodar a tampa de visão no sensor.

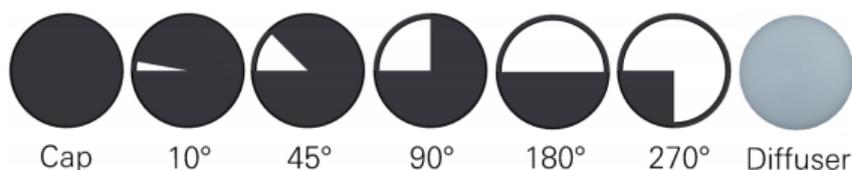


Figura 5: Tampas de visão

Fonte: Li-Cor (2013)

De esquerda para direita, a primeira tampa é usada para proteger a lente quando está em desuso. A branca é usada para colectar os dados auxiliares necessários para aplicar correções e ajustes aos efeitos de dispersão quando se opera directamente sob a luz do sol. As tampas perfuradas são usadas para colectar propriedades de transmitância e reflectância da folha (Li-Cor, 2013).

O LAI-2200C calcula o índice de área foliar e outros atributos da canópia a partir de medições simultâneas de radiação difusa com um sensor óptico hemisférico de lente ‘olho de peixe’ a um alcance de cento e quarenta e oito graus de campo de visão (Li-Cor, 1992).

Medições acima e abaixo da canópia são feitas para calcular a intercepção da luz pela canópia em cinco bandas angulares distintas de  $\theta$ : 0–13°, 16–28°, 32–43°, 47–58° e 61–74°, organizadas em anéis concêntricos com ângulo zenital central de 7, 23, 38, 53 and 68°, dos quais o índice de área foliar é calculado usando um modelo de transferência de radiação na canópia vegetal (Cutini et al., 1998). Assim, o LAI-2200C mede a probabilidade de se ver o céu quando se olha para cima a partir de um ponto em diferentes direcções da canópia. Essas medições contém duas informações estruturais sobre a canópia: a quantidade de folhagem na canópia e a orientação da folhagem (Turton, 1985; Jones, 1992).

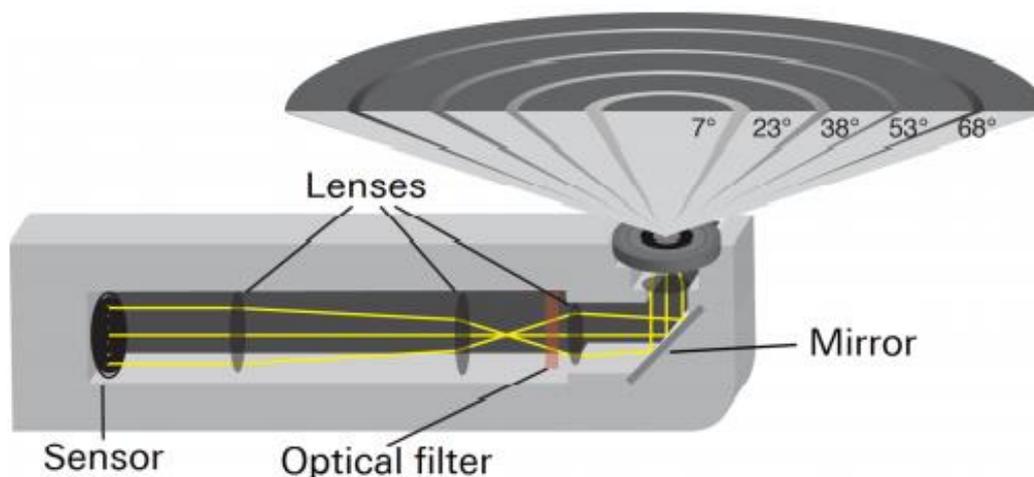


Figura 6: Arranjo das lentes, filtro óptico e bandas angulares no sensor óptico

Fonte: Li-Cor (2013)

O LAI-2200C possui uma consola intuitiva similar a um celular, tornando-o simples de usar, pode ser usado para determinar o IAF de uma ampla gama de canópias, fornecendo resultados em tempo real oferecendo medições flexíveis, sua aplicabilidade não requer um ângulo solar específico e integra funcionalidades como GPS, o que facilita a localização da área de amostragem e o mapeamento no Google Earth (Levy e Jarvis, 1999).

O custo de aquisição do LAI-2200C é relativamente alto, o que pode ser uma barreira para instituições ou pesquisadores com um orçamento limitado e também requer treinamento e experiência para sua utilização, o que pode ser um desafio para novos usuários. Em canópias descontínuas e heterogêneas, o potencial do LAI-2200C é restringido a tendência geral de subestimação do IAF (Dufrene e Bréda, 1995).

#### 2.4.2. O Método Indirecto AccuPAR LP-80, descrição e funcionamento

Também designado ceptômetro, é um instrumento portátil desenvolvido pela Decagon Devices do grupo METER em Pullman, Washington, Estados Unidos da América, constituído por uma unidade de controlo à qual é conectada uma sonda (*probe*) de 84 cm, que é por si só um sensor de quantum linear e consiste de 80 fotosensores, que serve para medir a radiação fotossinteticamente activa (PAR) e o índice de área foliar (Yan et al., 2019).



Figura 7: Vista espacial do AccuPAR LP-80/LAI Ceptômetro

Fonte: METER group (2017)

O sensor de quantum linear do AccuPAR LP-80 mede *sunfleck* (pequenos pontos ou manchas de luz solar directa que passam através de aberturas temporárias na cobertura vegetal) ou quantidade de radiação fotossinteticamente activa interceptada pela canópia, a partir de medições acima e abaixo da canópia (Jonckheere et al., 2004).

O AccuPAR LP-80 fornece resultados em tempo real, é portátil e leve tornando as medições flexíveis, não destrutivas e apropriado para utilização em áreas extensas e grandes tamanhos de amostras. A interface na unidade de controle é simples e pode ser utilizado sem a necessidade de habilidades avançadas (METER group, 2020).

O LP-80 precisa de condições específicas de luz, como luz directa, para obtenção de dados precisos e exactos, o que quer dizer que, variação significativa na iluminação pode reduzir a consistência dos dados (Yan et al., 2019).

Finzel et al. (2012) encontraram baixa exactidão do ceptômetro AccuPAR LP-80 em áreas de pastagens natural quando comparado à referência ao método de pontos de interceptação. Os mesmos autores atribuíram a alta variabilidade do IAF obtido com o AccuPAR LP-80 à alta sensibilidade do instrumento em relação ao ângulo do instrumento em relação ao sol, sugerindo que o ceptômetro não seja necessariamente apropriado para medição do índice de área foliar em canópias não uniformes (Pokvai e Fodor, 2019).

Por outro lado, Finzel et al. (2012) encontraram no seu estudo maior efectividade no uso de ceptômetros em condições de intensa luz directa. Tewolde et al. (2005), O'Connell et al. (2004) e Camargo et al. (2016) sugerem o uso de ceptômetros em condições de sol do meio dia, que implica alta RFA abaixo da canópia, é recomendada para medições com maior exactidão.

Salter et al. (2018) sugerem o uso do ceptômetro apenas em casos de dias nublados, para evitar ou reduzir o viés de orientação da linha causada pela natureza não isotrópica da orientação da linha ou, evitar o seu uso, em horas do dia em que o sol brilha paralelo à direcção da linha das culturas.

Yan et al. (2019) referem que o ceptômetro pode ser usado tanto em condições de luz difusa como em condições de luz directa, ou seja, em dias nublados e céu limpo. Pask et al. (2012) recomendam uso de ceptômetros em céu limpo e solarento em que as condições de luz permaneçam constantes durante as medições. Também afirmam que as medições podem ser feitas em condições de céu nublado, apesar de não recomendar este uso.

## **2.5. Avaliação de incertezas de medição**

Para lidar com o facto das medições não serem necessariamente exactas ou livres de incertezas, a estimação do erro e sua análise torna-se crucial para tomada de decisão sobre um método de medição (Taylor, 1997). A análise de incerteza de medição pode ser feita com base na sua exactidão e precisão.

**Precisão (“*Precision*”):** É o grau de concordância entre medições individuais independentes entre si. Para além da proximidade e conformidade de medições entre si, a precisão também engloba o número de algarismos significativos ao ser expressa (ISO, 1994).

A precisão pode ser interpretada como uma medida de repetibilidade e reprodutibilidade de medições. A repetibilidade de medições se refere a capacidade do instrumento produzir medições próximas entre si sob mesmo observador em mesmas condições num curto intervalo

de tempo e, a reprodutibilidade se refere capacidade do instrumento produzir medições próximas entre si com mesmo observador ou não e em condições diferentes (ISO, 1994).

A precisão pode ser expressa por medidas de dispersão dos dados como o coeficiente de variação (CV), que é definido como o desvio padrão dividido pela média e possui seguinte classificação segundo Garcia (1989):

Tabela 1: Classificação da precisão de medições

Intervalo	Classificacao
<b>CV &lt; 10%</b>	Alta precisão
<b>10% ≤ CV &lt; 20%</b>	Boa precisão
<b>20% ≤ CV &lt; 30%</b>	Precisão razoável
<b>CV ≥ 30%</b>	Baixa precisão

**Exactidão (“Accuracy”):** é o grau de concordância entre um valor teste e o valor de referência aceite, tido como verdadeiro ou correcto. Refere-se a proximidade com que um instrumento de leitura aborda o valor verdadeiro ou valor de referência aceite da variável quantitativa ao ser medida. A exactidão é considerado como uma indicador do erro total de medição sem olhar para as fontes de erro (ISO, 1994), e pode ser expressa por seguintes medidas:

a) **MAE (Mean Absolut Error):** é a média sobre a amostra teste das diferenças absolutas entre os valores previstos e observados onde todas diferenças têm igual peso. O MAE expressa quão grande um erro pode ser esperado com base na média e pode ser usado para medir a magnitude dos erros sem se preocupar se são maiores ou menores que os valores observados (Qi et al., 2020). Quanto menor o MAE, maior é a exactidão. e o seu valor pode ser calculado pela seguinte formula:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{N} \quad (\text{Eq.7})$$

b) **RMSE (Root Mean Squared Error):** também designado desvio padrão dos erros, mede a variação de um conjunto de dados em relação aos valores “reais”. Um baixo valor de RMSE indica que o modelo de previsão é exacto, enquanto que um RMSE alto sugere que o modelo está cometendo erros significativos (Chai e Draxler, 2014). O seu valor pode ser calculado pela seguinte formula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (\text{Eq.8})$$

- c) **RRMSE (Relative Root Mean Squared Error)**: é uma versão normalizada do RMSE, calculada como percentagem da média dos valores reais. O RRMSE facilita comparação entre conjuntos de dados ou variáveis com unidades diferentes (Jadon et al., 2022).

$$RRMSE = \frac{RMSE}{O} \times 100 \text{ (Eq. 9)}$$

Quanto menor o RRMSE, maior é exactidão de previsão ou medição do método.

Tabela 2: Classificação do RRMSE (Jamieson et al., 1991)

Intervalo	Classificacao
<b>RRMSE &lt; 10%</b>	Excelente exactidão
<b>10% ≤ RRMSE &lt; 20%</b>	Boa Exactidão
<b>20% ≤ RRMSE &lt; 30%</b>	Exactidão razoável
<b>RRMSE ≥ 30%</b>	Baixa Exactidão

- d) **Coefficiente de determinação (R<sup>2</sup>)**: é uma medida usada para avaliar a qualidade de um modelo de regressão e indica a proporção da variação na variável dependente que é explicada pela variável independente. O R<sup>2</sup> mede quão bem as medições se ajustam ao modelo de regressão e pode ser expresso em percentagem e, quanto maior R<sup>2</sup>, maior é o poder explanatório do modelo (Chicco et al., 2021).

O cálculo do coeficiente de determinação pode ser determinado como sendo o quadrado do coeficiente de correlação ou também pela seguinte fórmula:

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT} \text{ (Eq. 10)}$$

Os valores de R<sup>2</sup> variam entre 0 e 1 e podem ser avaliados segundo a seguinte classificação de Chicco et al. (2021):

Tabela 3: Classificação do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>)

Intervalo	Classificacao
<b>R<sup>2</sup> &gt; 0.7</b>	Alta exactidão
<b>0.5 ≤ R<sup>2</sup> ≤ 0.7</b>	Exactidão moderada
<b>R<sup>2</sup> &lt; 0.5</b>	Baixa Exactidão

- e) **Índice de concordância de Wilmot**: também denominado índice de concordância d, proposta por Wilmot (1981) é uma medida padronizada do grau de previsão de erros do modelo que varia entre 0 e 1. O índice de concordância “d” representa a razão entre o MSE e o erro potencial. O índice “d” considera tanto a magnitude dos erros quanto a distribuição

dos erros ao longo das medições. Quanto maior o índice de concordância “d”, maior é a concordância entre as previsões e os valores observados. O seu cálculo pode ser feito pela seguinte fórmula:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - O| + |P_i - P|)^2} \text{ (Eq. 11)}$$

Tabela 4: Classificação do índice de Wilmot (1981)

Intervalo	Classificacao
<b>d &gt; 0.75</b>	Boa concordância
<b>0.5 ≤ d ≤ 0.75</b>	Concordância moderada
<b>d &lt; 0.5</b>	Baixa concordância

f) **Coefficiente de correlação Intraclassa (ICC):** mede a consistência e estabilidade de um instrumento de medição ou de uma variável ao longo do tempo, entre diferentes observadores ou condições e verifica a homogeneidade, redundância ou heterogeneidade de um instrumento entre as medições (Weir, 2005). O ICC varia de 0 a 1 e, quanto mais próximo de 1, maior é a confiabilidade. O ICC pode ser calculdo pela seguinte fórmula:

$$ICC = \frac{(O_i - P_i)^2}{(O_i - P_i)^2 + (O_i - O)^2} \text{ (Eq. 12)}$$

Tabela 5: Classificação do coeficiente de correlação intraclassa (ICC) (Kottner et al, 2010)

Intervalo	Classificacao
<b>ICC ≥ 0.9</b>	Confiabilidade excelente
<b>0.75 ≤ ICC &lt; 0.9</b>	Boa confiabilidade
<b>0.5 ≤ ICC &lt; 0.75</b>	Confiabilidade moderada
<b>ICC &lt; 0.5</b>	Baixa Confiabilidade

Onde: “O<sub>i</sub>” se refere as medições de índice de área foliar com o método gravimétrico, “P<sub>i</sub>” se refere as medições de índice de área foliar com o analisador da canópia LAI-2200C ou LP-80.

“O”: se refere à média das medições de índice de área foliar com o método gravimétrico e,

“P” se refere a média das medições de índice de área foliar com o analisador da canópia LAI-2200C ou LP-80, SQE e SQT se referem à soma dos quadrados dos erros e totais respectivamente.

Yan et al. (2019) afirmam que o principal factor de erro nos instrumentos é o pressuposto de homogeneidade da canópia, que não é aplicável para outras canópias. De uma maneira geral, os factores que causam incertezas nos instrumentos de medição do IAF derivados de métodos ópticos indirectos, são: ângulo de distribuição da folha, agrupamento das folhas e componentes lenhosos (Yan et al., 2019).

**Ângulo de distribuição da folha (LAD):** os instrumentos tipicamente assumem um certo tipo de ângulo de distribuição da folha, esférica (AccuPAR LP-80) e aleatória (LAI-2200C). Em canópias reais, o LAD pode variar significativamente dependendo da espécie, condições ambientais e estágio fenológico (Yan et al., 2019).

**Agrupamento das folhas (“clumping”):** à medida que as folhas se agrupam, em certas partes da canópia, há criação de largas fracções de espaços e mais luz passa por esses espaços sem que sejam interceptada e, na área agrupada, mais luz é interceptada do que nos casos em que as folhas estão aleatoriamente distribuídas, o que leva à uma super-estimativa do número fracções de espaços e conseqüentemente uma sub-estimativa do IAF. Os instrumentos assumem que, quanto maior for o tamanho da fracção de espaços, menor é a área foliar nessa canópia (Baret et al., 2010).

Vários autores, Chen e Cihlar (1995), Stenberg (1996) e Weiss et al. (2004) consideram o efeito de agrupamento de folhas (clumping effect) como sendo o factor mais crítico que causa incertezas nos instrumentos ópticos de medição do IAF incluindo o AccuPAR LP-80 e LAI-2200C, onde relataram que a sub-estimação do IAF pode variar de 30% a 70% em florestas onde as folhas estão altamente agregadas ou aglomeradas. Baret et al. (2010) observaram uma sub-estimação do IAF em torno de 11% em culturas de linha como milho.

Jonckheere et al. (2004), Welles e Norman (1991) relataram um desempenho satisfatório do LAI-2000 em canópias homogêneas como no trigo e soja, entretanto em canópias heterogêneas como em florestas o instrumento foi caracterizado por uma sub-estimação do IAF em torno de 35% a 40% devido à agregação/aglomeração/sobreposição das folhas.

McPherson e Peper (1998) observaram um viés de sub-estimação sistemática do índice de área foliar de árvores urbanas obtido com o LAI-2200C e AccuPAR LP-80 devido ao agrupamento de folhas. Segundo Jonckheere et al. (2004), o erro causado pelo agrupamento das folhas ainda não foi completamente resolvido e constitui um desafio para os instrumentos ópticos indirectos de medição do índice de área foliar.

**Componentes lenhosos (“*Woody components*”)**: os instrumentos assumem que, quanto maior for a interceptação da luz, maior é a área foliar nessa canópia. Porém o princípio de fracção de espaços, utilizado pelos instrumentos não permite a distinção da folha de outras partes verdes, o que pode levar a superestimativa do IAF (Whitford et al., 1995).

Segundo Kucharik et al. (1998), as componentes lenhosas não influenciam significativamente no índice de área foliar porque a área foliar é geralmente mais larga e tende a sombrear essas componentes.

Chen et al.(1997) compararam quatro instrumentos de medição de índice de área foliar, incluindo o LAI-2000 e AccuPAR LP-80, recomendam o LAI-2000 (predecessor do LAI-2200C) para medição do índice de área foliar em florestas coníferas devido à medição de fracção de espaços em diferentes gamas de ângulos zenitais. Pacheco et al. (2001) observaram maior exactidão na medição do índice de área foliar nas culturas de milho e feijão branco com o LAI-2000 em relação ao similar do LP-80, TRAC.

Casa et al. (2019), no seu estudo, encontraram um desempenho mais satisfatório com o LAI-2000 em relação ao AccuPAR LP-80 nas culturas de milho, feijões e trigo, apesar de ter sido observado uma tendência geral dos instrumentos em sub-estimar o IAF. Os mesmos autores referiram que a subestimativa do IAF com o LAI-2000C deveu-se principalmente a um fenómeno de saturação, que também foi encontrado com o AccuPAR LP-80, que ocorre em condições de altas densidades de plantas.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição da área de estudo

O experimento foi realizado no campo experimental da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal (FAEF), na cidade de Maputo, no campus principal da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), no período de Outubro de 2023 à Fevereiro de 2024, com as seguintes coordenadas geográficas: 25° 57' 07" de Latitude Sul e 32° 36' 05' de Longitude Este e a 60 m acima do nível médio das águas do mar. Segundo a classificação de Köppen a região é classificada por apresentar um clima tropical chuvoso de savana (Aw). A precipitação média anual é de cerca de 767 mm, sendo o mês mais chuvoso o de Fevereiro com 137 mm e o mês mais seco o de Agosto com uma média de apenas 12 mm. A temperatura média anual é cerca de 22,8 °C (INAM, 2008).

Nesta área predominam os solos do tipo arenossolos com teor de matéria orgânica igual a 0,2%, nos primeiros 20 cm de profundidade. Nas camadas abaixo de 75 cm, a água média disponível é de 16,7 mm/m. Na cidade de Maputo predominam solos arenosos muito claros (cinzentos a amarelos), solos pobres e típicos da zona sul do País (FAO/UNESCO, 1990)

Tabela 6: Características das variedades de milho e feijão nhemba usadas no experimento

<b>Cultura</b>	<b>Variedade</b>	<b>Origem</b>	<b>Hábito de crescimento</b>	<b>de Ciclo (dias)</b>	<b>Compasso</b>
<b>Milho</b>	Matuba	Moçambique	-	90-120	80 x 30cm
<b>Feijão Nhemba</b>	IT18	Moçambique	Semi-erecto	< 75	60 x 30cm

Fonte: (IIAM, 2011)

#### 3.2. Delineamento experimental

O experimento foi conduzido num arranjo factorial de 3 x 2 ao Delineamento de Blocos Completos Casualizados com uma faixa de 24 m x 24 m com seis tratamentos. O número de tratamentos foi obtido pela combinação de milho puro, feijão nhemba puro e consociação de milho e feijão nhemba a uma proporção de 100 milho: 50 feijão nhemba com 120 KgN/ha de adubação nitrogenada e sem adubação nitrogenada.

Tabela 7: Designação dos tratamentos aplicados

<b>SISTEMA DE CULTIVO</b>			
<b>ADUBAÇÃO</b>	<b>Milho Puro</b>	<b>Feijão nhemba puro</b>	<b>Consociação</b>
<b>N0</b>	MN0	CN0	MCN0
<b>N1</b>	MN1	CN1	MCN1

Legenda:

MN0 : Cultivo puro de milho sem adubação;

MN1: Cultivo puro de milho com adubação;

MCN0: Cultivo consociado de milho e feijão nhemba a uma proporção de 100M:50C não adubado;

MCN1: Cultivo consociado de milho e feijão nhemba a uma proporção de 100M:50C adubado;

CN0: Cultivo puro de feijão nhemba não adubado;

CN1: Cultivo Puro de feijão nhemba adubado.

O ensaio foi estabelecido numa área total de 576 m<sup>2</sup>, com seis tratamentos organizados em sub-parcelas de quatro linhas, com vinte e quatro metros de comprimento cada linha. No sistema consociado, as linhas de feijão nhemba foram intercaladas entre as linhas de milho com a distância entre linhas de 0.8 metros e 0.3 metros a distância entre plantas para as duas culturas. No cultivo puro de milho, a distância entre linhas foi de 0.8 metros e 0.3 metros a distância entre plantas. No cultivo puro de feijão nhemba, a distância entre linhas foi de 0.6 metros e 0.3 metros de distância entre plantas.

### **3.3.Maneio do Ensaio**

Para a preparação da área experimental foi feita uma lavoura 30 dias antes da sementeira, de seguida uma gradagem com recurso a enxada e ancinho para destorroar a leiva e nivelar o solo para garantir boas condições de germinação da semente. Posteriormente, foi feita a demarcação e divisão da área em sub-talhões com recurso a fita métrica, cordas e estacas.

A sementeira foi realizada no dia 26 de Outubro de 2023 a uma densidade de 41667 plantas/ha de milho e feijão nhemba no sistema consociado e puro de milho, a densidade de feijão nhemba no cultivo puro foi de 83333 plantas por hectare. Para assegurar o êxito na germinação, foram colocadas três sementes por covacho a uma profundidade de cinco centímetros. Para garantir a densidade requerida, foi feita a retanchar 11 dias depois da sementeira nos casos onde não foi observada a emergência. E no mesmo dia, também foi realizado o desbaste com recurso a uma faca, tendo sido deixada apenas uma planta por covacho.

A adubação no experimento foi feita em duas aplicações, a primeira aplicação, a adubação de fundo foi feita durante sementeira, com aplicação do composto NPK com a formulação 12-24-12. Um total de 120 Kg/ha de nitrogénio foi aplicado, onde um terço foi aplicado na adubação

de fundo, neste caso 40Kg/ha como 333.3 Kg de NPK (12-24-12) e 80 Kg/ha restante foi aplicado na adubação de cobertura, aos 26 dias após a emergência com ureia (46%N) e devido a falta de superfosfato simples e cloreto de potássio, fez-se compensações com NPK (12-24-12) para adubação de cobertura. A adubação foi aplicada de forma localizada em linha a dez centímetros ao lado da planta e a cinco centímetros de profundidade.

Durante o experimento foram feitas duas sachas com recurso a enxada, aos 14 e 24 DAE para o controlo das infestantes. Para o controlo das pragas, um total de quatro pulverizações foram feitas durante o experimento periodicamente num intervalo de 15 dias, com produtos como a Cipermetrina, Bulldock e Belt de forma rotacional a uma dose de 280ml/ha, 300ml/ha e 220 ml/ha respectivamente.

Todos os tratamentos foram submetidos à irrigação com recurso ao sistema de rega por aspersão. Ao todo foram usados dois aspersores setoriais com um raio de 12 m cada. Para se observar a variação do gradiente de distribuição e a quantidade de água de rega, foi realizado teste de uniformidade de distribuição de água antes da sementeira. Este teste foi feito quatro vezes e com duração de duas horas cada, aos 13, 10, 8 e 6 dias antes da sementeira. O intervalo de rega usado foi de dois dias e um tempo de rega de duas horas por dia. Para a realização do teste de uniformidade de água, foi marcado de dois em dois metros no comprimento assim como na largura do campo. E nas intersecções entre a largura e o comprimento, foram colocados colectores com um diâmetro de 5,4 cm.

Seguidamente foi ligado a bomba e duas horas depois, foram medidos os valores observados em cada colector com recurso a uma proveta graduada em ml. Para a determinação de quantidades de água aplicado durante o ensaio, foram usadas seguintes equações:

$$\text{A área do colector pela fórmula: } A = \pi \frac{d^2}{4} \quad (\text{Eq.13});$$

$$\text{A coluna de água pela fórmula: } h = \frac{V}{A} \quad (\text{Eq.14});$$

$$\text{Intensidade de precipitação pela fórmula: } I = \frac{h}{t} \quad (\text{Eq.15});$$

$$\text{Quantidade de água de rega pela fórmula: } R = I * N \quad (\text{Eq.16})$$

Onde: “A” é a área do coletor usado, “d” é o diâmetro do coletor usado, “V” é o volume de água observado no coletor, “t” é o tempo de duração do teste, neste caso 2h, “N” é o número de vezes que o campo foi regado, “R” é a quantidade de água de rega.

Até o fim do experimento, o campo foi regado trinta e cinco vezes, tendo sido aplicado neste tempo 336 mm de água em média pela rega. Adicionalmente, foi registado com um pluviómetro graduado instalado no campo, um total de 252 mm de água pela precipitação.

### 3.4. Variáveis e procedimentos nas Medições do IAF

Em cada amostragem, as medições foram feitas no período da manhã entre 6 e 11 horas numa área específica conhecida com 3.6 m de comprimento e 3.2 m de largura dentro da sub parcela, o qual consistiu em doze plantas por linha (360 cm) onde as bordas foram descartadas e, a primeira e a última foram consideradas bordaduras, resultando numa área útil de 3.84 m<sup>2</sup> (2.4 m de comprimento e 1.6 m de largura) constituída por duas linhas centrais com oito plantas por linha. Em cada amostragem, foram feitas três repetições do IAF usando os métodos ópticos indirectos antes da colecta das folhas para o método gravimétrico.

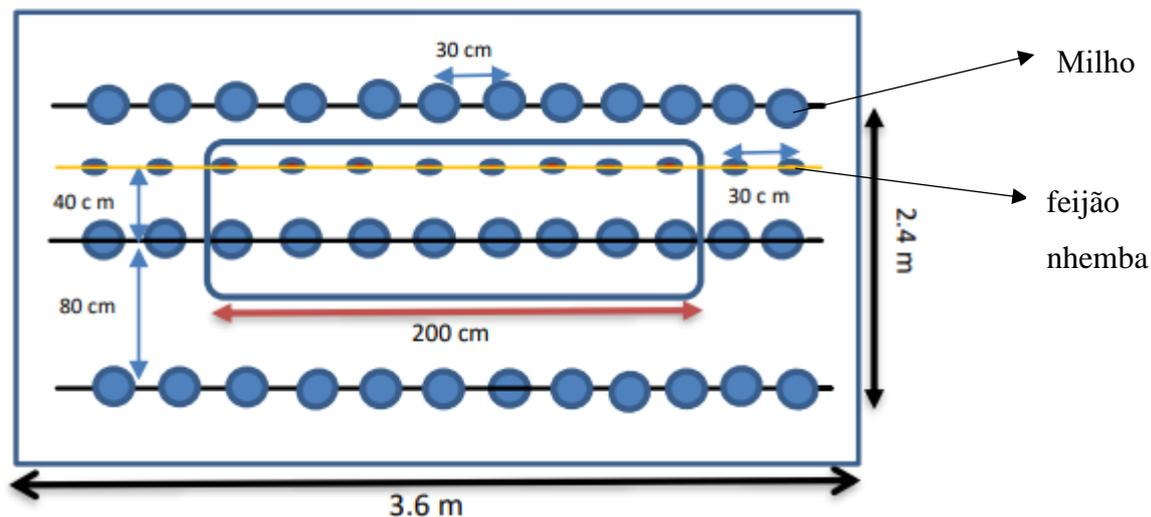


Figura 8: Área de amostragem

Por outro lado, para o método gravimétrico foram feitas amostragens destrutivas cortando-se a planta inteira a partir de 2 cm da superfície do solo com recurso a uma faca. Para este método, uma amostra de dezasseis plantas foi colectada em uma sequência onde quatro plantas mais centrais por parcela constituíram subamostra. Todas folhas foram colectadas e colocadas numa sacola de papel devidamente etiquetada conforme o tratamento e, submetidas à secagem numa estufa à 85 °C até se atingir um peso constante. Uma balança com precisão de 0.001g foi usada para pesar as folhas após a secagem e, os resultados foram registados numa planilha Excel.

Ao longo do experimento foram feitas quatro (4) medições do índice de área foliar nomeadamente aos 20, 39, 45 e 66 dias após a emergência, para captar diferentes etapas fenológicas de crescimento e desenvolvimento das culturas.

### 3.4.1. Métodos Indirectos

#### a) LAI-2200C

Este foi sequencialmente o primeiro instrumento a ser usado, logo nas primeiras horas entre seis e oito após o nascer do sol, por se basear na radiação difusa que é mais predominante nessas condições e, assim evitar que condições de luz solar directa e intensa causassem reflexão especular da folha sobre as lentes do sensor em volta da tampa de visão e influenciar-se nas medições. Para assegurar o êxito da sincronização e correspondência dos dados entre o sensor óptico e a consola, foi feita a definição manual da hora no relógio do instrumento tanto do sensor óptico como da própria consola. De seguida foi verificada a funcionalidade dos anéis pela mensuração da luz em céu aberto e, para permitir a definição da leitura acima da canópia, foram feitas comparações entre as leituras “A” e “B” anel por anel e foi verificado se na leitura “A” foram registados valores maiores que na leitura “B”, como procedimentos de calibração do instrumento antes de ser utilizado (manual do LAI-2200C, versão 3 de 2013, pag. 2-8).

Uma leitura acima da canópia, designada leitura “A”, foi feita longe do alcance da influência da projecção de sombra causada pelas árvores nas proximidades, de modo a permitir a mensuração da quantidade de luz antes de ser atenuada ao entrar em contacto com a canópia. Seguidamente foram feitas dez leituras abaixo da canópia, designadas leitura “B”, com o operador posicionando-se de costas ao sol e seguindo um transecto linear na forma de uma diagonal cuja distância foi determinada pelo teorema de Pitágoras com base nas dimensões da área útil de amostragem.

$$d^2 = C^2 + L^2; d = 2,86m \text{ (Eq. 17)}$$

Durante as leituras “B”, tampas de visão foram usadas para evitar a incidência directa do sol e a influência da projecção da sombra do operador sobre as lentes do sensor. Foram usadas as mesmas tampas usadas na leitura “A”, de modo a permitir que o sensor veja a mesma proporção do céu.

Para captar o máximo da variabilidade da densidade da folhagem dentro da canópia, tanto as partes mais densas como as menos densas da canópia, as leituras “B” foram feitas em duas diagonais formando-se um padrão “X”. Em cada diagonal foram feitas cinco leituras “B” onde a distância no espaço de uma leitura à outra foi determinada pela seguinte fórmula:

$$h = \frac{d}{5}; h = 0,57m = 57cm \text{ (Eq. 18)}$$

Onde: “d” é a distância da diagonal que passa pelo retângulo formado entre o comprimento “C” (2,4 m) e a largura “L” (1,6 m) da área de amostragem, “h” é a distância entre as leituras “B” imediatamente seguidas, que corresponde a aproximadamente um passo do operador.

Exceptuando-se no padrão de cultivo consociado, os procedimentos para a determinação do índice de área foliar foram os mesmos em todos tratamentos. No padrão de cultivo consociado, foi determinado o índice de área foliar total, na qual as leituras “B” foram feitas abaixo das duas culturas componentes e, o índice de área foliar parcial no qual as leituras “B” foram feitas abaixo das folhas do milho.

#### b) AccuPAR LP-80

Este instrumento foi usado entre nove e onze horas, sobretudo em condições de sol intenso por se basear na luz solar directa. Como parte da calibração, de modo a permitir que o instrumento determinasse o ângulo zenital exacto, foi definida a hora, data e coordenadas geográficas (latitude e longitude) do local antes de quaisquer medições (manual do AccuPAR LP-80, 2014, pag. 31). Para aquisição da RFA incidente, foi feita uma leitura acima da canópia, fora da influência de projecção da sombra causada pelas árvores nas proximidades e para aquisição da RFA transmitida, foram feitas quatro leituras abaixo da canópia. As leituras abaixo da canópia foram feitas seguindo-se um transecto linear perpendicular à linha das culturas para aumentar a representatividade da amostra, onde o sensor era colocado para medição da RFA transmitida. A distância entre leituras abaixo sucessivas foi de 60 cm, correspondente à aproximadamente um passo do observador.

$$d = \frac{C}{4} = \frac{2.4}{4} = 0.6m = 60cm \text{ (Eq.19)}$$



Figura 9: Medições de leituras A e B

### 3.4.2. Método Gravimétrico (directo)

O método gravimétrico foi usado por último depois dos métodos indirectos por envolver amostragem destrutiva, a qual foi dividida em amostra principal e subamostra. A amostra principal consistiu de doze plantas, cujas folhas foram colectadas e submetidas à secagem na estufa do laboratório de solos da FAEF à 85 °C até se atingir um peso constante. As folhas da subamostra foram inicialmente submetidas à planimetria para a obtenção da sua área foliar antes da secagem às mesmas condições da amostra principal de modo a se determinar a área foliar específica (SLA).

$$LAI (m^2/m^2) = SLA (m^2/g) \times Ldw (g/m^2) \text{ (Eq. 20)}$$

Onde: LAI é o índice de área foliar obtido pelo método gravimétrico; SLA é a área foliar específica; Ldw é o peso seco das folhas da amostra principal.



Figura 10: Colecta e preparação das amostras

Como cuidados a ter com o método Gravimétrico, as folhas colhidas a serem submetidas à planimetria foram conservadas em sacolas de papel de modo a se evitar deformações estruturais devido à transpiração e desidratação.

A planimetria para determinação da área foliar da subamostra foi feita por três vias: *ImageJ*, *Petiole Pro* e por medições lineares usando a régua. As três técnicas foram consideradas repetições do método gravimétrico e o índice de área foliar final foi obtido pela média das três repetições.

#### a) **ImageJ**

As imagens das folhas submetidas à análise e processamento no ImageJ foram inicialmente *scaneadas* e digitalizadas numa impressora de marca *Epson* com referência *Epson V700*

PHOTO, V750 PRO e depois exportadas para um computador de marca HP, com um processador Intel(R) Pentium(R) CPU N3540 @ 2.16GHz 2.16 GHz, RAM 4.00 GB e um sistema operacional Windows.

Ao lado das folhas nas imagens digitalizadas foi graduada uma recta com o comprimento conhecido de 29 cm, para a calibração da escala no imageJ, a qual é usada como referência no software e automaticamente é calculada a razão entre número de pixels e unidade da distância da escala presente nas imagens, como ilustram as figuras a seguir:

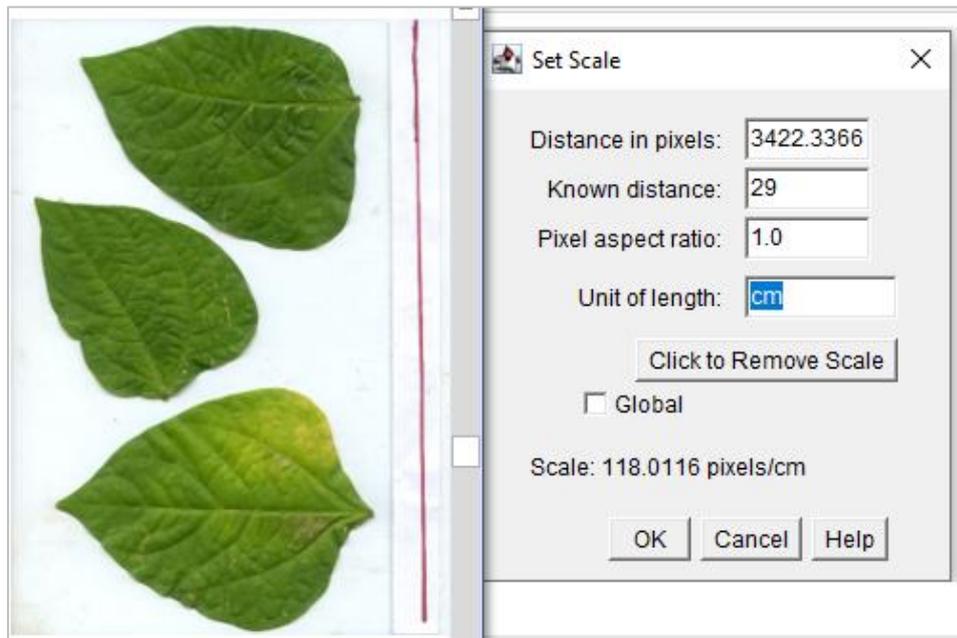


Figura 11: Calibração da escala no imageJ

Terminada a calibração da escala, a imagem foi convertida numa imagem monocromática (preto e branco) seguida de limiarização (Thresholding) para segmentar feição de interesse na imagem e separando-a do fundo, como é ilustrado a seguir:



Figura 12: Conversão da imagem em monocromática

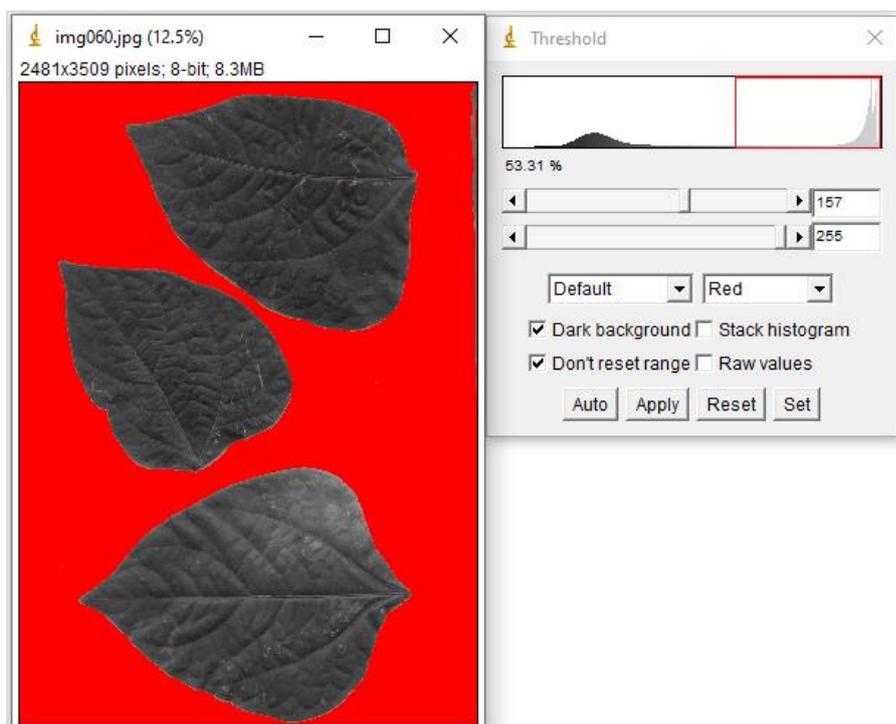


Figura 13:Limiarização da imagem

Após essas operações, foi feita a selecção em contorno das folhas na imagem com a ferramenta de esboço e automaticamente foi calculada a área dessas folhas, como é ilustrado a seguir:

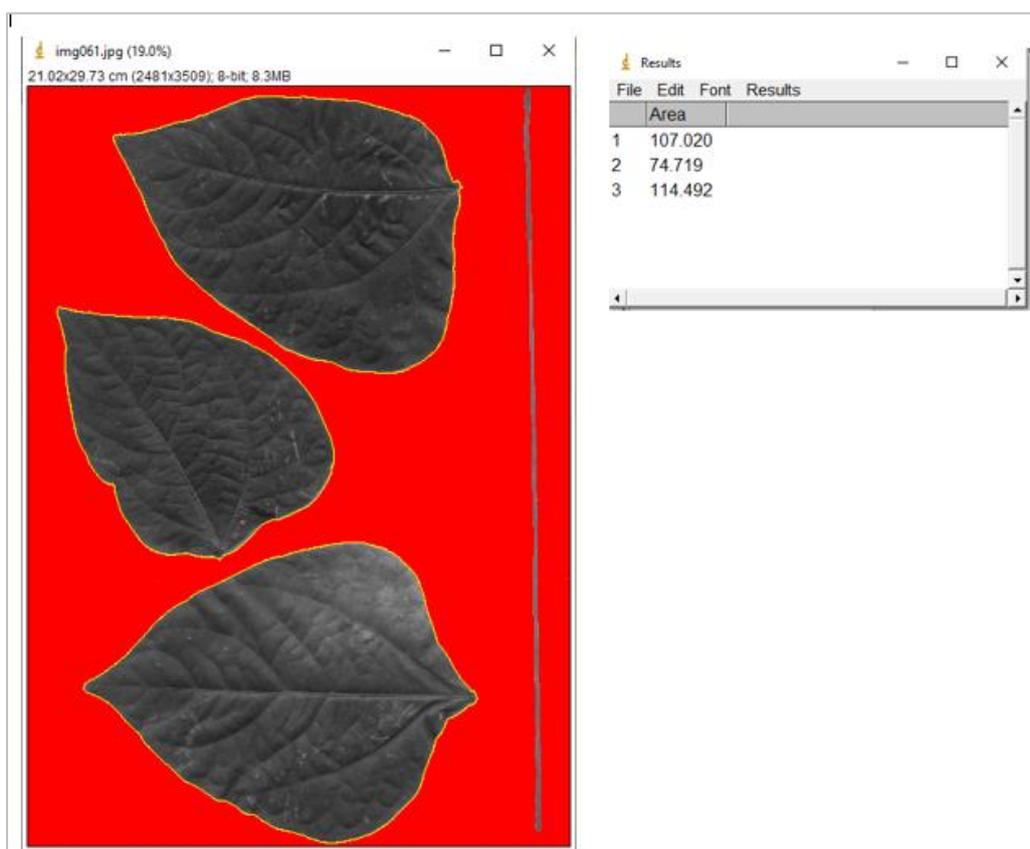


Figura 14:Determinação da área foliar com o *ImageJ*

Este procedimento foi feito para todas folhas da subamostra espécie por espécie em cada tratamento, no final o índice de área foi obtido pela equação 20.

## b) Petiole Pro

O aplicativo foi usado paralelamente ao ImageJ em dois celulares com seguintes especificações, de modo flexibilizar a tarefa:

Tabela 8: Especificações dos celulares usados para análise de imagens com o Petiole Pro

Modelo	Referência	Sistema operacional	Versão	Camera	CPU
<b>TECNO CD6j</b>	Camon 16 S	Android	10	48 MP	2.0GHz, Octa-Core
<b>Samsung</b>	Galaxy Note 10 Plus	Android	11	12 MP	4x 1.95 GHz Cortex-A55

Inicialmente o aplicativo foi submetido à calibração num *papel de calibração*, que contém marcas de escala e padrões que permite o cálculo de área foliar e outras características das plantas de forma exacta, disponível no sítio web do aplicativo. A calibração foi concluída quando foram visualizados no aplicativo os valores das marcas de escala presentes no papel de calibração durante a captura de imagem sem folhas das plantas no *papel de calibração*.

Após a calibração, para a captura de imagens foram colocadas folhas uma por uma no centro das marcas de referência em disposição circular no papel de calibração, onde o aplicativo oferece orientações sobre como capturar as imagens correctamente delimitando contornos em volta da folha e, instantaneamente é feita o cálculo de sua área pelos algoritmos interno do aplicativo, como é ilustrado a seguir.



Figura 15: Determinação da área foliar com o *Petiole Pro*

### **c) Medições Lineares**

Usando-se uma régua, foi determinado o maior comprimento da nervura do limbo e a maior largura do limbo foliar, dimensões a partir das quais foi determinada a área do rectângulo circunscrito pela folha como um produto do comprimento da folha pela sua largura. De modo a evitar a falta de representatividade de uma única folha de referência, foram determinadas as áreas de cada folha uma por uma individualmente e estes procedimentos para a determinação da área foliar foram feitos em paralelo às outras técnicas previamente referidas.

## **3.5.Determinação do Rendimento das culturas**

### **a) Feijão Nhemba**

Para a determinação do rendimento e suas componentes, número plantas (NP), número vagens por planta (NV), peso de 100 sementes, comprimento das vagens, a colheita foi feita 78 DAE na maturação fisiológica e para cada componente foram feitas quatro repetições por tratamento. Nesta fase os grãos geralmente contém acima de 15% de humidade (IIAM, 2011).

Componentes como número de plantas, comprimento de vagens e número de vagens foram determinadas no campo durante a colheita. Para estas componentes foi feita um censo para reduzir ao máximo o erro associado aos dados colectados. Na colheita, os elementos das componentes de rendimento como biomassa aérea colhida a partir de 2 cm do solo e vagens foram colocadas em sacos separados previamente rotulados com o nome do tratamento e a respectiva repetição.

Terminada a colheita, a biomassa aérea foi submetida à secagem ao sol por cinco dias para obtenção do seu peso seco, paralelamente, as vagens foram levadas ao laboratório, onde foi feita a debulha.

Para evitar a variação no peso da quantidade de grãos produzidos foi necessária a redução do teor de humidade até ao nível recomendado de pelo menos 13%. Esta secagem pode ser feita ao sol por pelo menos duas semanas ou numa estufa a 105 °C por um período de vinte e quatro horas para análise de sementes (IIAM, 2011). Para reduzir o teor de humidade nos grãos, foi feita a secagem na estufa do laboratório de solos da FAEF a 63 °C por quatro dias.

Após a secagem dos grãos, foi determinada o peso de 100 sementes com quatro repetições para cada tratamento. No final foram feitas pesagens de todas amostras para obtenção de quantidade de grãos produzidos por tratamento para cada repetição. Todas pesagens foram feitas numa

balança analítica do laboratório de solos da FAEF com precisão de 0.01g. O rendimento para cada tratamento por repetição foi estimado em toneladas por hectare pela seguinte relação:

$$R = \frac{P}{A \times 0.01} \quad (\text{Eq.25})$$

Onde: “R” é o rendimento em Ton/ha, “P” é o peso seco dos grãos em g, “A” é a área útil de amostragem em m<sup>2</sup>.

## **b) Milho**

Aos 106 DAE foram feitas medições de altura das plantas, contagem de número de plantas, número de espigas em cada tratamento com quatro repetições. Tal qual no feijão nhemba, para estas componentes a amostragem também foi feita por censo. A colheita do milho foi feita aos 106 DAE, na fase da maturação fisiológica em que o teor de humidade nos grãos está entre 18 e 24% (IIAM, 2011).

Exceptuando-se nos elementos das componentes de rendimento como espigas e caroços, todos os procedimentos para a determinação do rendimento do milho foram os mesmos seguidos no feijão nhemba. O índice de colheita foi determinado pela seguinte relação:

$$HI = \frac{Re}{Rb} \times 100 \quad (\text{Eq.26})$$

Onde: HI é o índice de colheita em percentagem; Re é o rendimento económico, neste caso grãos de milho ou feijão nhemba em Kg/ha; Rb é o rendimento biológico em Kg/ha de tudo que a planta produziu excepto as raízes devido à dificuldades de sua extracção (Donald, 1962).

## **3.6. Análise de Dados**

Todas análises de dados foram feitas recorrendo-se aos pacotes estatísticos STATA versão 17, SPSS versão 20 e Excel 2019.

### **Determinação da precisão das medições**

A precisão das medições do índice de área foliar observada com os dois métodos indirectos foi analisada considerando sua capacidade de gerar resultados individuais consistentes entre si dentro de um mesmo sistema de cultivo (repetibilidade) e entre diferentes sistemas de cultivo (reprodutibilidade). Essa precisão foi expressa em termos de variabilidade relativa do índice de área foliar através da medida do coeficiente de variação (CV) segundo as normas da Organização Internacional para a Padronização (ISO, 1994).

### **Determinação da exactidão das medições**

A determinação da exactidão das medições foi feita com base em medidas que expressam quão bom ou próximos os valores do índice de área foliar observado com os dois métodos indirectos estão do método gravimétrico, o método de referência. De modo a compensar as limitações e inconveniências de se usar uma única medida para expressar a exactidão, foram determinadas mais de uma medida, a saber: o Erro Médio Absoluto (MAE), a Raiz do Erro Quadrado Médio (RMSE), a Raiz do Quadrado Médio Relativo (RRMSE), o Coeficiente de Correlação Intraclasse (ICC), o Índice de Concordância de Wilmot (d) e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ). Para o caso do coeficiente de determinação foi precedida do teste de Fisher (ANOVA) para testar sua significância à 5%.

### **Seleção do melhor instrumento que fornece menor incerteza na consociação**

A seleção do melhor instrumento foi feita exclusivamente com base no desempenho do instrumento, sobretudo pela sua capacidade de fornecer medições com maior exactidão, ou seja, aquele cujas medições tiveram melhores valores de MAE, RMSE, RRMSE, ICC,  $R^2$ , índice de concordância de Wilmot com base nas suas classificações.

### **Determinação da relação entre o índice de área foliar e rendimento das culturas**

A magnitude da relação entre o índice de área foliar e o rendimento das culturas foi feita com base na análise do coeficiente de correlação de Pearson e regressão linear simples para modelar a relação, precedido da significância do poder explicativo e avaliação dos pressupostos de normalidade, homoscedasticidade e independência dos resíduos associados ao modelo.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Precisão (“Precision”) das Medições do índice de área foliar

A tabela abaixo mostra a repetibilidade e reprodutibilidade na medição do índice de área foliar observada com os dois métodos indirectos expressa em percentagem pelo coeficiente de variação. Segundo a classificação de Garcia (1989) para valores do coeficiente de variação, a precisão de medição do índice de área foliar observada com os instrumentos pode ser considerada boa.

Tabela 9: Precisão de medição do IAF dos métodos indirectos

	LAI-2200C_ CV (%)	AccuPAR LP-80_ CV (%)
<b>Repetibilidade</b>	17.50	18.42
<b>Reprodutibilidade</b>	24.03	27.04

Dado que a precisão expressa a consistência entre medições individuais consecutivas, é de se esperar que a alteração das condições em que as medições são feitas, sobretudo a iluminação, reduza a proximidade dos valores e, as características da radiação a que cada instrumento se baseia pode explicar as diferenças na precisão que podem ser observadas na tabela 9.

Da tabela 9, observa-se tendencialmente menores valores de coeficiente de variação com o método óptico indirecto LAI-2200C implicando maior precisão em relação ao AccuPAR LP-80. Essa diferença pode ser explicada pela sensibilidade dos instrumentos à condições de iluminação, onde segundo Garrigues et al (2008) o AccuPAR LP-80 é mais susceptível à variações temporárias por factores como pequenas mudanças na cobertura do céu pelas nuvens do que a radiação difusa usada pelo LAI-2200C que tende a ser mais constante, assim introduzindo menos variabilidade entre medições individuais consecutivas.

Pask et al (2012) sugerem que para se obter maior precisão com o AccuPAR LP-80, as medições devem ser feitas em condições de céu limpo e solarento onde a iluminação permaneça constante. Finzel et al (2012) recomendam o uso o AccuPAR LP-80 ao sol do meio-dia.

Apesar dos dois métodos indirectos não envolverem a destruição da biomassa, foi inevitável que durante as leituras abaixo da canópia, parte da canópia fosse perturbada ao entrar em contacto com os instrumentos, situação essa que ocorre de maneira diferente entre os diferentes sistemas de cultivo e, é mais notória em ambientes mais densos como em casos de sistemas consociados. Este facto também pode concorrer para introdução da variabilidade entre medições individuais consecutivas.

#### 4.2.Exactidão (“Accuracy”) das Medições do índice de área foliar

A tabela 10 abaixo mostra as medidas de exactidão de medição do índice de área foliar observadas com os dois métodos indirectos em diferentes sistemas de cultivo, fornecendo uma visão comparativa em relação ao método de referência. Da tabela 10, percebe-se que foram observados melhores valores nas medidas de exactidão, com base em suas classificações, nos cultivos puros de milho e feijão nhemba comparativamente ao padrão de cultivo consociado, reflectindo boa exactidão de medição do índice de área foliar em canópias homogêneas como é o caso do cultivo puro e, relativamente reduzida em canópias heterogêneas como é o caso da consociação de culturas.

Tabela 10: Exactidão de medição do índice de área foliar

Parâmetros	LAI-2200C			AccuPAR LP-80		
	Milho Puro	Consociado	Feijao Puro	Milho Puro	Consociado	Feijao Puro
<b>MAE</b>	0.43	1.75	0.59	0.71	2.13	0.73
<b>RMSE</b>	0.56	2.21	0.97	0.90	2.52	0.99
<b>RRMSE (%)</b>	26	49	20	42	55	21
<b>ICC</b>	0.86	0.75	0.97	0.73	0.68	0.96
<b>R<sup>2</sup></b>	0.7	0.68	0.97	0.35	0.8	0.98
<b>d</b>	0.95	0.84	0.98	0.72	0.54	0.96

Resultados similares também foram reportados por Fang et al (2019) e Yan et al (2019), sobretudo em cultivos puros, o que reforça a aplicabilidade dos instrumentos nessas condições. Por outro lado, na consociação das culturas a mistura de orientação das folhas e outras características morfológicas como a altura das culturas componentes cria uma padrão heterogêneo na canópia, constituindo assim um desvio à lei de Beer-Lambert, base teórica dos métodos ópticos indirectos, que pressupõe canópias homogêneas em vez de heterogêneas como é o caso da consociação (Monteith, 1965). Yan et al (2019) também constataram uma tendência de redução de exactidão dos métodos indirectos em florestas afirmando que o principal factor de erro nos instrumentos é o pressuposto de homogeneidade da canópia, que não é aplicável para outras canópias.

Segundo Baret et al (2010), em canópias heterogêneas como é o caso da consociação das culturas, a interação entre as espécies pode resultar na formação de agrupamento e sobreposição das folhas (*clumpnig*) em certas partes, assim criando-se largas fracções de espaços (*gap fraction*) em outras partes, o que aumenta a quantidade de luz que passa por esses

espaços sem ser interceptada pela canóia, pressupondo-se pouca área foliar e, por conseguinte concorrendo para a subestimação do índice de área foliar mensurado pelos instrumentos.

McPherson e Peper (1998) também observaram uma tendência de subestimação do índice de área foliar de árvores urbanas obtido com o predecessor do LAI-2200C, o LAI-2000 e AccuPAR LP-80 devido ao agrupamento de folhas (*clumping effect*).

Da tabela 10, também é possível observar que o LAI-2200C forneceu maior exactidão relativamente ao AccuPAR LP-80 na medição do índice de área foliar, particularmente no sistema de cultivo consociado, o que é reflectido por melhores valores nas medidas de exactidão, conforme as suas classificações, o que também pode ser visualizado nas figuras 16, 17 e 18 abaixo:

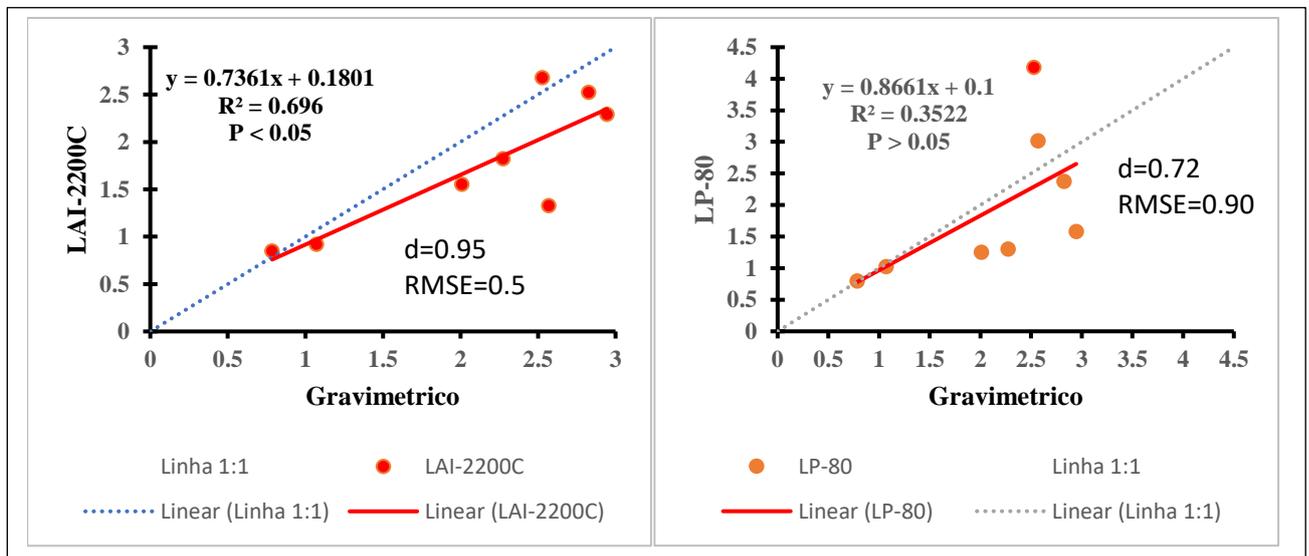


Figura 16: Comparação da exactidão dos métodos indirectos no cultivo puro de milho

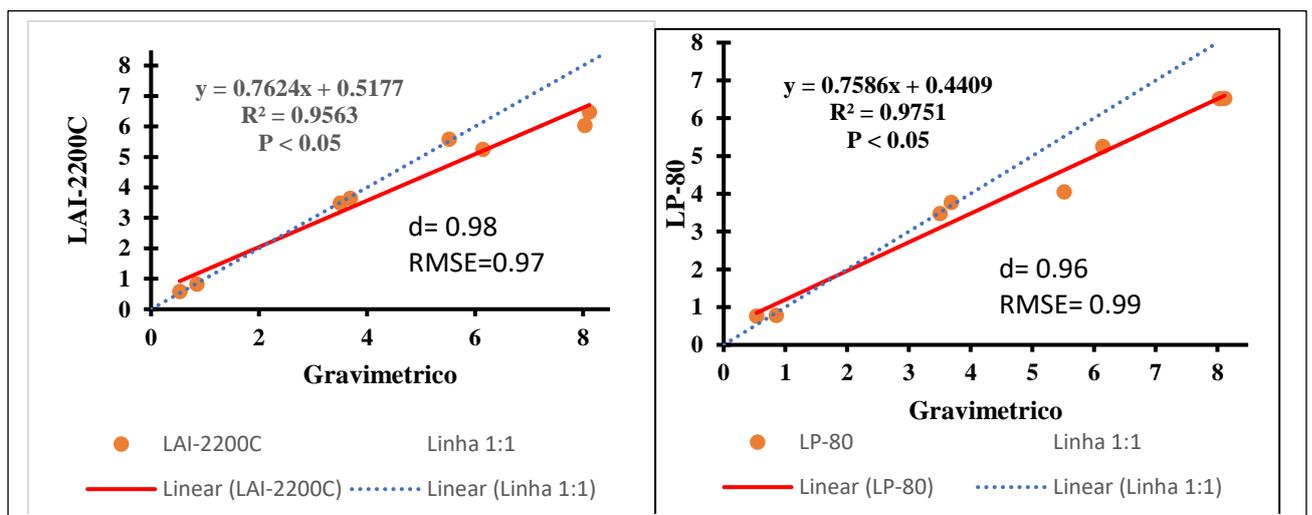


Figura 17: Comparação da exactidão dos métodos indirectos no cultivo puro de Feijão Nhemba

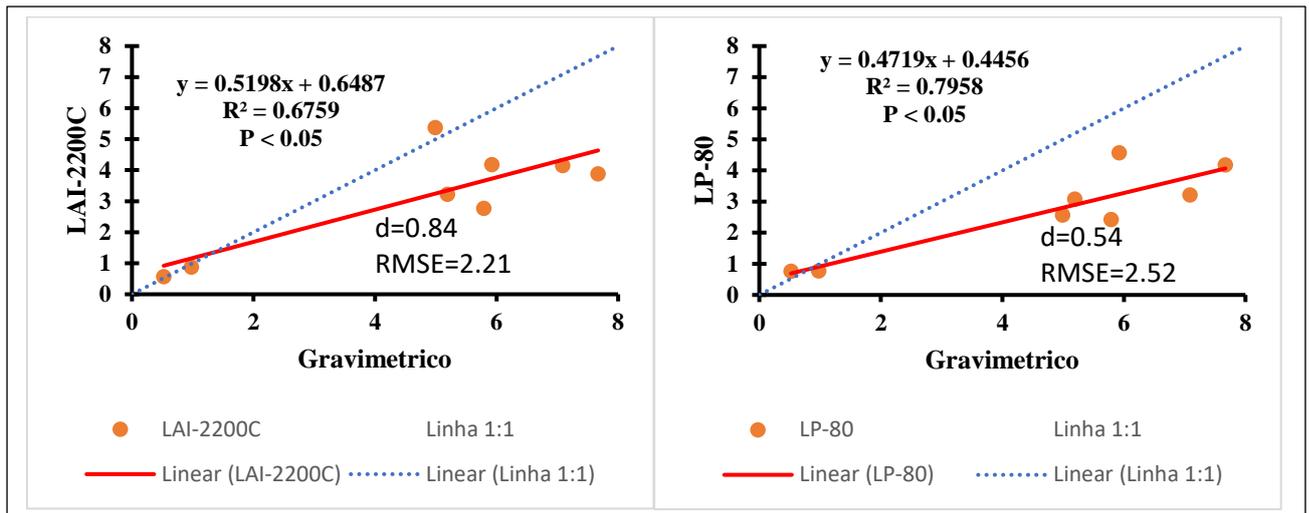


Figura 18: Comparação da exactidão dos métodos indirectos no cultivo consociado

A maior exactidão observada com o LAI-2200C relativamente ao AccuPAR LP-80, sobretudo no sistema de cultivo consociado pode estar relacionado ao facto do instrumento possuir sensores hemisféricos que permitem a captura da distribuição da luz em cinco ângulos diferentes simultaneamente, assim apresentando maior campo de visão em ambientes tipicamente densos característicos na consociação das culturas. Este aspecto proporciona ao instrumento maior eficiência na mensuração da fracção de espaços (*gap fraction*) em relação ao sensores lineares configurados no AccuPAR LP-80 que proporcionam uma mensuração da luz numa única direcção, podendo fornecer uma visão incompleta da fracção de espaços (*gap fraction*) (Jonckere, 2004).

Também é possível observar nas figuras 16, 17 e principalmente na figura 18 que os pontos sobrepõe à linha 1:1, que representa concordância perfeita, e as rectas se sobrepõem para valores baixos do índice de área foliar e à medida que os valores aumentam, as rectas tendem a se afastar. Isso mostra que à medida que as culturas se desenvolvem e a canópi se torna mais densa ocorre variação no tamanho e número de fracção de espaços (*gap fraction*), o que pode se reflectir na redução da exactidão de medição do índice de área foliar ao longo das etapas fenológicas. Nos estágios iniciais, o padrão de distribuição das folhas é relativamente uniforme e tornam-se menos uniforme nos estágios mais avançados criando-se maior variação na proporção de espaços dentro da canópi.

Resultados similares também foram obtidos por Casa et al. (2019) que afirmaram que em ambientes mais densos os sensores dos instrumentos se tornam mais sensíveis ao fenómeno de saturação da fracção de espaços (*gap fraction*), que é mais acentuada com o desenvolvimento das culturas.

Para além dos aspectos relacionados com as assunções dos princípios de funcionamento dos instrumentos e a estrutura da canópia cujo índice de área foliar é mensurado, factores associados aos cuidados com o método de referência, Método Gravimétrico, também podem reduzir a proximidade entre os valores mensurados pelos instrumentos e o método Gravimétrico, onde as folhas submetidas a planimetria podem sofrer redução da sua área devido a processos como transpiração e desidratação que levam à perda de turgescência e deformações estruturais das folhas pelo que, podem ser minimizados por meio de conservação em sacos plásticos selados ou em ambientes refrigerados.

#### 4.3. Relação entre o índice de área foliar e rendimento das culturas

As figuras mostram uma correlação forte positiva entre o índice de área foliar e o rendimento médio de grãos das culturas. Estes resultados evidenciam que o aumento do índice, promove maior intercepção da luz pelas folhas o que proporciona maior taxa de fotossíntese e consequentemente maior produção da matéria seca (Monteith, 1994; Taiz e Zeiger, 2017).

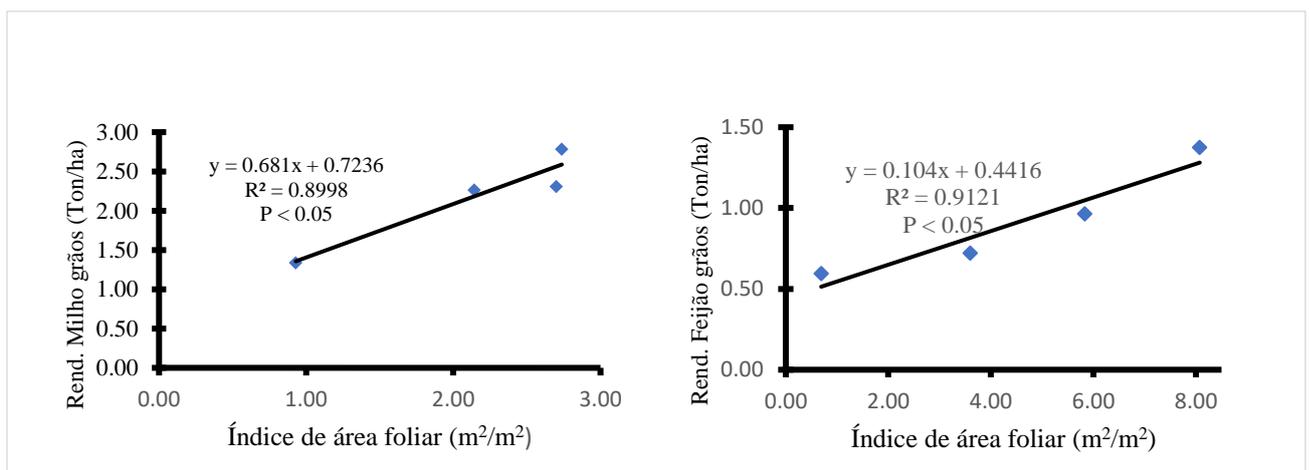


Figura 19: Relação entre o índice de área foliar e rendimento das culturas

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

- O LAI-2200C e AccuPAR LP-80 apresentaram boa precisão e exactidão na medição do índice de área de foliar, sobretudo nos cultivos puros de Milho e Feijão Nhemba. A precisão variou entre 17 e 27%, expressa como medida do coeficiente de variação. A exactidão expressa como RRMSE variou entre 20 e 26%;
- O LAI-2200C apresentou maior exactidão em relação ao AccuPAR LP-80 na medição do índice de área foliar no sistema de cultivo consociado de Milho e Feijão Nhemba. O LAI-2200C apresentou o índice de concordância de Wilmot igual a 0.84, e o AccuPAR LP-80 apresentou 0.54;
- O índice de área foliar apresentou uma correlação forte positiva com o rendimento médio das culturas ( $R^2 = 0.9$ ).

### 5.2. Recomendações

- Recomenda-se o uso do LAI-2200C para medição do índice de área foliar particularmente dos sistemas de cultivo consociados de Milho e Feijão Nhemba por fornecer medição do IAF com maior precisão e exactidão. Também recomenda-se como procedimentos para o método gravimétrico, que as folhas a serem submetidas à planimetria sejam colhidas sequencialmente e imediatamente processadas ou, conservá-las em sacos plásticos selados ou em ambientes refrigerados, de tal maneira a preservar sua turgescência e evitar deformações estruturais decorrentes causadas pela transpiração e desidratação;
- Que se realizem pesquisas da mesma natureza, com outras culturas e com diferentes arranjos espaciais.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ali, A. M., Darvishzadeh, R., & Skidmore, A. K. (2017). **Retrieval of specific leaf area from Landsat-8 surface reflectance data using statistical and physical models**. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(8), 3529–3536, Iran, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2690623>
2. Ananthi T ; Amanullah M. ; Al-Tawaha. (2017). **A Review on Maize- Legume Intercropping for Enhancing the Productivity and Soil Fertility for Sustainable Agriculture in India**. *Advances in Environmental Biology*, 11(5) May 2017, Pages: 49-63.
3. Baret, F., de Solan, B., Lopez-Lozano, R., Ma, K., Weiss, M. (2010). **GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5 degrees zenith angle: theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops**. *France, Agric. For. Meteorol.* 150 (11), 1393–1401. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.011>
4. Baros, R.S.; Maestri, M.; Vieira, J.; Braga Filho, L.J. (1973). **Determinação da área foliar em café (Coffea arabica L. cv. Bourbon Amarelo)**. *Revista Ceres*, Viçosa, v.20, n.107, p.44-52, Brazil.
5. Bilalis, Dimitrios , Papastilianou, Panayiota , Konstantas, Aristidis , Patsiali, Sotiria , Karkanis, Anestis and Efthimiadou, Aspasia.(2010). **Weed-suppressive effects of maize-legume intercropping in organic farming**. *International Journal of Pest Management* pages 56:2,173–181,UK, URL:<http://dx.doi.org/10.1080/09670870903304471>
6. Bréda, N. J. (2003): **Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies**. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 52(392): 2403-2417, France. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/erg263>
7. Briggs G. E.; Kidd, F. A.; West, C. (1920): **A quantitative analysis of plant growth**. *Annals of Applied Biology*, v. 7, p. 202-223, London
8. Camargo, D.C.; Montoya, F.; Moreno, M.A.; Ortega, J.F.; Corcoles, J.I. (2016). **Impact of Water Deficit on Light Interception, Radiation Use Efficiency and Leaf Area Index in a Potato Crop (Solanum Tuberosum L.)**. *J. Agric. Sci.*, 4, 662–673, Cambridge.
9. Campbell, G.S (1986). **Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination distribution**. *Agric. For. Meteorol*, 36, 317-321, Sutton Bonington.
10. Casa, R; Upreti; D, Pelosi, F. (2019). **Measurement and estimation of leaf area index (LAI) using commercial instruments and smartphone-based systems**. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 275:012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012006>, Viterbo, Italy.
11. Chason, J.W., Baldocchi, D.D., Huston, M.A. (1991). **Comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf-area**. *Agric. For. Meteorol.* 57, 107–128, Oak Ridge, USA.
12. Chen, J.M., Cihlar, J., 1995. **Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods**. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 33 (3), 777–787. <https://doi.org/10.1109/36.387593>, Canada.

13. Chen, J.M., Rich, P.M., Gower, S.T., Norman, J.M., Plummer, S. (1997). **Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements**. J. Geophys. Res. Atmos. 102, 29429–2944, Canada
14. Chicco D, Warrens MJ, Jurman G. 2021. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. PeerJ Comput. Sci. 7:e623 DOI 10.7717/peerj-cs.623, Italy.
15. Cutini, A., Matteucci, G., Mugnozza, G.S. (1998). **Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI-2000 in deciduous forests**. Forest Ecol. Manag. 105, 55–65, Viterbo, Italy.
16. Danner, M.; Locherer, M.; Hank, T.; Richter, K. (2015). **Measuring Leaf Area Index (LAI) with the LI-Cor LAI 2200C or LAI-2200 (+2200Clear Kit) – Theory, Measurement, Problems, Interpretation**. EnMAP Field Guide Technical Report, GFZ Data Services, Postdam, Germany. DOI: <http://doi.org/10.2312/enmap.2015.009>
17. Daughtry, C.S.T. (1990). **Direct measurements of canopy structure**. Remote Sens. Rev. 5, 45–60, UK.
18. De Wit, C.T. (1965). **Photosynthesis of Leaf Canopies**. Agricultural Research Reports. Centre for Agricultural Publications and Documentation, Wageningen, pp. 57.
19. Dias, F.,C. (2008). **Uso do Software ImageJ para análise quantitativa de imagens de microestruturas de materiais**. Pg.85, IBICT, Brasil.
20. Donald, C.M. (1962). **in seareb of yield**. J. Aust. Inst. Agric. Sci, 28:171-8, Melbourne.
21. Dufrene, E., Bréda, N. (1995). **Estimation of deciduous forest leaf-area index using direct and indirect methods**. Oecology 104, 156–162, France.
22. Easlon e Bloom (2014). **Easy Leaf Area: Automated Digital Image Analysis for raipd and accurate measurement of leaf area**. Appl Plant Sci. 2(7). 140033, California, USA.
23. Fageria, V.C. Baligar, R.B. Clark (2006). **Physiology of Crop Production.1<sup>st</sup> ed, CRC Press Boca Raton, Florida**.
24. Fang H; Yinghui Zhanga ; Shanshan Weia ; Wenjuan Lia ; Yongchang Yea, Tao Suna, Weiwei Liu (2019) Validation of global moderate resolution leaf area index (LAI) products over croplands in northeastern Chinas. Remote Sensing of Environment 232 (2019) 111377, Beijing, China.
25. FAO/UNESCO/ISRIC. (1990). **Soil Map of the World, Revised Legend**. World Soil Resources Report 60, FAO, Rome. Versão em português: Legenda revista do mapa dos solos do mundo (1996).
26. Finzel, J.A.; Seyfried, M.S.; Weltz, M.A.; Kiniry, J.R. (2012). **Indirect Measurement of Leaf Area Index** in Sagebrush-Steppe Rangelands. Rangel. Ecol. Manag, 65, 208–212, USA.
27. Fleck S, Raspe S, Cater M, Schleppei P, Ukonmaanaho L, Greve M, Hertel C, Weis W, Rumpf, S., Thimonier, A., Chianucci, F., Beckschäfer, P., 2020: Part XVII: Leaf Area Measurements. Version 2020-1. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): **Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on**

- forests.** Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 37 p. + Annex [<http://www.icp-forests.org/manual.htm>].
28. Garcia, C. H. (1989). **Tabelas para classificação do coeficiente de variação.** Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB), artigo no SciELO, Brasil.
  29. Garrigues, S.; Shabanov, N. V.; Swanson, K.; Morisette, J. T.; Baret, F; and Myneni, R. (2008). **Intercomparison and sensitivity analysis of Leaf Area Index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands.** NASA Publications. 16. <https://digitalcommons.unl.edu/nasapub/16>. Lincoln, Nebraska.
  30. Garrity, S. (2014). **LAI, Theory and Practice.** V. I.0 Copyright©2014. Decagon Devices, Inc. Decagon Devices, U.S.A.
  31. Geoffrey G. Parker (2020). **Tamm review: Leaf Area Index (LAI) is both a determinant and a consequence of important processes in vegetation canopies.** Forest Ecology and Management 477 (2020) pages 11849, MD, USA.
  32. Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.M., (1999). **Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems.** Remote Sens. Environ. 70 (1), 29–51. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(99\)00056-5](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(99)00056-5). NY, USA.
  33. Hannickel A.; Silva M.; De Barros; Albuquerque. (2012). **ImageJ como ferramenta para medir medida da área foliar de partículas de magnetita em três escalas nanométricas.** Praia Vermelha, 22.290-270, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
  34. Hatfield et al (2008). **Leaf Area Index and Productivity of Major Crops. International Journal of Remote Sensing, 6(1). Informa UK.**
  35. <https://www.petiolepro.com/> [acessado aos 22 de setembro de 2024]
  36. IIAM (2011). **Autoridade Nacional de Sementes: Normas de controlo de qualidade de Sementes.** Maputo.
  37. INAM. (2008). **Climate Change and Development-Adapting by Reducing vulnerability.** Atlas de precipitacao em Mocambique (1951-2008). Maputo.
  38. ISO (1994). **Technical Corrigendum 1 to International Standard ISO 5725-1.** Technical Committee ISO/TC 69, Applications of statistical methods, Subcommittee SC 6, Measurement methods and results. Geneva.
  39. Jadon, A; Patil, A; Jadon, S (2022). **A Comprehensive Survey of Regression Based Loss Functions for Time Series Forecasting.** [https://github.com/aryan-jadon/Regression-Loss-Functions in-Time-Series-Forecasting-Tensorflow](https://github.com/aryan-jadon/Regression-Loss-Functions-in-Time-Series-Forecasting-Tensorflow). NY, USA
  40. Jamieson, P. D., Porter, J., R., & Wilson, D, R. (1991). **A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand.** Volume 27, Pages 337 – 350, New Zealand.
  41. Jonckheere I., Weissa, F. Baret, G.J. Smith, P. (2004). **Coppin: Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling.** Agricultural and Forest Meteorology 121. 37–53. France.
  42. Jonckheere, I., Stefan Fleck, Kris Nackaerts, Bart Muys, Pol Coppin, Marie Weiss, Frédéric Baret (2004). **Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography.** Agricultural and Forest Meteorology 121, 19–21. France.
  43. Jones, H.G. (1992): **Plant and microclimate.** Auflage, Cambridge. <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511845727>, UK.

44. Keating BA, Carberry PS. (1993). **Resource capture and use in intercropping: solar radiation.** Field Crop Res. 34:273 301 Volume 34, pages 273 – 301, Australia.
45. Kottner J.; Audige; Brorson; Donner; Bryon; Gajewski; Hrobjartsson; Roberts; Shoukri; Streiner. (2010). **Guidelines for Reporting Reliability and Agreement Studies (GRRAS).** Journal of Clinical Epidemiology 64, 96-106. USA.
46. Kucharik, C.J., Norman, J.M., Gower, S.T. (1998). **Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements.** Agricultural and Forest Meteorology, 91:69-88. NY, USA.
47. Kuzmenko e Seleznov (2021). **Brief Overview of Petiole Pro, a mobile platform for measurements in horticulture and floriculture.** <https://www.researchgate.net/publication/351005540>. Germany.
48. Kuzmenko M. e Seleznov A (2024). **Petiole Pro, Leaf Area Calibration Pad, Instructions.** London.
49. Levy, P.E., Jarvis, P.G. (1999). **Direct and indirect measurements of LAI in millet and fallow vegetation in Hapex-Sahel.** Agric. For. Meteorol. 97, 199–212. Edinburg, UK.
50. LI-COR. (1992). **LAI-2000 Plant Canopy Analyser. Instruction Manual.** LICOR, Lincoln, NE, USA.
51. LI-COR. (2013). **LAI-2200C Plant Canopy Analyser. Instruction Manual.** LICOR, Lincoln, NE, USA.
52. Majasalmi, T., Rautiainen, M., Stenberg, P., & Lukes, P. (2013). **An assessment of ground reference methods for estimating LAI of boreal forests.** Forest Ecology and Management, 292, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.017>. Vanta, Finland.
53. McPherson, E.G., Peper, P.J. (1998). **Comparison of five methods for estimating leaf area index of open-grown deciduous trees.** J. Arboric. 24, 98–111. Davis, USA
54. METER group (2017). **AccuPAR LP-80 Ceptometer Instruction Manual.** METER. Pullman, Washington DC.
55. Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural (MADER). (2020). **Moçambique. Inquérito agrário integrado,** Direção de Planificação e Políticas (DPP). Maputo.
56. Monsi, M., Saeki, T. (1953). **Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion.** Jpn. J. Bot. 14, 22–52. Germany.
57. Monte, J. E. B. A.; Sentelhas, P. C.; Chiavegato, E. J.; Guiselini C.; Santiago, A. V.; Prela (2005). **Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas.** Bragantia, Campinas, v.64, n.1, p.15-24. Brasil.
58. Monteith, J.L. (1965). **Light distribution and photosynthesis in field crops.** Ann. Bot. 29 (1), 17–37. Oxford, UK.
59. Monteith, J.L. (1994). **Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass.** Agric. Forest Meteorol. 68, 213–220. Oxford, UK.
60. O’Connell, M.G.; O’Leary, G.J.; Whitfield, D.M.; Connor, D.J. (2004). **Interception of Photosynthetically Active Radiation and Radiation-Use Efficiency of Wheat, Field Pea and Mustard in a Semi-Arid Environment.** Field Crop. Res, 85, 111–124. Australia.

61. Ofori F, Stern WR. (1987). **Cereal-legume intercropping systems**. Adv Agron. 41:41–90. Ghana.
62. Oliveira e M. Rakocevic (2003). **Adaptação de um método para medir o Índice de Área Foliar (IAF) e sua aplicação para Brquiária (*Brachiaria brizantha* Hochst ex A. Rich) em sistema silvipastoril** no Noroeste do Paraná, Brasil.
63. Pacheco, A., Bannari, A., Staenz, K., McNairn, H. (2001). **LAI measurements in white beans corn canopies with two optical measurements**. In: CNES (Ed.), Proceedings of the 8th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, pp. 374–379. France.
64. Pandey, D; Bhatnagar, A; Sigh, G; Samantha. (2022). **Growth response of intercropped maize (*Zea mays L.*) and urdbean (*Vigna mungo L.*) under different planting patterns and nutrients management practices**. Pantnagar 263145, U.S. Nagar, Uttarakhand.
65. Pask, A.J.D.; Pietragalla, J. **Leaf Area, Green Crop Area and Senescence. In Physiological Breeding II**. (2012). A Field Guide to Wheat Phenotyping; Pask, A.J.D., Pietragalla, J., Mullan, D.M., Reynolds, M.P., Eds.; CIMMYT, pp. 58–62. Mexico.
66. Pickering; A. Campbell; Nicholas Aflitto; Ari Grele; Julie K. Davis; Todd A. Ugene. (2019). **LeafByte: A mobile application that measures leaf area and herbivory quickly and accurately**. NY, USA.
67. Pierre, J.F.; Latournerie-Moreno, L.; Garruña, R.; Jacobsen, K.L.; Laboski, C.A.M.; Us-Santamaría, R.; Ruiz-Sánchez (2022). **Effect of Maize–Legume Intercropping on Maize Physio-Agronomic Parameters and Beneficial Insect Abundance**. Sustainability, 14, 12385. <https://doi.org/10.3390/su141912385>. Mexico.
68. Pokovai K., Fodor N. (2019). **Adjusting Ceptometer Data to Improve Leaf Area Index Measurements**. Agronomy, 9, 866, 1-3. Hungary.
69. Proshkin A.; Smirnov D; Burynin,;V. Panchenko (2023). **Method for Plant Leaves Square Area Estimation Based on Digital Image Analysis**; Russia.
70. Qi, J. Du, S. M. Siniscalchi, X. Ma, and C.-H. Lee (2020). **“On mean absolute error for deep neural network-based vector-to-vector regression,”** IEEE Signal Processing Letters, vol. 27, pp. 1485–1489. Beijing, China.
71. Rasband, W.; Tiago Ferreira (2012). **ImageJ User Guide**, IJ 1.46r, Revised edition.
72. Reis, G. (1978): **Análise de crescimento das plantas- Mensuração do crescimento. Tese de dissertação, Belém, Brasil.**
73. Rocha, C. C. (2015). **Avaliação de métodos para determinação de área foliar em jabuticabeira e pitangueira. Tese de dissertação, Brasilia, Brasil.**
74. Salter, W.T.; Gilbert, M.E.; Buckley, T.N. (2018). **Time-Dependent Bias in Instantaneous Ceptometry Caused by Row Orientation**. Plant Phenome J.1. Australia.
75. Schaefer, Farmer, Soto-Berlov, Woodgate, Jones (2014). **Validation of LAI and FPAR products, Chapter 6. Australia.**
76. Silva, L. C.; Fideles Filho, J.; Beltrão, N. E. de M.; Ramana Rao, T. V.; Santos. (1993). **Análise de crescimento de amendoim submetido a diferentes níveis de irrigação**. In: CONGRESSO. Brasil
77. Soile, P (1999). **Morphological image analysis: principles and applications**. New York: Springer.

78. Stenberg, P., 1996. **Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers.** Agric. For. Meteorol. 79 (1-2), 1–8. <https://doi.org/10.1016/0168>. Helsinki, Finland.
79. Summerfield, R. J. et al. The physiology cowpea. (1986). **Cowpea research, production and utilization.** p. 66-101. London, UK.
80. T. Chai and R. R. Draxler (2014). “**Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? –arguments against avoiding RMSE in the literature,**” Geoscientific model development, vol. 7, no. 3, pp. 1247–1250. NY, USA.
81. Taiz, L. e Zeiger, E. (2017). **Fisiologia Vegetal.** Artmed Editora
82. Taylor, J. (1997). **An Introduction to Error Analysis. The study of uncertainties in physical measurements.** Second edition. California.
83. Tefide (2023). **Comparison of Different Tools and Methods in the Measurement of Leaf Area in Alfalfa;** Black Sea Journal of Engineering and Science. Turkey.
84. Tewolde, H.; Sistani, K.R.; Rowe, D.E.; Adeli, A.; Tsegaye, T. (2005). **Estimating Cotton Leaf Area Index Nondestructively with a Light Sensor.** Agronomy, 97, 1158–1163. Missipi, USA.
85. Thimonier, A; Sedivy, I; Schlepi, P. (2010). **Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods.** Eur J Forest Res (2010) 129:543–562, Springer-Verlag.
86. Watson, D.J. (1947). **Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years.** Ann. Bot. 11, 41–76. Oxford, UK.
87. Weir, J. (2005). Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM; NY, USA.
88. Welles, J.M. (1990). **Some indirect methods of estimating canopy structure.** Rem. Sens. Rev. 5, 31–43. Dallas, USA.
89. Welles, J.M., Norman, J.M., (1991). **Instrument for indirect measurement of canopy architecture.** Agric. J. 83, 818–825. Dallas, USA.
90. Whitford, K.R., Colquhoun, I.J., Lang, A.R.G., Harper, B.M. (1995). **Measuring leaf-area index in a sparse eucalypt forest - a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression.** Agric. For. Meteorol. 74 (3-4), 237–249. <https://doi.org/10.1016/0168>. Australia.
91. Willmot, C. (1985). **Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. Vol. 90, Malasyiap. 8995-9005.** Boston, USA.
92. Xu, R., Dai, J., Luo, W., Yin, X., Li, Y., Tai, X., et al. (2010). **A photothermal model of leaf area index for greenhouse crops.** Agricultural and Forest Meteorology, 150(4), 541–552. Beijing, China.
93. Yan Y.; Ronghai H.; Jinghui; Weiss Marie, Jiang Hailan, Mu Xihan, Xie Donghui, Zhang Wuming (2019). **Review of indirect optical measurements of leaf area index: Recent advances, challenges, and perspectives.** Agricultural and Forest Meteorology. Beijing, China.
94. Zheng e Moskal (2009). **Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors.** sensors ISSN 1424-8220, USA.

## 7. ANEXOS

Tabela 11: Registo de programação de rega

Data	Tempo (hr)	I (mm/hr)	h (mm)
10/27/2023	2	4.8	9.6
11/2/2023	2	4.8	9.6
11/6/2023	2	4.8	9.6
11/8/2023	2	4.8	9.6
11/10/2023	2	4.8	9.6
11/21/2023	2	4.8	9.6
11/23/2023	2	4.8	9.6
11/27/2023	2	4.8	9.6
11/29/2023	2	4.8	9.6
12/1/2023	2	4.8	9.6
12/5/2023	2	4.8	9.6
12/7/2023	2	4.8	9.6
12/11/2023	2	4.8	9.6
12/13/2023	2	4.8	9.6
12/15/2023	2	4.8	9.6
12/19/2023	2	4.8	9.6
12/21/2023	2	4.8	9.6
12/26/2023	2	4.8	9.6
12/27/2023	2	4.8	9.6
12/29/2023	2	4.8	9.6
1/2/2024	2	4.8	9.6
1/4/2024	2	4.8	9.6
1/8/2024	2	4.8	9.6
1/10/2024	2	4.8	9.6
1/12/2024	2	4.8	9.6
1/15/2024	2	4.8	9.6
1/17/2024	2	4.8	9.6
1/19/2024	2	4.8	9.6
1/22/2024	2	4.8	9.6
1/24/2024	2	4.8	9.6
1/26/2024	2	4.8	9.6
1/30/2024	2	4.8	9.6
2/1/2024	2	4.8	9.6
2/2/2024	2	4.8	9.6
2/5/2024	2	4.8	9.6
<b>Total</b>	<b>70</b>	<b>168.0</b>	<b>335.9</b>

Tabela 12: Valores do índice de área foliar por tratamento para cada tipo de medição

Trat	Gravimétrico				LAI-2200C				LP-80			
	20	39	45	66	20	39	45	66	20	39	45	66
<b>MN0</b>	0.79	2.01	2.57	2.94	0.85	1.55	1.33	2.29	0.80	1.25	3.02	1.58
<b>MN1</b>	1.07	2.27	2.83	2.53	0.92	1.82	2.52	2.68	1.03	1.30	2.37	4.18
<b>MCN0</b>	0.52	5.79	4.99	7.67	0.56	2.77	5.37	3.89	0.76	2.42	2.56	4.18
<b>MCN1</b>	0.98	5.19	5.92	7.09	0.88	3.22	4.18	4.15	0.78	3.08	4.57	3.21
<b>CN0</b>	0.53	3.69	5.52	8.12	0.58	3.64	5.59	6.47	0.76	3.77	4.05	6.53
<b>CN1</b>	0.85	3.50	6.14	8.03	0.83	3.49	5.53	6.03	0.78	3.47	5.25	6.52

### 7.1. Tendência das medições do IAF em diferentes sistemas de cultivo

#### a) Teste usado: Análise de Variância (ANOVA)

Hipóteses da ANOVA

$H_0$ : LAI-2200C = AccuPAR LP-80 = Método de referência, ou seja, os instrumentos fornecem medições do índice de área foliar iguais ao método de referência

$H_a$ : Os instrumentos fornecem medições do índice de área foliar diferentes do método de referência

#### b) Testes de especificação associados ao Modelo de ANOVA

Pressuposto de Normalidade dos Resíduos

$H_0$ : Os resíduos seguem uma distribuição normal,  $N\sim(0, \sigma)$

$H_a$ : Os resíduos não seguem uma distribuição normal,  $N\sim(0, \sigma)$

Pressuposto de Homocedasticidade dos Resíduos

$H_0$ : Os resíduos são homoscedásticos

$H_a$ : Os resíduos não são homoscedásticos (são heteroscedásticos)

Critério de decisão

Valor de Probabilidade (P-value) > nível de significância de 5% (0.05): Não rejeita-se  $H_0$

Valor de Probabilidade (P-value) < nível de significância de 5% (0.05): Rejeita-se  $H_0$

### 7.1.1. Tendência das medições do IAF no cultivo Puro de Milho

Tabela 13:ANOVA para tipos de medições no cultivo puro de milho

<b>FV</b>	<b>SQT</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>Tipos de medições</b>	1.79	2	0.895	1.107	<b>0.336</b>
<b>Resíduo</b>	55.783	69	0.808		
<b>Total</b>	57.574	71			

Não se rejeita a hipótese nula.

Tabela 14:Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

<b>Variável</b>	<b>Obs</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>z</b>	<b>Prob&gt;z</b>
<b>Resíduo</b>	72	0.97929	1.304	0.579	<b>0.28137</b>

Não se rejeita a hipótese nula.

Tabela 15:Teste de Heteroscedasticidade de Breusch-Pagan

<b>Chi-Quadrado (1)</b>	<b>Valor de P</b>
<b>0.32</b>	<b>0.5737</b>

Não se rejeita a hipótese nula.

### 7.1.2. Tendência das medições do IAF no cultivo Puro de Feijão Nhemba

Tabela 16:ANOVA para tipos de medições no cultivo puro de Feijão Nhemba

<b>FV</b>	<b>SQT</b>	<b>GL</b>	<b>QM</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<b>Tipos de medições</b>	5.934	2	2.967	0.498	0.61
<b>Resíduo</b>	411.222	69	5.96		
<b>Total</b>	417.156	71			

Não se rejeita a hipótese nula.

Tabela 17: Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

<b>Variável</b>	<b>Obs</b>	<b>W</b>	<b>V</b>	<b>z</b>	<b>Prob&gt;z</b>
<b>Resíduo</b>	72	0.93522	4.079	3.06	<b>0.110</b>

Não se rejeita a hipótese nula.

Tabela 18: Teste de Heteroscedasticidade de Breusch-Pagan

<b>Chi-Quadrado (1)</b>	<b>Valor de P</b>
<b>1.52</b>	<b>0.2170</b>

Não se rejeita a hipótese nula.

### 7.1.3. Tendência das medições do IAF no cultivo consociado de Milho e Feijão Nhemba

Tabela 19: ANOVA para tipos de medições no cultivo consociado de Milho e Feijão Nhemba

FV	SQT	GL	QM	F	P
<b>Tipos de medições</b>	57.252	2	28.626	7.766	0.001
<b>Resíduo</b>	254.335	69	3.686		
<b>Total</b>	311.586	71			

Rejeita-se a hipótese nula.

Tabela 20: Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

Variável	Obs	W	V	z	Prob>z
<b>Resíduo</b>	72	0.9405	3.745	2.876	<b>0.210</b>

Não se rejeita a hipótese nula.

Tabela 21: Teste de Heteroscedasticidade de Breusch-Pagan

Chi-Quadrado (1)	Valor de P
<b>1.48</b>	<b>0.170</b>

Não se rejeita a hipótese nula.

### 7.2. Intervalos de concordância dos métodos pelo teste de *Bland-Altman*

Os limites de concordância representam o intervalo de confiança onde a maioria das diferenças (erros) deverá estar ao nível de confiança de 95% e podem ser obtidos pelas seguintes fórmulas:

$$M_k = P_i - O_i$$

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n dk$$

$$Ci = \bar{d} \pm 2SD$$

$M_k$ ,  $\bar{M}$ ,  $Ci$  e  $SD$  representam as diferenças entre as medições, a média das diferenças (viés), os limites de concordância e o desvio padrão das diferenças. Se a maioria das diferenças entre os métodos estiver dentro do intervalo, a concordância é boa. Se a maioria das diferenças estiver fora dos limites e a média das diferenças estiver muito afastada de zero, indica que a concordância não é boa.

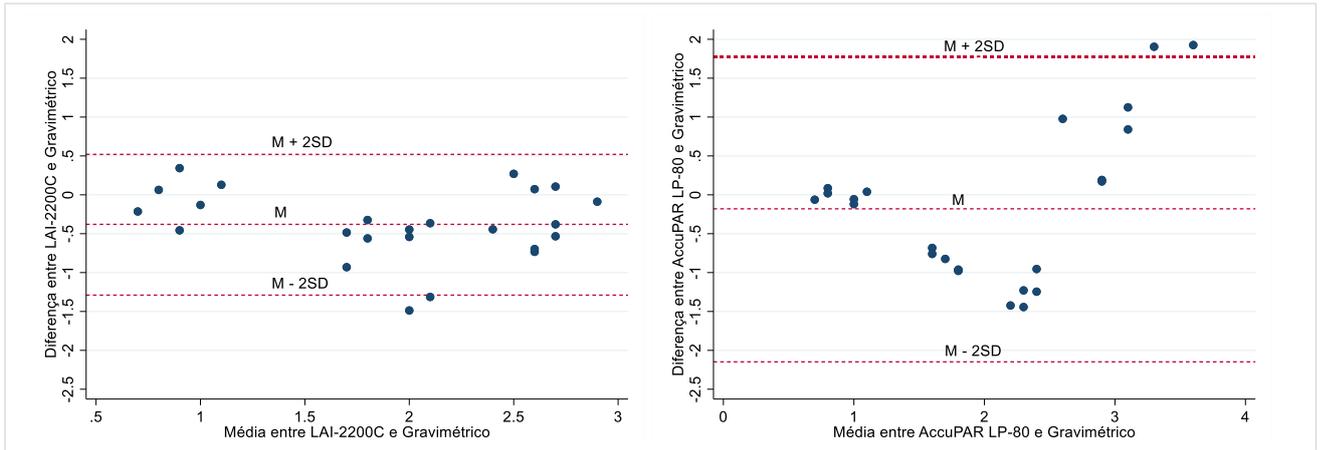


Figura 20: Limites de concordância de medições do IAF no Cultivo Puro de Milho

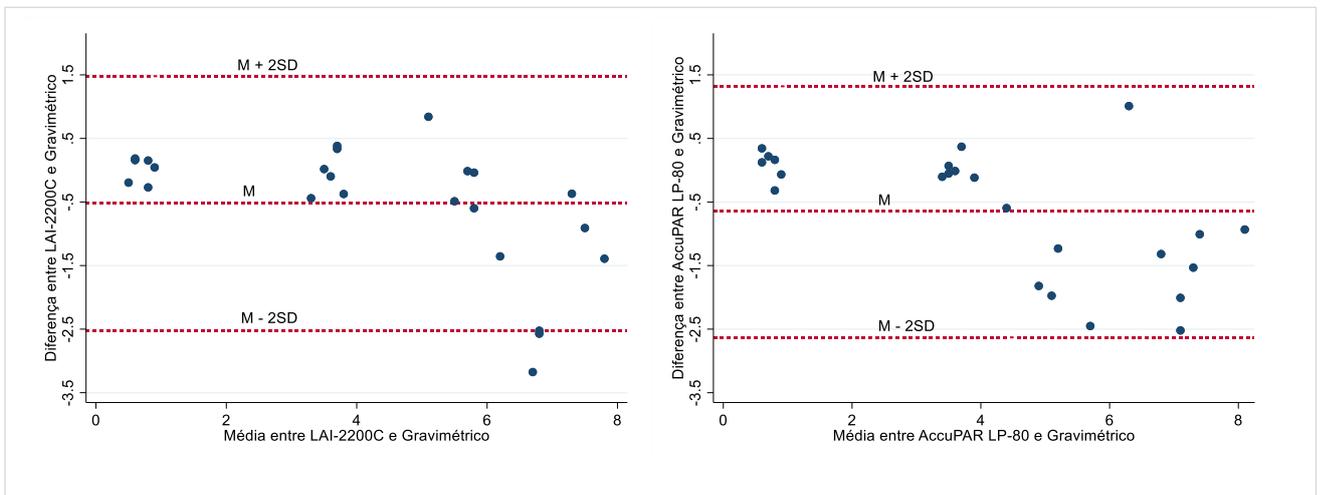


Figura 21: Limites de concordância de medições do IAF no Cultivo Puro de Feijão Nhemba

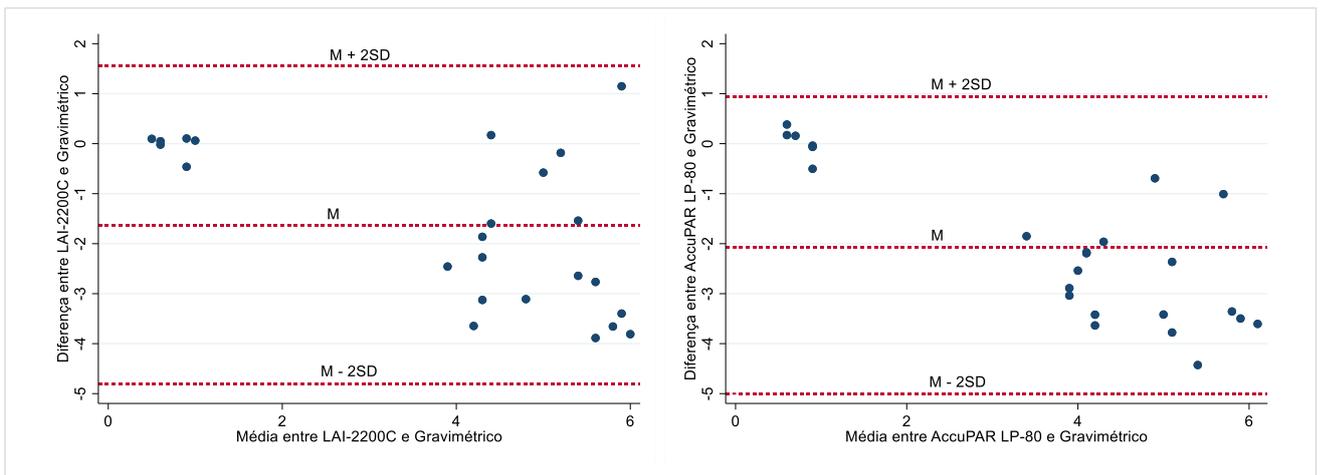


Figura 22: Limites de concordância de medições do IAF no Cultivo Consorciado de Milho e Feijão Nhemba.



Figura 23: (A) Testagem do sistema de rega e (B) limpeza do campo

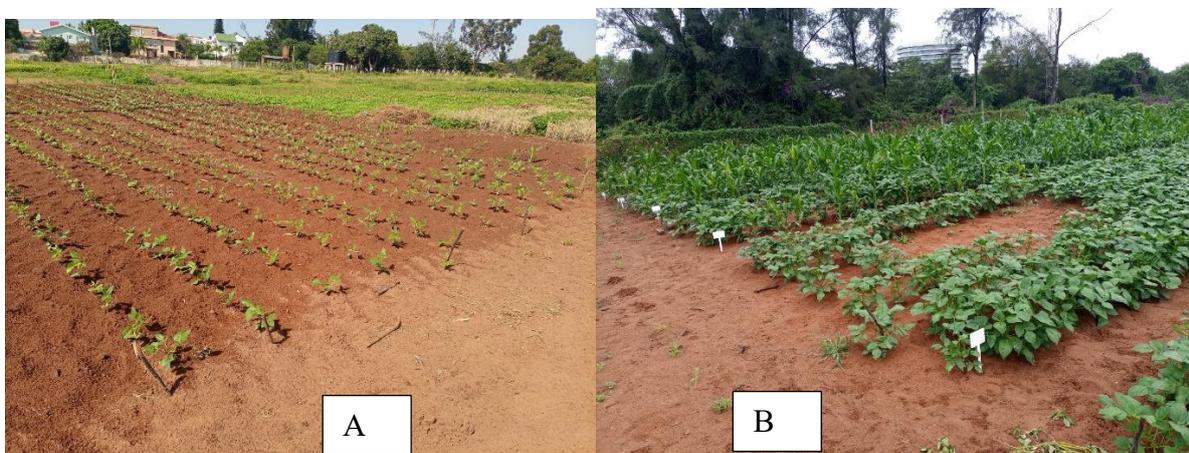


Figura 24: (A) Emergência e (B) estágios iniciais de desenvolvimento das culturas

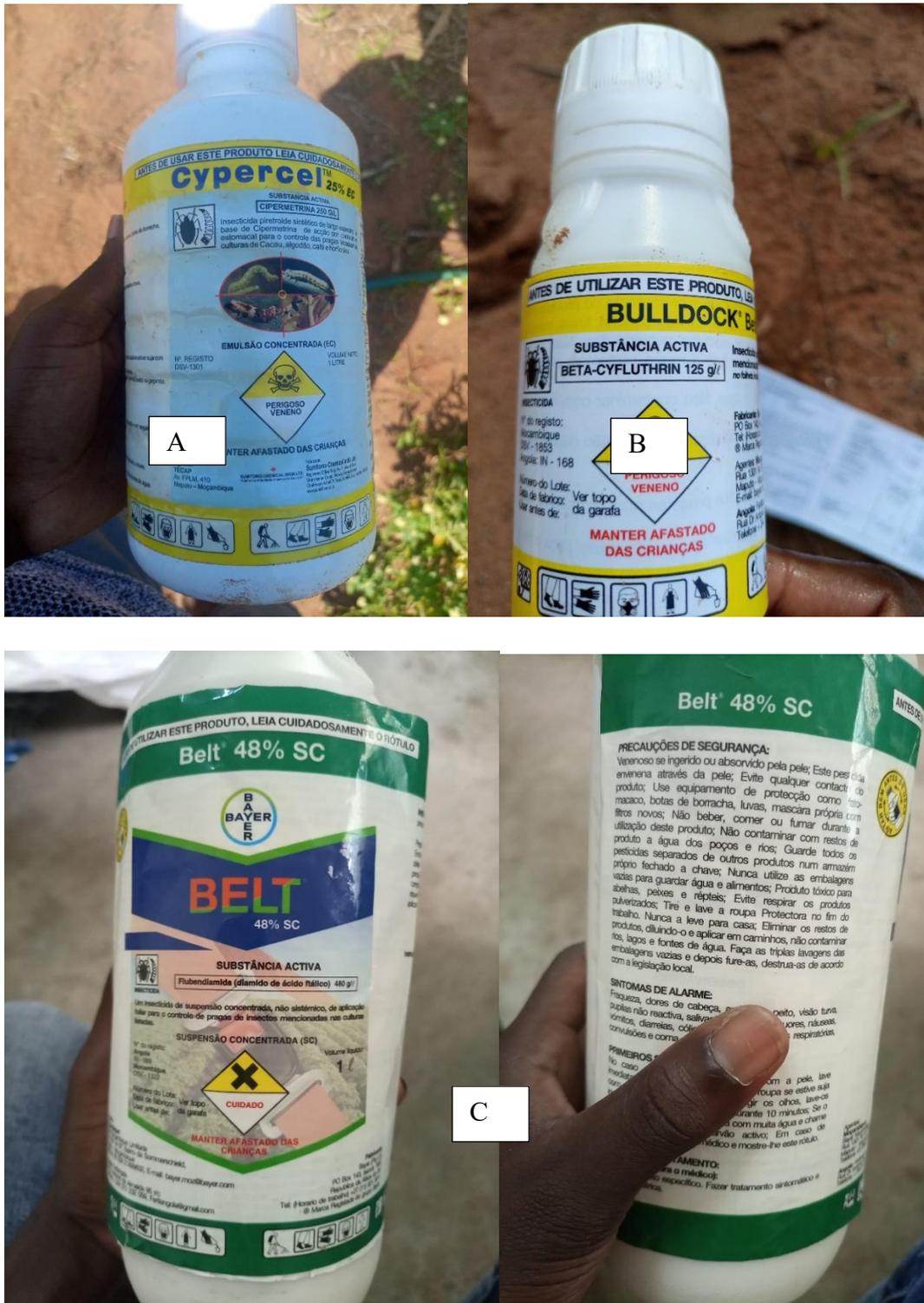


Figura 25: Pesticidas usados, (A) Cipermetrina, (B) Bulldock, (C) Belt



Figura 26: (A) Estágios avançados do desenvolvimento e (B) início de senescência das culturas

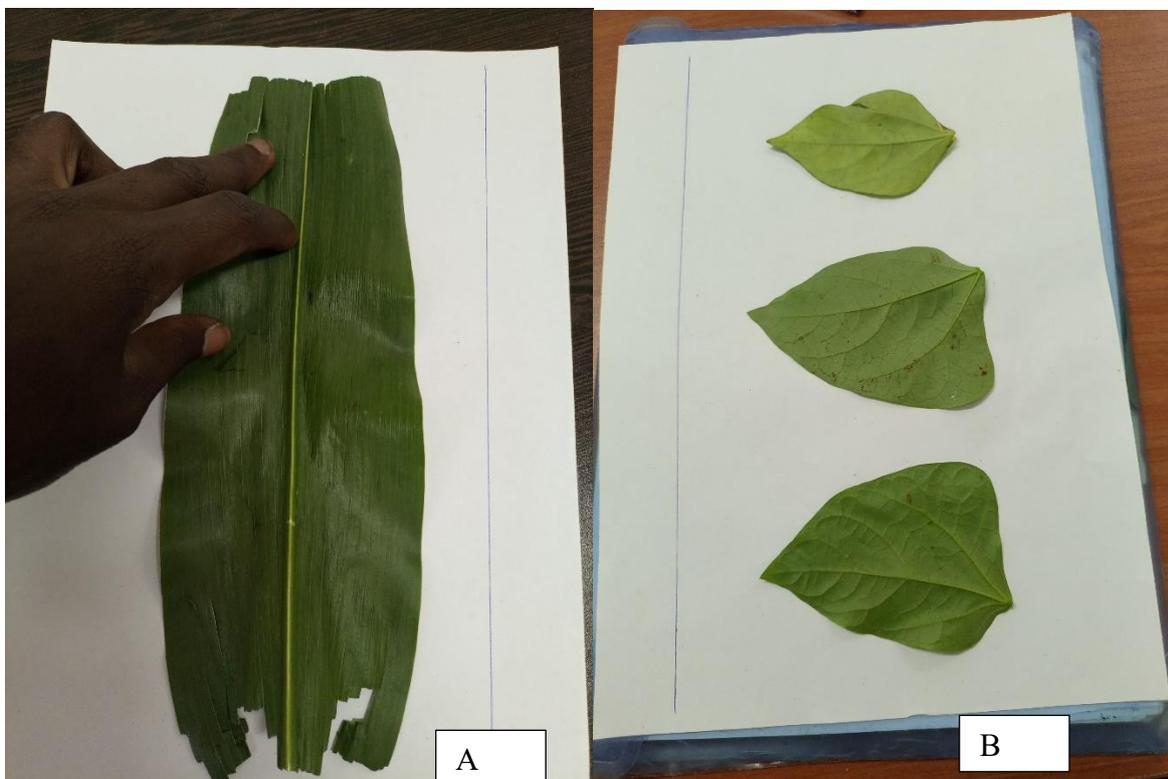


Figura 27: Parte do processo de planimetria para (A) milho e (B) Feijão Nhemba