



Cultivo do cacau no semiárido - um caso expansivo para a agricultura digital

Authors

Thainá Waldburger, Philippe Monney, Thomas Anken, Marianne Cockburn, Audrey Etienne, Jérémie Lecoœur, Marco Brini, Dionys Forster, Hans Jöhr



Impressão

Editora	Agroscope Tänikon 1 8356 Ettenhausen www.agroscope.ch
Informações	Thomas Anken (thomas.anken@agroscope.admin.ch) Philippe Monney (philippe.monney@agroscope.admin.ch)
Autores	Thainna Waldburger, Thomas Anken, Marianne Cockburn, Agroscope, Ettenhausen (CH) Philippe Monney, Agroscope, Conthey (CH) Audrey Etienne, Jérémie Lecoeur, Syngenta, Stein (CH) Marco Brini, EnvEve Sa, Manno (CH) Dionys Forster, Hans Jöhr, Nestlé, Vevey (CH)
Layout	Jacqueline Gabriel
Cover	ENVEVE/AGROSCOPE
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2019
ISSN	2296-729X
ISBN	978-3-906804-88-0



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Federal Department of Economic Affairs,
Education and Research EAER
Agroscope



Good Food, Good Life

AGRONOM  T

ENVEVE^{SA}

syngenta

Apoio:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Innosuisse – Swiss Innovation Agency

Em colaboração com:

csem

Fazenda Ibacem – Juazeiro/Ba (BR)

Agrícola Famosa - Fazenda Macacos - Limoeiro do Norte/Ce (BR)

Fazenda Gabrielli - Ilhéus/Ba (BR)

Fazenda Agrícola Lírio dos Vales – Ilhéus/Ba (BR)

Índice

1	Resumo	5
2	Prefácio	8
3	Introdução	9
4	Descrição do estudo	10
5	Sistema do cultivo do cacau	11
5.1	Status real do cacau cultivado em áreas úmidas.....	11
5.1.1	Sistema de treinamento	11
5.1.2	Heterogeneidade das lavouras	11
5.2	Plantio a pleno sol e biodiversidade em áreas úmidas.....	12
5.3	Quebra-vento	15
5.4	Condições climáticas.....	18
6	Manejo da vegetação	20
6.1	Sensibilidade do cacauzeiro à radiação solar.....	20
6.2	Absorção da luz pelas folhas do cacauzeiro e rendimento com sombreamento	22
6.3	Solo e sistema radicular	24
6.4	Crescimento vegetativo do cacauzeiro	26
6.5	Floração, vingamento e aborto dos frutos.....	29
6.6	Equilíbrio entre crescimento vegetativo e generativo	31
6.6.1	Água e nitrogênio	31
6.7	Necessidade hídrica e irrigação	32
6.7.1	Sensibilidade ao estresse hídrico	32
6.7.2	Necessidade hídrica de acordo com o clima	33
6.7.3	Umidade do solo como ferramenta para a gestão da irrigação	34
6.7.4	Indicadores vegetais como ferramentas para a gestão da irrigação	36
6.7.5	Reação da árvore ao estresse hídrico	37
6.7.6	Excesso de água	38
6.8	Fertilização	39
6.9	Proteção fitossanitária.....	41
6.10	Expectativas de colheitas e rendimento.....	43
7	Sistemas de cultivo futuros para o cacau	45
7.1	Sistemas de cultivo semi-intensivos	45
7.1.1	Treinamento de novas árvores	45
7.1.2	Controle adequado de ramificações	47
7.1.3	Modelos de formação das macieiras	47
7.1.4	Formação do cacauzeiro de acordo com o hábitat de crescimento	48
7.1.5	O desafio da formação principal das árvores.....	49
7.2	O modelo de treinamento da maçã.....	50
7.3	Possíveis futuros designs de plantações e arquiteturas arbóreas.....	52
7.4	Proteção das árvores jovens do excesso de luz solar	55
8	Inovação digital para a geração de conhecimento e apoio à decisão na agricultura.....	57

8.1	Agronomeet – plataforma em nuvem para a agricultura de precisão	57
8.2	Sistemas de sensores – integração de hardware e “sensores humanos”	57
8.3	Dados em tempo real melhoram o apoio à decisão, a gestão e o compartilhamento de conhecimento	59
9	Agradecimentos	61
10	Lista de Figuras	62
11	Lista de Tabelas	65
12	Referências	66

1 Resumo

O cacau é cultivado tradicionalmente em sistemas agroflorestais das regiões tropicais úmidas. Estes sistemas oferecem alta biodiversidade, mas com uma baixa produção, de cerca de 500 quilogramas de amêndoas secas por hectare. Recentemente, o cacau passou a ser cultivado também como monocultura em áreas não sombreadas para aumentar a produtividade. Além disso, houve a tentativa de cultivo inicial em regiões do semiárido. O cultivo bem sucedido nestas regiões seria benéfico especificamente para redução do estresse por doença e permitiria a expansão da área de cultivo. Para entender melhor estes sistemas, conduzimos experimentos em quatro lavouras de cacau sem sombreamento no sistema de monocultura. Duas destas lavouras estavam localizadas na zona do semiárido, e as outras duas em zona subtropical. A equipe estudou o comportamento do cacau nestas regiões e, com base nos fundamentos obtidos, fez recomendações para a otimização do seu cultivo e manejo. Os resultados demonstram que o cultivo de cacau como monocultura a pleno sol nas regiões do semiárido é possível e resulta em um alto rendimento, de até 3.000 quilogramas de amêndoas seca por hectare. Este rendimento foi obtido em plantações com 1200 árvores por hectare. Na comparação entre as cinco variedades (BN34, CCN51, Cepec 2002, PS1319 e Salobrinho 03), a CCN51 e Salobrinho 03, de crescimento vigoroso, obtiveram os maiores rendimentos. O clima seco evitou a proliferação da maioria das doenças fúngicas. Descobrimos apenas os fungos patogênicos *Lasiodiplodia theobromae* e *Ceratocystis Fimbriata*.

O cacau possui características fisiológicas específicas. A planta abre seus estômatos no nascer do sol e os fecha quando o sol se põe. Durante o dia, a planta tem dificuldade para regular a evaporação. Como consequência, um fornecimento de água suficiente é essencial. O crescimento da planta fica estagnado durante o desenvolvimento de novas folhas (lançamentos), pois durante esta fase, os assimilados são necessários para os novos lançamentos. Enquanto isso, a transpiração aumenta e pode levar ao estresse hídrico. A camada de cera (cutícula) ainda insuficientemente desenvolvida e os estômatos causam este aumento na evaporação. O caule começa a se desenvolver apenas depois que as folhas jovens se desenvolvem, estas folhas deixam de ser um escoadouro de assimilados e passam a ser uma fonte. Como os frutos crescem no caule, concluímos que a produção de frutos é reduzida durante o desenvolvimento de novas folhas e que esta falta de assimilados representa uma causa importante de perda de frutos, o que tem papel vital na produtividade. Portanto, é importante fornecer nutrientes suficientes durante a fase inicial do desenvolvimento do fruto, mas sem estimular o desenvolvimento de novas folhas com um alto teor de nitrogênio.

As folhas totalmente desenvolvidas já atingem seu máximo potencial fotossintético com uma taxa de radiação solar de $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Portanto, o sombreamento do cacau não diminui a taxa fotossintética. O sombreamento com sombrite (30% de absorção luminosa) reduz, no entanto, o consumo de água em cerca de 30%, enquanto produz um aumento do rendimento de 20%.

Além disso, observamos que as raízes do cacau se adaptam bem à irrigação por gotejamento e a solos rasos através do desenvolvimento de sistemas radiculares rasos (de até 25 cm de profundidade) sem desenvolver a raiz pivotante.

Dendrômetros, os quais registram a expansão e encolhimento diários, bem como o crescimento do diâmetro caulinar, exibem de maneira confiável o aparecimento de novos lançamentos foliares e do estresse hídrico (encolhimento intenso do diâmetro caulinar). A dendrometria é adequada para o registro dos ciclos de crescimento e refinamento do manejo hídrico do cacau.

O modelo vegetal recém-desenvolvido «CocoaFlo» permite a modelagem do comportamento vegetal. Este modelo concede, por exemplo, demonstrar que a densidade vegetal de 2000 árvores por hectare é ideal com os porta-enxertos e variedades disponíveis atualmente. Portanto, o CocoaFlo oferece a opção de facilitar o desenvolvimento ainda maior dos sistemas de cultivo do cacau.

Ainda é alto o potencial para melhorias nos sistemas de cultivo do cacau. Melhores porta-enxertos para a produção de material vegetal homogêneo, assim como arquiteturas padronizadas representam as maiores alavancas para o aumento da produção através da otimização da proteção fitossanitária e da redução da carga de trabalho durante a poda e colheita.

Zusammenfassung

Traditionell wird Kakao in den feuchten Tropen in Agroforstsystemen angebaut. Diese bieten eine hohe Biodiversität, führen jedoch zu geringen Erträgen von zirka 500 Kilogramm trockener Bohnen pro Hektare. Um die Produktivität zu optimieren, wird Kakao seit kurzem auch als unbeschattete Reinkultur angebaut. Weiter gibt es erste Anbauversuche in semiariden Gebieten. Gelingt der Anbau in diesen Regionen, hätte dies Vorteile im Hinblick auf einen reduzierten Krankheitsdruck und würde es ermöglichen, die Anbauflächen auszudehnen. Um diese Systeme besser zu verstehen, wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes Feldversuche auf vier brasilianischen, unbeschatteten Kakaoplantagen in Reinkultur durchgeführt. Zwei der Plantagen befanden sich in einer semiariden Zone, während die anderen beiden Plantagen in einer subtropischen Zone lagen. Das Team untersuchte das Verhalten der Kakaopflanze in diesen Regionen und leitete anhand der gewonnenen Grundlagen Empfehlungen zur Optimierung des Anbaus und Managements ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Anbau von Kakao als Reinkultur in semiariden Gebieten möglich ist und hohe Erträge von bis zu 3000 Kilogramm trockener Bohnen pro Hektare ermöglicht. Diese Erträge wurden in Anlagen mit 1200 Bäumen pro Hektare erzielt. Im Vergleich der fünf Sorten BN34, CCN51, Cepec 2002, PS1319 und Salobrinho 03 erzielten die starkwüchsigen Typen Salobrinho 03 und CCN51 die höchsten Erträge. Das trockene Klima verhinderte die Ausbreitung der meisten Pilzkrankungen. Einzig das Auftreten der Pilzerreger *Lasiodiplodia theobromae* und *Ceratocystis fimbriata* konnte beobachtet werden.

Physiologisch gesehen weist die Kakaopflanze einige Besonderheiten auf. Die Pflanze öffnet die Stomata bei Sonnenaufgang und schliesst sie bei Sonnenuntergang. Tagsüber kann die Pflanze die Verdunstung daher nur geringfügig regulieren. Deshalb ist eine gute Wasserversorgung essentiell. Während des Neuaustriebs junger Triebe und Blätter (Flush) stagniert das Wachstum der Pflanze, da die Assimilate in dieser Phase in die Entwicklung junger Blätter fließen. Währenddessen erhöht sich die Transpiration der Pflanze und kann zu einem erhöhten Wasserstress führen. Die verstärkte Verdunstung wird auf die unvollständig ausgebildete Wachsschicht und Spaltöffnungen zurückgeführt. Erst nachdem sich die jungen Blätter von einer Assimilatsenke zu einer Assimilatquelle weiterentwickeln, wächst der Stamm wieder weiter. Da die Früchte am Stamm wachsen, wird davon ausgegangen, dass während des Austriebs junger Blätter, auch die Versorgung der Früchte reduziert ist und eine wichtige Ursache des Fruchtfalls darstellt. Dies spielt für die Ertragsbildung eine zentrale Rolle. Während der Anfangsphase der Fruchtbildung ist es von Bedeutung die Pflanzen gut zu versorgen, aber die Bildung neuer Blätter nicht durch hohe Stickstoffdüngung anzuregen. Da ausgewachsene Blätter schon bei einer Sonnenstrahlung von etwa $400 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ihr maximales Photosynthese Potential ausschöpfen, reduziert eine leichte Beschattung die Photosyntheserate nicht. Eine Beschattung mit Netzen (30 % Lichtabsorption) reduziert jedoch den Wasserverbrauch um rund 30 % bei Mehrererträgen von über 20 %. Darüber hinaus konnten wir aufzeigen, dass sich die Kakaopflanze gut an Tröpfchenbewässerung und flachgründige Böden anpassen kann. Sie bildet dann ein flaches Wurzelsystem (maximal 25 cm Tiefe) ohne Pfahlwurzel aus.

Dendrometer, die das tägliche Quellen-Schrumpfen sowie das Wachstum des Stammdurchmessers erfassen, zeigten die Erscheinung von Neuaustrieben oder Wasserstress (starke Schrumpfung des Stammdurchmessers) zuverlässig an. Dendrometrie eignet sich bei Kakaobäumen also gut, um die Wachstumszyklen zu erfassen oder das Bewässerungsmanagement zu verfeinern.

Das neu erstellte Pflanzenmodell «CocoaFlo» ermöglicht die Modellierung des Pflanzenverhaltens. Damit lässt sich beispielsweise aufzeigen, dass mit den aktuell vorhandenen Unterlagen und Sorten maximale Pflanzdichten von 2000 Bäumen pro Hektare optimal sind. CocoaFlo bietet somit die Möglichkeit, die weitere Entwicklung der Kakaoanbausysteme effizient zu unterstützen.

Das Potential für weitere Verbesserungen der Anbausysteme wird als hoch eingeschätzt. Verbesserte Unterlagen zur Erzielung von homogenem Pflanzmaterial sowie einheitliche Architekturen sind die wichtigsten Hebel um die Erträge zu steigern, den Pflanzenschutz zu verbessern und den grossen Arbeitsaufwand für Schnitt und Ernte zu vermindern.

Abstract

Traditionally Cocoa is cultivated in agroforestry systems in the humid tropics. These offer high levels of biodiversity, but lead to minor crop yields of roughly 500 kilograms of dry beans per hectare. In order to improve productivity, Cocoa has recently also been cultivated as an unshaded monoculture. Further, there have been initial cultivation attempts in semi-arid regions. The successful cultivation in these regions would be beneficial with specific regard to reduced disease stress and would allow for an extension of the cultivation area. To better understand these systems, we carried out field trials on four unshaded Cocoa monoculture plantations. Two of these plantations were located in a semi-arid zone, while the other two plantations were located in a subtropical zone. The team studied the behaviour of the Cocoa plant in these regions and, based on the attained foundations, derived recommendations for an optimised cultivation and management.

The results demonstrate that the cultivation of Cocoa as a full sun monoculture in semi-arid regions is possible and enables high yields of up to 3000 kilograms of dry beans per hectare. These yields were achieved in plantations with 1200 trees per hectare. In comparison of the five varieties BN34, CCN51, Cepec 2002, PS1319 and Salobrinho 03, the vigorously growing Salobrinho 03 and CCN51 achieved the highest yields. The dry climate prevented the proliferation of most fungus diseases. We only discovered the fungi pathogens *Lasiodiplodia theobromae* and *Ceratocystis Fimbriata*.

The Cocoa plant has specific physiological characteristics. The plant opens its stomata's at sunrise and closes them at sunset. The plant can hardly regulate evaporation during the day. Consequently, sufficient water supply is essential. The plants growth stagnates during the development of new shoots and leaves (flush), because during this phase assimilates are required for the development of young leaves. In the meantime, the plants transpiration increases and may lead to water stress. The insufficiently developed wax layer (cuticle) and stomata cause this increased evaporation. The stem only starts developing after the young leaves have developed from an assimilate sink to an assimilate source. Due to the fruits growing on the stem, we conclude that the supply of the fruits is reduced during the development of young leaves, and that this lack in assimilates presents an important cause of fruit loss, which plays a vital role in yield productivity. It is therefore significant to provide a sufficient nutrient supply during the initial phase of fruit building, but not to encourage the development of new leaves by high nitrogen input.

Fully developed leaves already reach their maximal photosynthesis potential at solar radiations of $400 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, therefore, the light shading of Cocoa plants does not decrease the photosynthesis rate. Shading Cocoa plants with nets (30 % light absorption) does however reduce the water consumption by about 30 %, whilst yields increase by 20 %.

Furthermore, we found that Cocoa roots adapted well to drip irrigation and to shallow soils by developing shallow rooting systems (up to 25 cm depth) without building a taproot.

Dendrometers, which record the daily swelling, and shrinkage, as well as the growth of the stem diameter, reliably display the appearance of new flushes and water stress (strong shrinkage of the stem diameter). Dendrometry is well suited to record growth cycles and refine water management of Cocoa plants.

The newly developed plant model «CocoaFlo» allows the modelling of plant behaviour. This, as an example, enables displaying that plant densities of 2000 trees per hectare are ideal with the currently available rootstocks and varieties. CocoaFlo therefore offers the option to facilitate the further development of Cocoa plantation systems.

The potential for further improvement of plantation systems remains high. Better rootstocks for the production of homogenous plant material as well as standardized architectures present the most important levers for increasing yields, by improving plant protection and reducing the workload during pruning and harvest.

2 Prefácio

Por coincidência, em 2013, Hans Jöhr (diretor corporativo do setor de agricultura da Nestlé) se encontrou com Bernard Lehmann (diretor do departamento federal de agricultura) e Paul Steffen (chefe de pesquisa corporativa e chefe do Instituto de Ciências da Sustentabilidade, Agroscope) na Costa do Marfim durante um encontro internacional. Eles discutiram a situação desesperadora das fazendas de cacau e, durante uma visita de campo organizada de maneira espontânea, perceberam que o sistema de plantio suíço (Niederstamm), altamente sofisticado, poderia ser utilizado como um modelo para o cacau. Paralelamente, a Nestlé e a Syngenta já haviam cooperado em diversos projetos para melhorar os sistemas de cultivo do cacau. Para trazer uma mudança real, a Nestlé decidiu aprender mais sobre a biologia e características agronômicas do cacau. Quando soube sobre os avanços e experiências tecnológicas da EnvEve e discutindo com a Innosuisse, Hans Jöhr percebeu que já era hora de pensar "fora da caixa" com relação a esta cultura completamente "esquecida" e começar a levar o know-how suíço para fazendas e fazendeiros no resto do mundo. Ele percebeu que trabalhando com os especialistas tradicionais, ele provavelmente continuaria a ter "mais do mesmo" e sem conseguir identificar ideias e novos conceitos científicos. Com o convite à CSEM para o consórcio, a decisão foi a de seguir uma "abordagem interdisciplinar de um novo campo" para a seguinte pergunta central: "Podemos garantir o fornecimento sustentável dos sistemas de cultivo de cacau com base na expertise de cultivo de frutíferas da Agroscope (Niederstamm) e em outras tecnologias inovadoras?" Durante este processo, que começou em outubro de 2013, os especialistas em agronomia e tecnologia do consórcio se encontraram regularmente e gradualmente se tornaram uma equipe, apresentando desafios e novas ideias. Este projeto é o resultado de vários meses de colaboração intensiva, e contou com investimentos significativos de todos os seus parceiros.

O projeto Intensificação sustentável dos sistemas de cultivo agrícolas apoiados pelas soluções Smart Swiss ICT-AGRI foi conduzido em parceria com empresas privadas, fazendas, o departamento federal de agricultura e foi cofinanciado pela Agência de Inovação Suíça.

3 Introdução

Este projeto se deu como um programa de parceria público-privada de P&D, cofinanciado pela Innosuisse, a Agência Suíça de Inovação, pois o "chocolate suíço", um dos produtos suíços mais apreciados, depende fortemente do fornecimento de seu principal ingrediente: o cacau. A Suíça é um dos países mais importantes para o comércio do cacau. Estima-se que o setor cacauero gere um retorno em impostos de mais de 100 milhões de CHF (francos suíços) por ano. A Suíça produz cerca de 180.000.000 kg de chocolate, 60% para exportação, 24% para a Alemanha (Anonym, 2014). Além disso, a indústria suíça de chocolate emprega cerca de 4500 pessoas.

Um bom chocolate começa com boas matérias primas. Estas matérias primas têm alta procura e sua disponibilidade é variável. Lavouras de cacau antigas e práticas de cultivo precárias resultam em baixos rendimentos e baixa produtividade total. As práticas agrícolas atuais podem ser adequadas para sistemas de produção extensivos, mas não respondem mais ao novo contexto econômico. Uma relação direta com os fazendeiros aumenta a confiança e a lealdade. Além disso, o trabalho em conjunto com os fazendeiros de cacau traz novas percepções sobre o sistema de produção agrícola e cria oportunidades para orientações sobre suas práticas de cultivo e processos pós-colheita, visando aumentar a produtividade e reduzir perdas. Portanto, são necessários grandes esforços para tornar a produção de cacau economicamente viável. Atualmente, a produtividade dos sistemas de produção de cacau com 350 a 550 kg/ha permanece baixa, embora rendimentos de 3000 kg/ha ou mais possam ser alcançados.

Dada a alta dependência de um fornecimento confiável e sustentável de cacau de qualidade para as indústrias de chocolates suíços, este projeto tem como objetivos: (i) explorar novas regiões geográficas para a produção de cacau, (ii) desenvolver novos sistemas de produção de cacau, e (iii) apoiar a transformação da produção tradicional de cacau em sistemas de produção avançados e viáveis economicamente. Em vez de produzir cacau nos trópicos úmidos, o cultivo de cacau em regiões semiáridas abre novas oportunidades para produtores em países como o Brasil. Por um lado, o cultivo de cacau em regiões semiáridas pode reduzir o risco de doenças como a provocada pelo fungo *Crinipellis perniciosa* (vassoura de bruxa) mas, por outro, o clima seco exige um manejo bem adaptado. Entretanto, a produtividade e a eficiência do trabalho no manejo do cacau oferecem uma ampla gama de potenciais para melhorias. Comparado aos sistemas de produção de maçãs, que se desenvolveu fortemente nas últimas décadas, o cacau ainda é cultivado como era há 50 anos.

Para obter uma produção eficiente em regiões semiáridas, é essencial entender melhor a fisiologia da planta. Neste manual, pretendemos fornecer o conhecimento básico para ajudar a melhorar os sistemas de produção de cacau. Além disso, este manual pode trazer novas perspectivas para os produtores de regiões úmidas, pois contém diversas ideias e sugestões para a melhoria dos sistemas de cultivo de cacau em termos de rendimento, eficiência de trabalho, proteção fitossanitária e estratégias de irrigação.

4 Descrição do estudo

O projeto foi desenvolvido em colaboração com quatro fazendas no Brasil, duas localizadas em região de semiárido, onde os experimentos principais foram conduzidos. Nosso objetivo foi verificar o desenvolvimento do cultivo do cacauero em uma área seca demais para as práticas de lavoura tradicionais. Um segundo local em região tropical, usado tradicionalmente para lavouras de cacauero, foi usado como referência (Figura 1). A fazenda Ibacem, em Juazeiro (Bahia), foi escolhida como local principal para os experimentos devido às lavouras de cacau existentes e à disponibilidade de água (Rio São Francisco). As fazendas em Limoeiro do Norte (Ceará) e em Ilhéus (Bahia) foram usadas para a coleta de dados climáticos e, posteriormente, para um experimento de densidade.

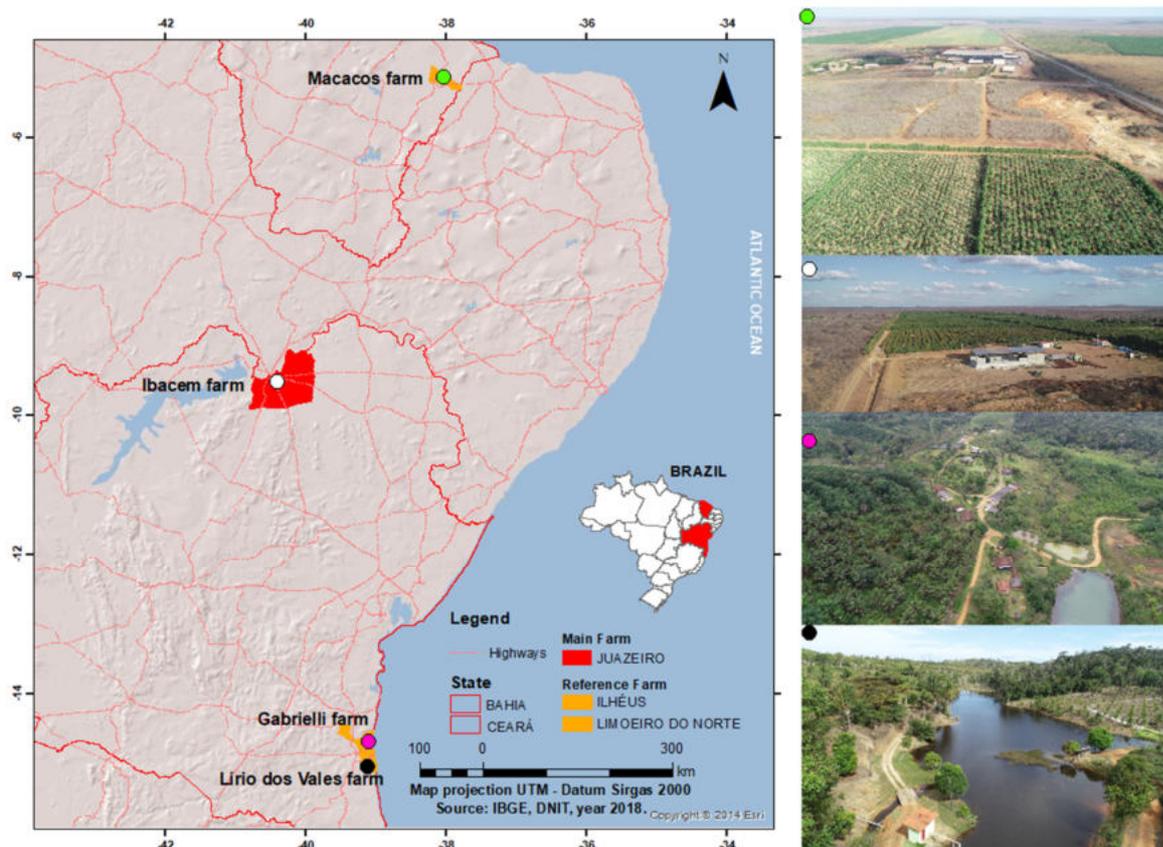


Figura 1: Localização das fazendas no Brasil. A localização de cada fazenda está indicada por pontos coloridos no mapa (à esquerda), correspondendo aos pontos coloridos nas fotos (à direita).

Os experimentos de campo aconteceram de 2016 - 2018, e os seguintes parâmetros foram investigados no experimento principal em Juazeiro:

Clones: Cinco cultivares diferentes de cacau (BN34, CCN51, Cepec 2002, PS1319 e Salobrinho 03) foram comparados em relação a:

- área foliar
- número de frutos por árvore
- diâmetro caulinar
- floração e lançamentos de folhas
- rendimento em amêndoa seca

Microclima: Dois blocos do clone CCN51 foram cobertos com sombrite (absorvendo 30% da radiação) e protegidos por quebra-ventos para medir a influência do sol e do vento.

Irrigação: Três parcelas com os clones CCN51, BN34 e PS1319 foram equipadas com um sistema de irrigação semiautomático. Isto permitiu o manejo da irrigação através de sensores de umidade do solo e válvulas automatizadas. A ideia deste experimento foi determinar a quantidade necessária de água na irrigação.

Experimento de estresse: Para testar a sensibilidade do cacauzeiro ao estresse hídrico, as parcelas foram isoladas e o comportamento do diâmetro caulinar foi avaliado em função da quantidade de água aplicada. O diâmetro caulinar e as observações de aspectos fisiológicos das plantas permitiram a quantificação dos níveis de estresse.

Densidade vegetal: Ao final do projeto, um experimento de densidade foi instalado em três fazendas (Juazeiro, Ilhéus e Limoeiro do Norte). As plantas foram produzidas no viveiro de uma das fazendas e distribuídas às outras. O objetivo era aumentar a produtividade por unidade de área. A densidade vegetal padrão fica em torno de 1200 árvores/ha. Como a arquitetura arbórea é heterogênea nas lavouras atuais, esperamos que uma arquitetura regular permita densidades acima de 2000 árvores/ha. Este experimento ainda está em andamento.

Os dados obtidos nos experimentos de campo foram usados para expandir o conhecimento atual sobre fisiologia e comportamento vegetal, particularmente em relação às diferenças climáticas regionais.

5 Sistema do cultivo do cacau

Ao contrário de outros sistemas de cultivo de frutíferas, o cacau ainda é cultivado da mesma maneira há décadas. Um dos objetivos deste projeto foi investigar os sistemas de cultivo atuais do cacau e apontar possíveis melhorias.

5.1 Status real do cacau cultivado em áreas úmidas

Atualmente, o cacau é plantado com uma densidade de cerca de 500-1000 árvores/ha. A baixa densidade de plantio leva ao desenvolvimento de árvores grandes, criando lavouras difíceis de manejar, associadas a uma alta carga de trabalho e a uma longa fase de estabelecimento, caracterizada por baixos rendimentos. Lavouras de frutíferas frequentemente usam densidades de plantio mais altas e árvores menores com arquiteturas homogêneas. Há potencial para aumento da eficiência das lavouras de cacau com a adaptação destes sistemas.

5.1.1 Sistema de treinamento

As lavouras mais recentes em pleno sol são, geralmente, baseadas no mesmo modelo, com uma densidade média de 1200 árvores/ha e 4-5 ramos de estrutura primária em formação aberta, como descrito no capítulo 7. Desenvolvimentos futuros podem seguir a experiência de sistemas de cultivo de maçã de alta densidade, que variam de 2000-3000 árvores/ha. Estes sistemas se baseiam em uma formação de tronco único. Entretanto, devido ao vigor relativamente alto dos porta-enxertos de cacau e da necessidade de manutenção de um alto número de ramos primários frutificando por hectare sem exceder uma densidade de plantio que afetaria automaticamente o controle sobre o vigor das plantas, árvores com dois troncos principais poderiam ser uma opção interessante (consultar Capítulo 7.3).

5.1.2 Heterogeneidade das lavouras

Se o manejo, fatores ambientais e genótipos não forem monitorados profissionalmente, as lavouras podem se tornar muito heterogêneas, o que é refletido em um baixo rendimento/ha. A Figura 2 apresenta e explica exemplos de lavouras heterogêneas.

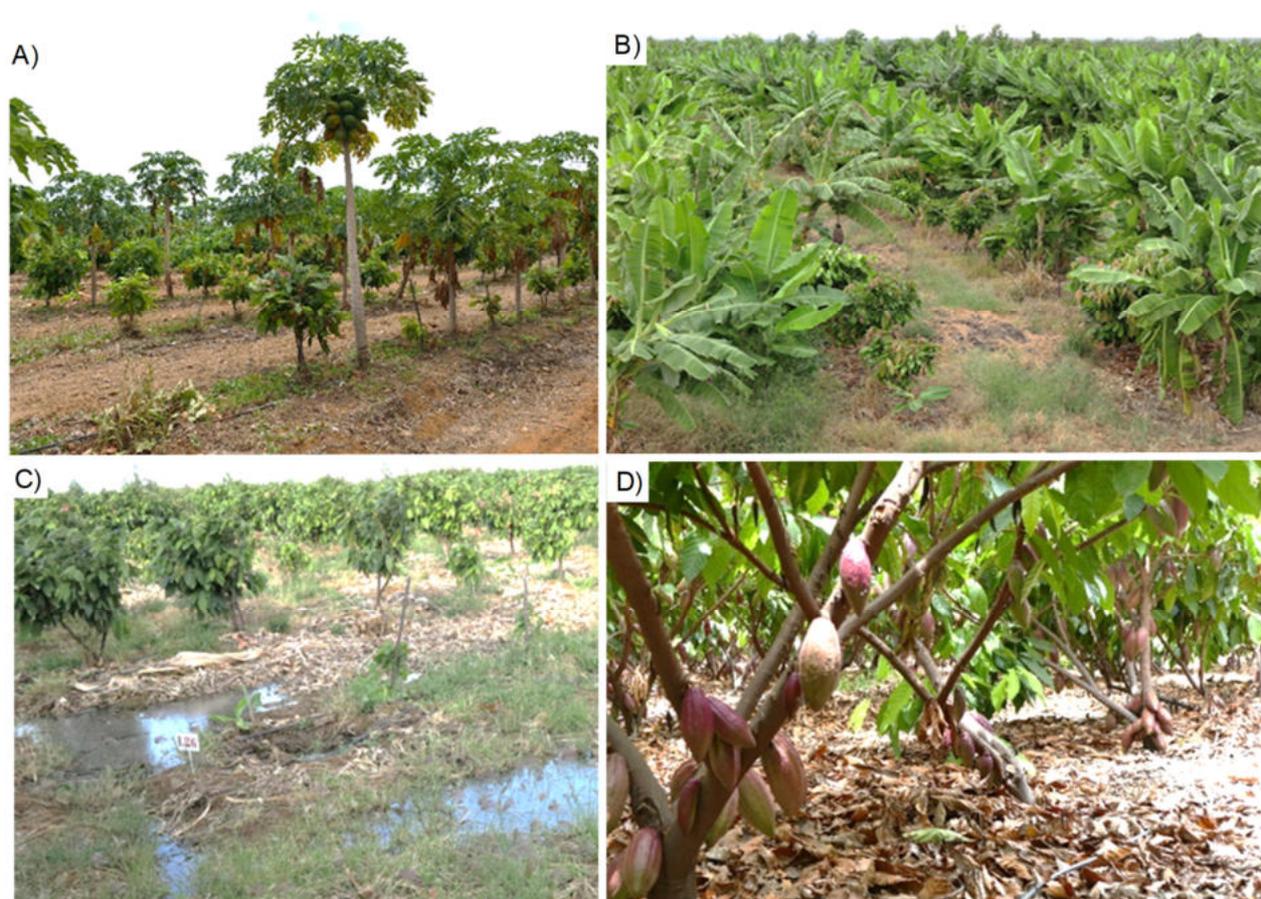


Figura 2: Falta de homogeneidade dentro das lavouras de cacau depende do manejo da lavoura, fatores ambientais (luz, microclima) e genótipos. As fotos mostram:
 A) Falta de cuidado com a plantação e sombreamento insuficiente, que é essencial durante os 2 primeiros anos da fase de estabelecimento da lavoura.
 B) Competição por nutrientes, água e luz por bananeiras que são usadas para o sombreamento afetando a homogeneidade das lavouras, particularmente quando a densidade de bananeiras não é controlada ou quando as bananeiras são mantidas por um período além do razoável.
 C) Em condições semiáridas, a irrigação é essencial. Conseqüentemente, irrigação em excesso é frequente, o que causa empochamentos, principalmente em solos compactados, onde a irrigação deve ser manejada de maneira precisa.
 D) Poda de formação inadequada leva ao desenvolvimento de copas desbalanceadas ou assimétricas. A árvore no primeiro plano mostra bastante vigor e uma estrutura relativamente bem balanceada, enquanto que suas duas vizinhas à direita tendem a tombar pela ausência de estruturas primárias em um dos lados.

5.2 Plantio a pleno sol e biodiversidade em áreas úmidas

As chamadas áreas de pleno sol, que são monoculturas sem árvores para o sombreamento, são cada vez mais comuns nas áreas úmidas. O objetivo da retirada das árvores de sombreamento é simplificar e melhorar o sistema de produção e aumentar os rendimentos. Estes sistemas já são bem implementados na prática. Comparados aos 500 kg de amêndoas secas por hectare por ano nos sistemas sombreados, os sistemas não sombreados atingem rendimentos médios de até 3000 kg. Etienne e Lecoer (2019) observaram rendimentos de até 6000 kg/ha (Figura 3). Ahenkorah et al. (1987) demonstraram que o rendimento aumenta assim que as árvores de sombreamento são removidas, considerando o manejo adequado de insumos. Estudo dos rendimentos em diferentes países revela que praticamente todos os países estão atingindo baixos rendimentos. Para manter um nível alto de rendimento, Alvim (1977) sugere adaptar a fertilização, irrigação e tratamento de pragas para a produção de maior intensidade.

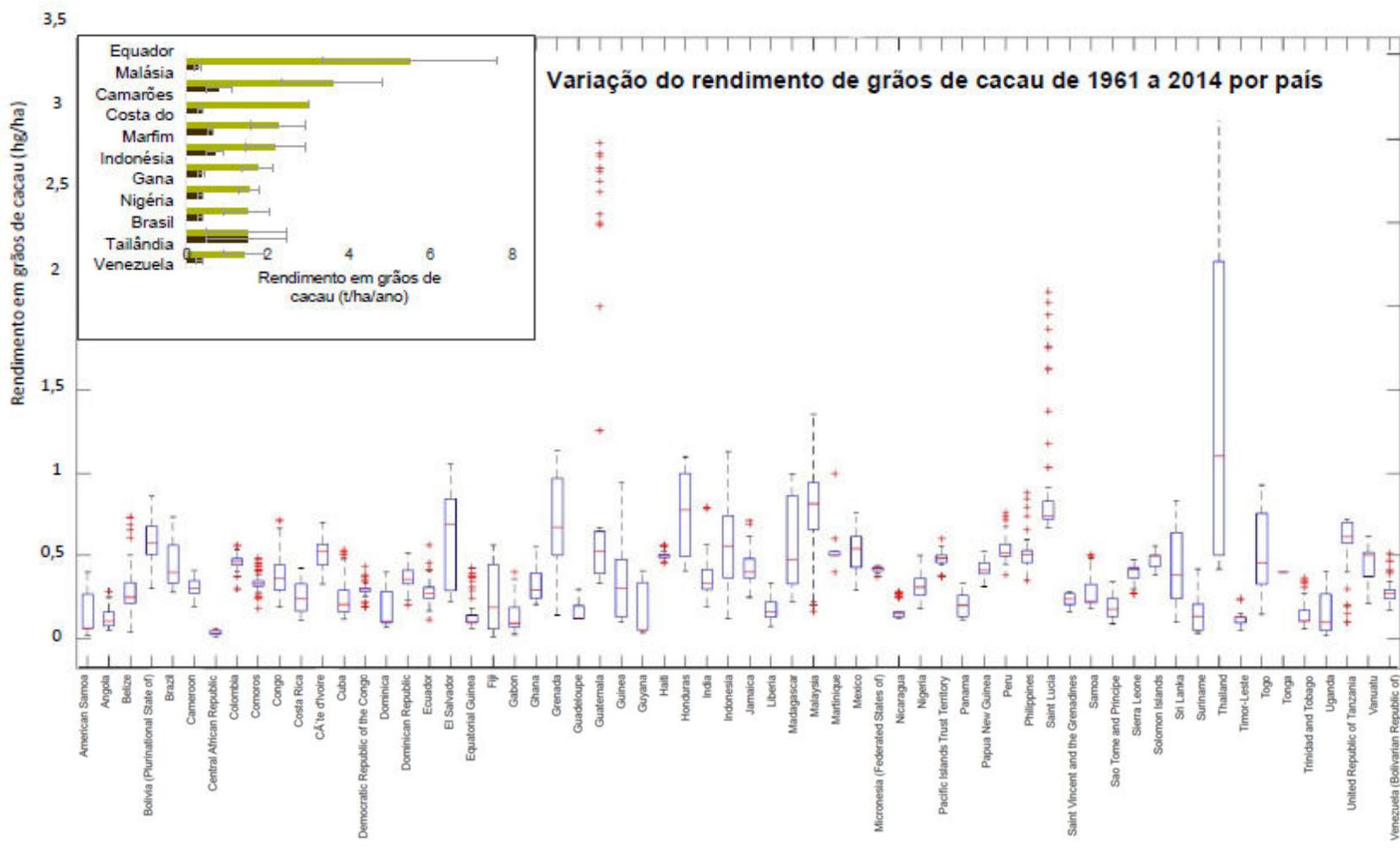


Figura 3 A): Média \pm DP do rendimento em amêndoa seca de cacau entre 1961 e 2014 (barras pretas) e média \pm PD de rendimento potencial técnico observado (barras verdes) para 10 países usados para validação do modelo. B): Localização e variabilidade de rendimento de 1961 a 2014 para os 1200 pontos de dados coletados da literatura (Etienne and Lecoeur 2019).

É natural que áreas sombreadas com baixa densidade de cacauzeiros, que representam os sistemas de cultivo extensivo (agroflorestal), tenham maiores níveis de biodiversidade (Figura 4 e Figura 5). Entretanto, como árvores não-nativas são, por vezes, usadas para o sombreamento, os sistemas de cultivo de cacau extensivos também podem alterar significativamente os ecossistemas existentes. Do nosso ponto de vista, a manutenção da alta biodiversidade não exclui os sistemas de cultivo intensivo, mas eles precisam ser bem planejados e incorporados ao ambiente. Sistemas de produção futuros podem separar a produção de cacau e a manutenção da biodiversidade, como é o caso para outros sistemas de produção, como de pradarias ou maçãs.

Comparados ao cacau, que é normalmente cultivado da mesma maneira há 50 anos, sistemas de cultivo de maçã se desenvolveram fortemente durante as últimas décadas. Sistemas de produção extensiva marcados por grandes árvores foram convertidos a sistemas bastante intensivos, resultando em uma lucratividade muito maior (Hakim et al. 2014). Estes sistemas de cultivo de maçã serviram como exemplo para a intensificação do sistema de produção de cacau nas regiões semiáridas.



Figura 4: Lavoura de cacau a pleno sol no sul da Bahia.



Figura 5: Sistema tradicional de cultivo do cacau (Cabruca) com árvores de sombreamento no sul da Bahia.

5.3 Quebra-vento

O cacau precisa ser protegido do vento, pois suas folhas são muito sensíveis e têm uma alta taxa de evaporação (consulte 6.7.1). Silva Neto et al. (2001) mostram que ventos com velocidades acima de 2,5 m/s têm efeito negativo sobre o cacau, tais como: aumento da evapotranspiração, queima das folhas, em alguns casos, levando à queda, particularmente de folhas jovens que ainda são muito finas. Quando expostos a ventos fortes, a forma e desenvolvimento da árvore ficam comprometidos. Projetos adequados de quebra-vento que protegem o cacau são, portanto, essenciais para a produção bem sucedida e foram descritos recentemente por Owen-Turner (2006). A Tabela 1 mostra a redução da velocidade do vento em diversas distâncias a barlavento, que devem ser adaptadas a cada lavoura. No Brasil, o eucalipto é normalmente usado para formar os quebra-ventos. Embora eles cresçam bem, eles levam mais de dois anos para proporcionar a proteção adequada para o cacau (6 metros). Além disso, essas árvores precisam ser bem irrigadas e fertilizadas para estabelecer o quebra-vento rapidamente (Figura 6). Para evitar este atraso, a bananeira pode ser usada como proteção temporária.

Tabela 1: Redução da velocidade do vento em área abrigada em diversas distâncias a barlavento e sotavento de cortinas de abrigo com diferentes densidades ópticas no meio-oeste dos EUA. As reduções são expressas como porcentagem da velocidade do vento em campo aberto. Assume-se a velocidade do vento em campo aberto como sendo menor que 10 metros por segundo, e a distância do quebra-vento é expressa em termos de um múltiplo da altura do quebra-vento (H) (Brandle et al. 2014).

Tipo de quebra-vento	Densidade óptica [%]	Porcentagem da velocidade do vento em campo aberto em								
		Barlavento			Sotavento					
		-25H	-3H	-1H	5H	10H	15H	20H	25H	30H
Decídua em fileira	25-30	100	97	85	50	65	80	85	95	100
Conífera em fileira	40-60	100	96	84	30	50	75	75	85	95
Conífera em múltiplas	60-80	100	91	75	25	35	85	85	90	95
Parede sólida	100	100	95	70	25	70	95	95	100	100



Figura 6: Quebra-ventos estabelecidos por eucalipto.

Efeito do vento nos dosséis

Para avaliar o impacto do vento na área foliar em uma parcela com a variedade Cepec 2002, uma em cada dez folhas foram coletadas no campo experimental de Juazeiro. A remoção das folhas foi conduzida em diferentes alturas e orientações das copas das árvores para obter uma amostra representativa de 75 folhas de 10 árvores por tratamento em

- I. área protegida do vento (< 25 m de distância do quebra-vento)
- II. área exposta

De cada amostra, tomamos a área foliar à partir de imagens de alta resolução usando um software de edição de imagens (GIMP v 2.8). Examinamos, em média, 72,3 e 102,1 cm²/folha de folhas danificadas (Figura 7) e protegidas (Figura 8), respectivamente, representando uma perda de 29% para as árvores na área não-protegida.



Figura 7: Folhas danificadas pelo vento em uma área não protegida (à esquerda). As folhas estão praticamente intactas na área protegida por um quebra-vento alto de eucaliptos (à direita).

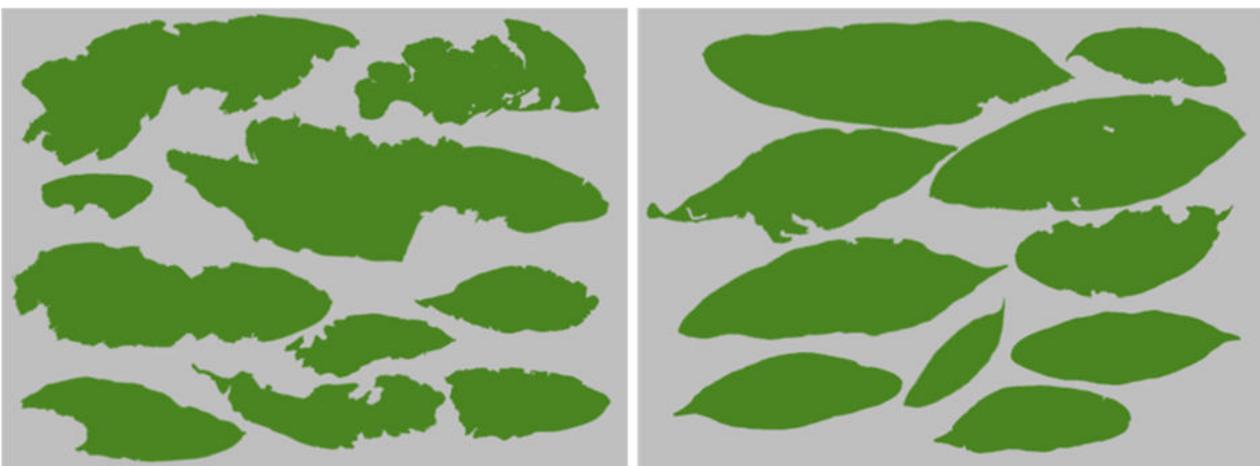


Figura 8: Amostra de folhas danificadas pelo vento na área não protegida (à esquerda). As folhas estão praticamente intactas na área protegida (à direita).

5.4 Condições climáticas

O cacau é cultivado tradicionalmente no sub-bosque de áreas tropicais úmidas. Estas áreas são caracterizadas por temperaturas moderadas, acima de 21 °C, umidade do ar em torno de 70% e taxa de precipitação entre 1200 e 3000 mm/ano (Götz et al. 2016). Entretanto, mesmo nestas condições, as alterações climáticas causam longos períodos de seca, o que leva alguns fazendeiros a instalar sistemas de irrigação para períodos críticos. Nas regiões semiáridas, a irrigação (geralmente por sistemas de gotejamento) é obrigatória e usada durante, pelo menos, 8-9 meses. A Figura 9 demonstra a precipitação mensal na região semiárida de Petrolina e na região úmida de Ilhéus. Na fazenda de Juazeiro (60 km de Petrolina), o nível de precipitação era baixo, em particular durante o período de chuvas com precipitação limitada (- 40%).

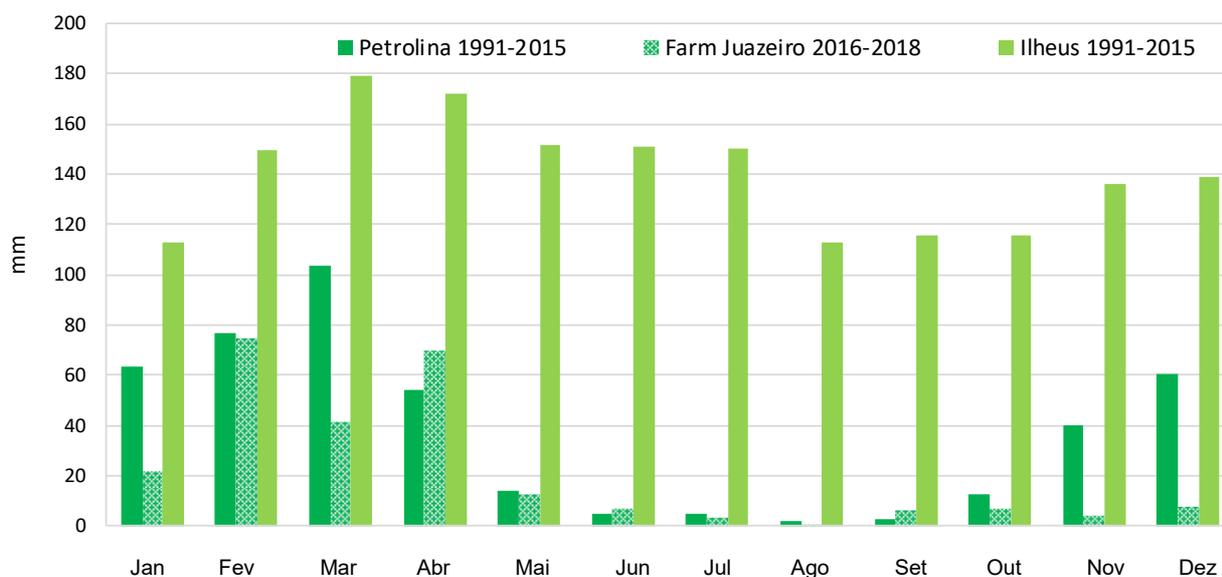


Figura 9: Precipitação mensal na região semiárida de Petrolina, na fazenda Juazeiro (medidas próprias) e na região úmida de Ilhéus (Anonym, 2019).

Nossos experimentos na região semiárida tiveram como objetivo entender como o cacau se comporta neste clima tão distinto, que é marcado por níveis mínimos de precipitação, baixa umidade do ar e altas temperaturas. Sabe-se que os processos fisiológicos do cacau são inibidos por baixas temperaturas, mas foram descritas influências positivas no crescimento caulinar e do fruto em altas temperaturas, particularmente durante as estações mais quentes (Hardy 1960).

Para comparar os climas úmido e semiárido, a evapotranspiração média (ET_0) é um parâmetro de referência útil (Pereira et al. 2006, Allen et al. 1998). A ET_0 expressa a quantidade de água, em milímetros, evaporadas por dia (igual a litros por metro quadrado por dia). Os parâmetros considerados incluem temperatura do ar, radiação, umidade do ar e velocidade do vento, que foram medidos por estações meteorológicas. Com uma ET_0 média de cerca de 4,5 mm/dia na Ibacem – Juazeiro- BA, as plantas são expostas a estresses climáticos muito maiores durante o ano todo em comparação com as condições em Ilhéus (área tradicional de cultivo de cacau), com uma ET_0 média de 2,6 mm/dia em 2017 (Figura 10).

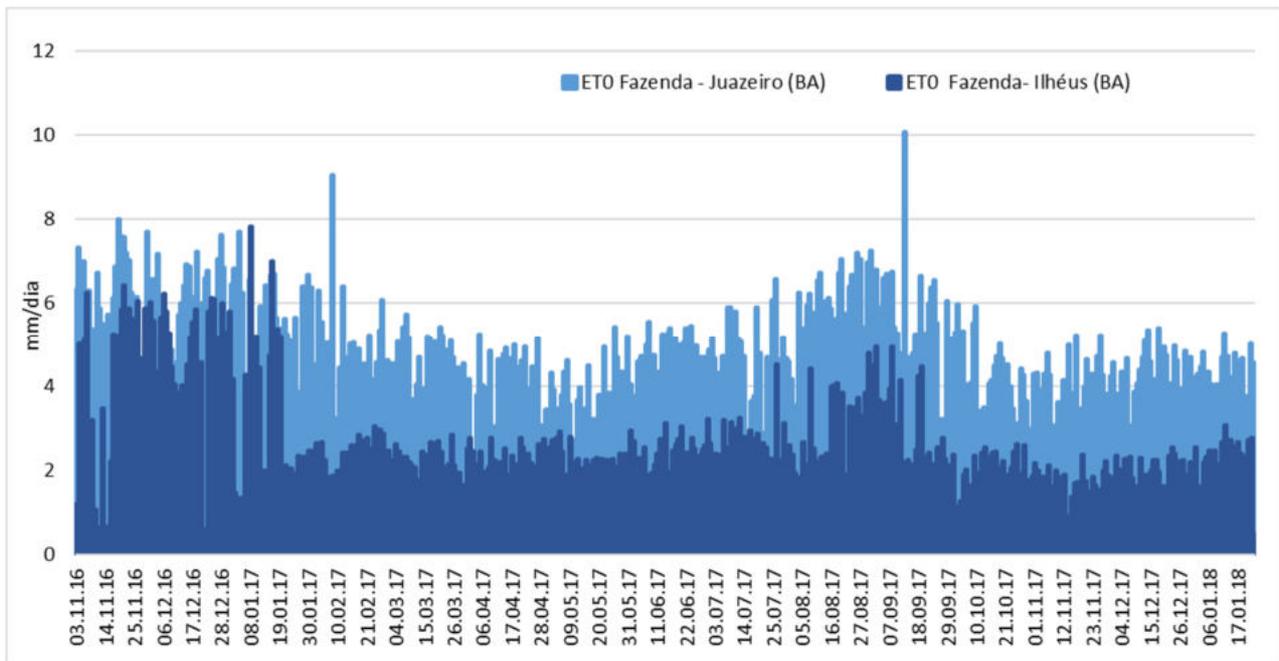


Figura 10: ET_0 da região semiárida em Juazeiro e na região úmida de Ilhéus de 2016 a 2018.

O clima seco combinado às altas temperaturas da região semiárida de Ibacem evita a proliferação de doenças causadas por fungos, sendo esta uma das grandes vantagens do clima semiárido. Comparado às regiões tradicionais de cultivo de cacau, o clima semiárido é marcado por altas temperaturas e baixa umidade do ar, o que resulta em maiores taxas de evapotranspiração de referência (Figura 11).

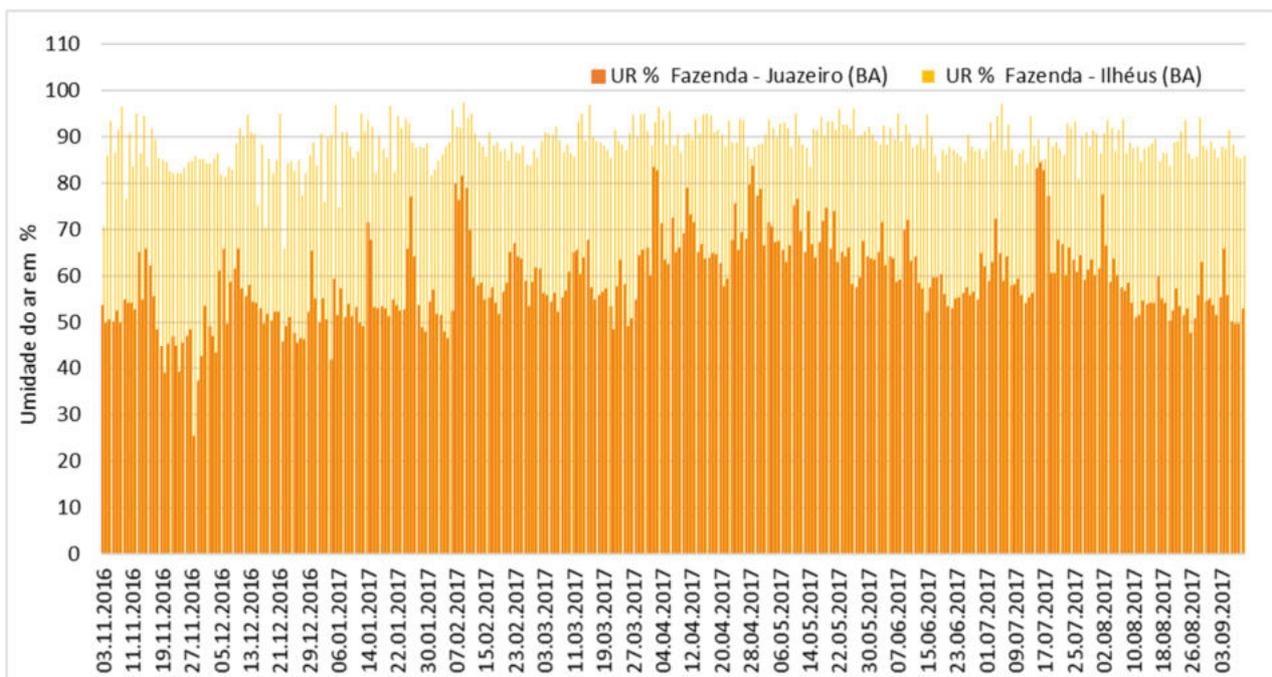


Figura 11: Umidade do ar diária média da fazenda em Juazeiro e da fazenda em Ilhéus entre novembro de 2016 e outubro de 2017.

6 Manejo da vegetação

As características particulares do cacau, como a alta sensibilidade à luz e baixa capacidade de regulação hídrica, fazem com que a compreensão do manejo desta planta seja essencial.

6.1 Sensibilidade do cacauero à radiação solar

As folhas do cacauero expostas à luz solar direta podem sofrer queimaduras de sol e, conseqüentemente, diminuir a fotossíntese (Figura 12). Em sistemas não sombreados, estas folhas atuam no sombreamento, ajudando a proteger as folhas e os frutos subjacentes de queimaduras.



Figura 12: Folhas da primeira camada são queimadas rapidamente pelo sol. Os frutos também são muito sensíveis à radiação solar direta, que pode danificá-los, e atuam como sombreamento das próprias árvores.

A sensibilidade do cacauero à luz solar direta foi estudada em um experimento em Juazeiro em que parcelas não sombreadas foram comparadas a parcelas protegidas por sombrite com capacidade de absorção de 30% da radiação (Figura 13). As árvores foram equipadas com dendrômetros para medir continuamente as variações do diâmetro caulinar (consulte 6.7.4). As variações no raio caulinar podem ser separadas em expansão irreversível do caule, induzida pelo crescimento e retração assim como expansão reversível do caule, induzida por déficit hídrico (Zweifel et al. 2016). A principal causa de déficit hídrico é a demanda evaporativa (Figura 14A) e B)). Observamos que as árvores em áreas não sombreadas sofreram maiores déficits hídricos que as em áreas sombreadas. Isto se deve ao fato de que a ET_0 é cerca de 30% menor na sombra, resultando em menos evapotranspiração pelas folhas. Esta diferença entre áreas sombreadas e a pleno sol pode explicar o aumento no crescimento vegetativo e no vingamento dos frutos (Figura 15) e o maior rendimento observado nas áreas sombreadas/de quebra-vento (Figura 16). As plantas em áreas sombreadas mostraram melhor desenvolvimento, menor necessidade hídrica e maiores rendimentos. Se assumirmos um rendimento de 3000 kg/ha de cacau e preço de 1,2 dólares/kg, um aumento de 20% no rendimento anual representaria uma renda adicional de 720 dólares/ano. Entretanto, esta renda adicional não cobre o custo do sombrite.



Figura 13: Cacaueiros protegidos por sombrite com capacidade de absorção de 30% da luz solar.

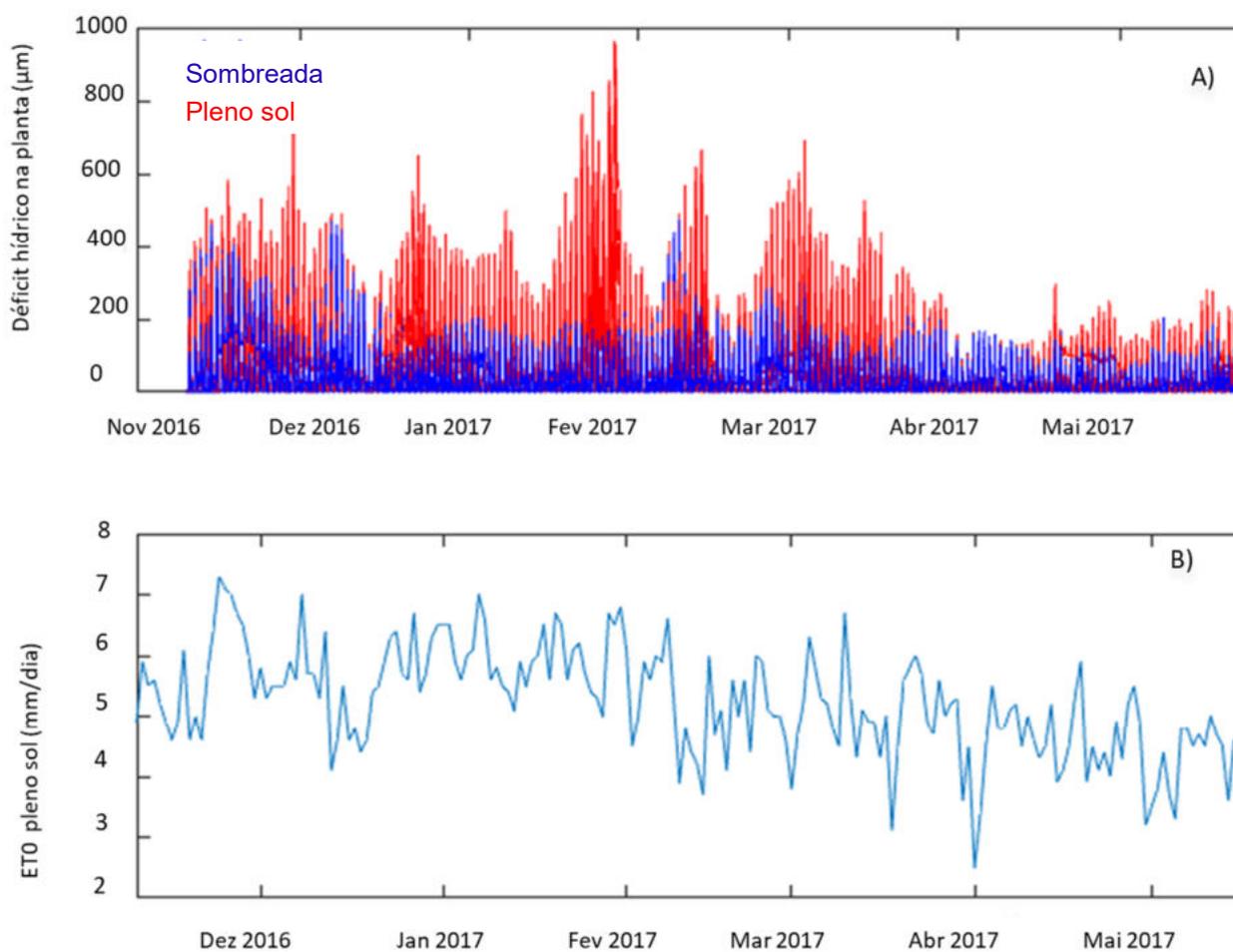


Figura 14: A) Déficit hídrico da planta (μm) em áreas sombreadas e não sombreadas (pleno sol), calculado a partir dos dados do dendrômetro, de acordo com Zweifel et al. 2016. B) ET_0 medida em parcelas a pleno sol (mm/dia) em Juazeiro, Bahia, BR.

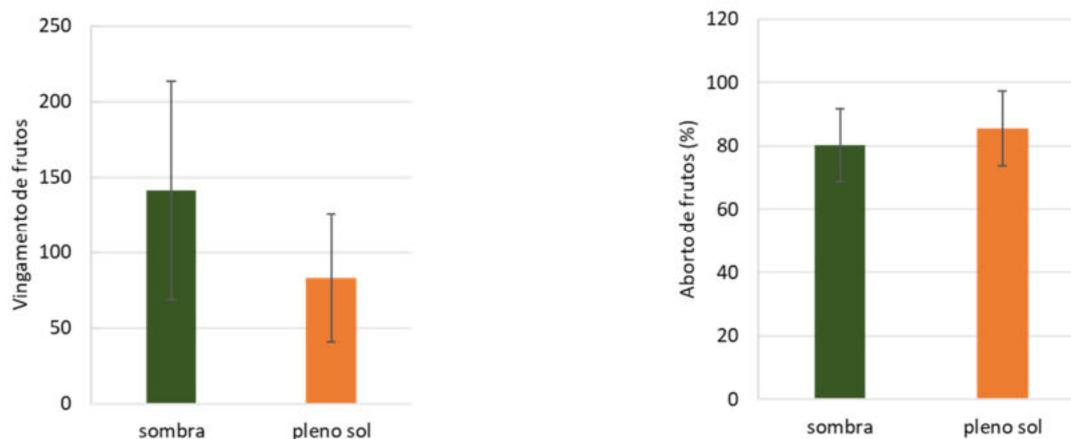


Figura 15: Árvores em áreas sombreadas tiveram maiores taxas de vingamento que a pleno sol.

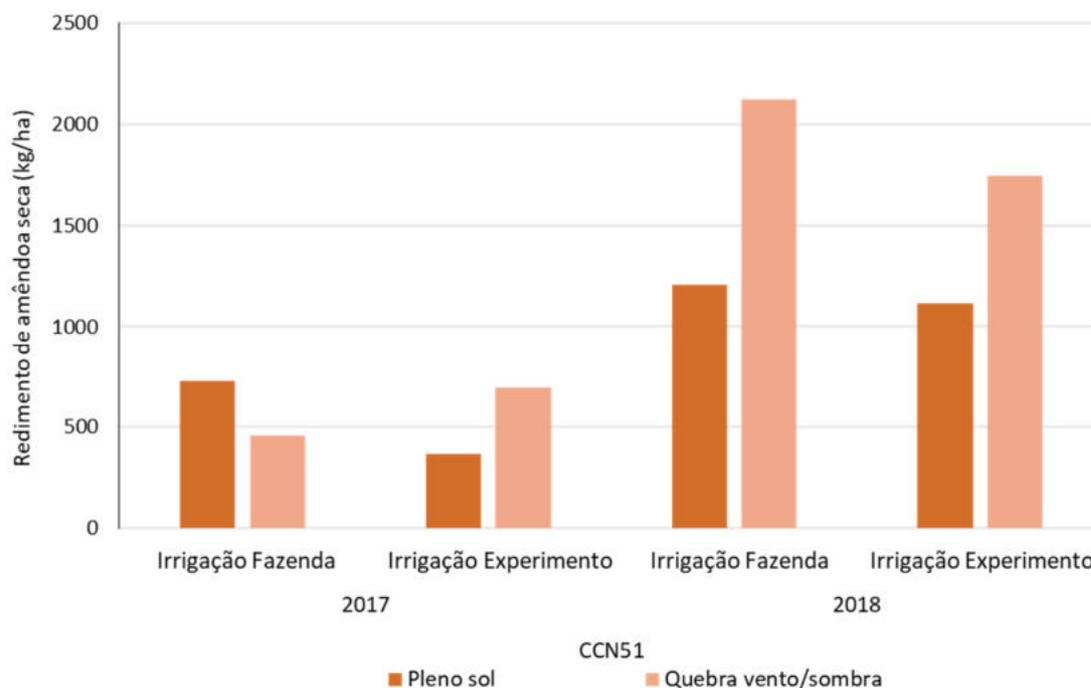


Figura 16: Rendimento em amêndoa seca de áreas não sombreadas (pleno sol) contra áreas sombreadas e protegidas do vento (Quebra-vento/sombreamento) em Juazeiro para as principais colheitas de 2017 e 2018.

6.2 Absorção da luz pelas folhas do cacauieiro e rendimento com sombreamento

A curva de resposta da fotossíntese à luz foi determinada em folhas de quatro idades diferentes, desde o lançamento até o desenvolvimento completo (Figura 17). As medidas foram tomadas usando um analisador de gases Licor LI-6400 em cacauieiros de dois anos de idade do cultivar CCN51, cultivados em estufar.

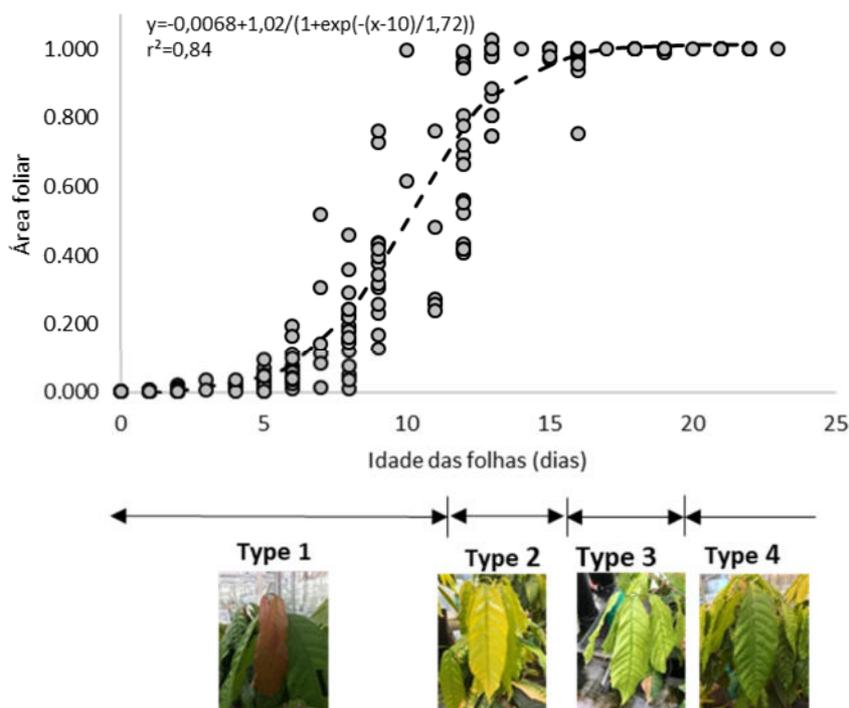


Figura 17: Evolução da área foliar do cacaueteiro desde o lançamento até o desenvolvimento completo. De acordo com seu estágio de desenvolvimento, as folhas podem ser classificadas em quatro tipos.

Folhas jovens do tipo 1 e 2 (Figura 17) não são capazes de realizar fotossíntese e têm uma taxa fotossintética líquida negativa devido ao consumo de carbono pela respiração (escoadouro). Já as folhas completamente desenvolvidas de tipo 3 e 4 têm um balanço de carbono positivo (fonte) (Figura 18). Estes resultados mostram que as folhas do cacaueteiro mudam de escoadouro para fonte cerca de 15 dias depois da emergência. Folhas adultas atingem sua taxa máxima de fotossíntese em aproximadamente $400 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Figura 18), enquanto em outras plantas, como as macieiras, a taxa máxima de fotossíntese fica em torno de $600 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (Campbell *et al.* 1992).

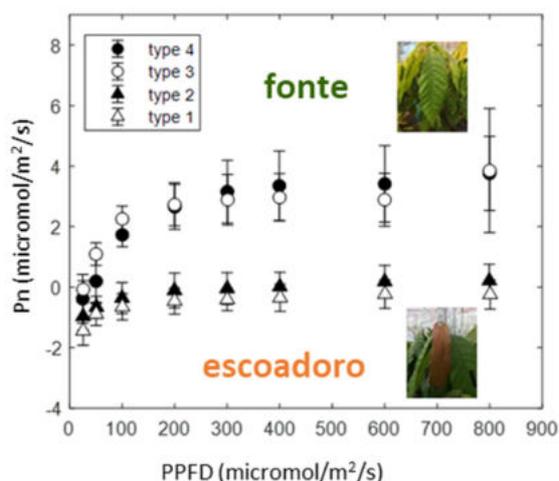


Figura 18: Curva de resposta da fotossíntese à luz de quatro tipos diferentes de folhas de cacaueteiro cultivado em estufa. Tipo 1 = recém lançadas - tipo 4 = totalmente desenvolvida (ver Figura 17).

Estes resultados demonstram que o sombreamento não diminui o potencial fotossintético. Um sombreamento moderado de cerca de 20% possibilita produção máxima (Figura 19), com necessidade hídrica reduzida devido ao menor déficit hídrico na planta (Figura 14).

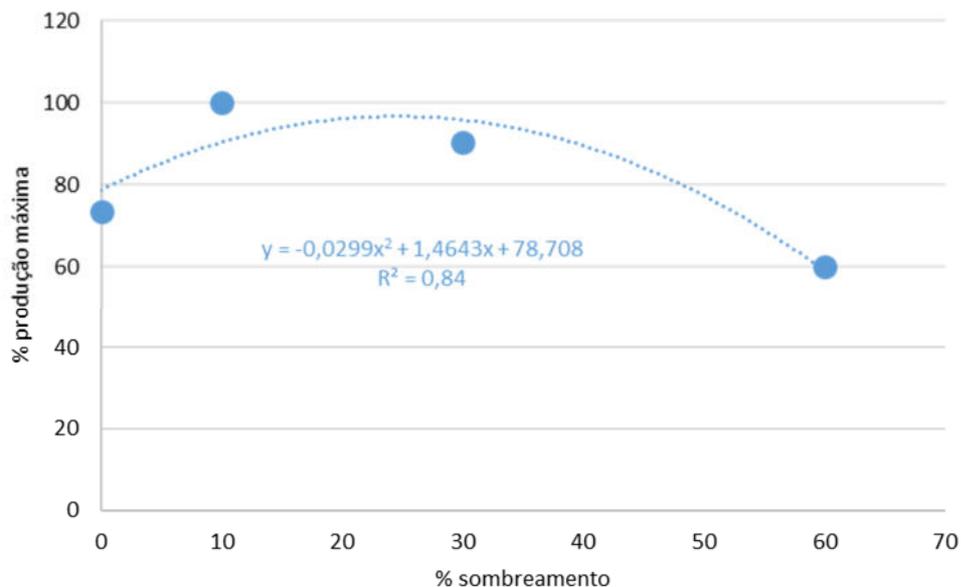


Figura 19: Efeito previsto do nível de sombreamento na produção da lavoura de cacau (Cálculo feito com o modelo de cultivo “Cocoa Flo”, E. Audrey, Syngenta).

6.3 Solo e sistema radicular

No experimento principal em Juazeiro, o solo era médio arenoso com cerca de 15% de argila, 15% de silte, 70% de areia e 1,5% de matéria orgânica. Devido à forte lixiviação da argila da superfície para a camada inferior, abaixo de 30 cm, o solo estava muito compactado e exibia permeabilidade extremamente baixa nesta camada (Figura 20). Observações de campo mostraram que a água empoçada permanece nesta camada sem se infiltrar para o subsolo por dias. Apesar disso, os cacauzeiros são capazes de se adaptar a estas condições.

O cacau teve um bom desempenho com irrigação por gotejamento em solo raso sem formar raiz pivotante, mostrando a flexibilidade do sistema radicular da planta (Figura 20 e Figura 21). Os perfis de solo nas áreas experimentais em Juazeiro mostraram que, devido ao alto compactamento do subsolo, praticamente todas as raízes se concentravam nos primeiros 25 cm. Este sistema radicular é marcado por um sistema de irrigação por gotejamento com duas linhas de gotejamento por fileira de árvores. Todas as raízes finas se concentravam abaixo das linhas de gotejamento. Isto corrobora Alvim (1977), que demonstrou que “80 % das raízes absorventes de cacau são encontradas nos primeiros 20 cm de solo”. Portanto, no planejamento da irrigação, a quantidade de água nos primeiros 20 cm de solo é essencial.

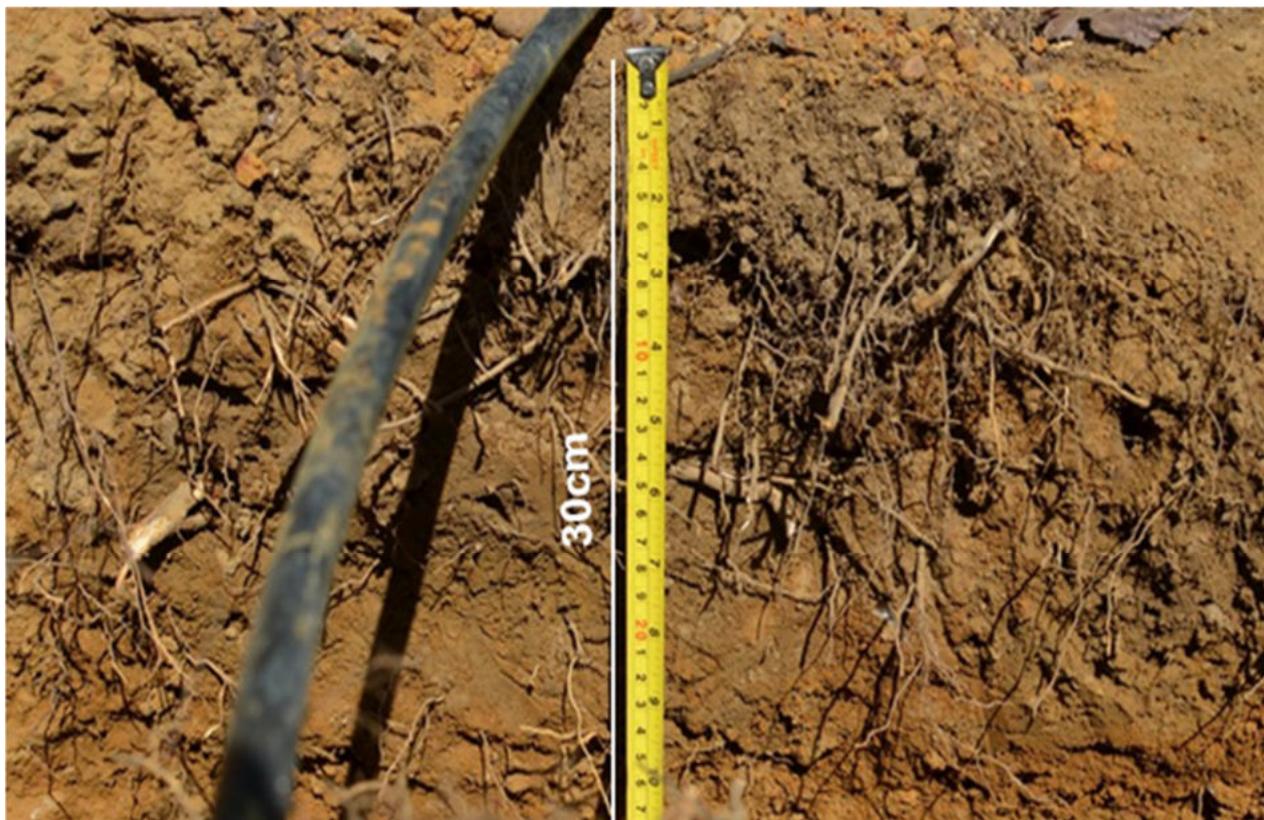


Figura 20: Perfil de solo em Juazeiro. O crescimento radicular fica concentrado nos primeiros 20 cm. Quase não são encontradas raízes abaixo de 30 cm.



Figura 21: A irrigação por gotejamento determina a formação de raízes finas, que são encontradas apenas sob as linhas de gotejamento. A formação de uma raiz pivotante é inibida pela compactação do subsolo.

6.4 Crescimento vegetativo do cacaueteiro

Os lançamentos foliares foram determinados visualmente em 54 árvores em Juazeiro. Estas árvores, do cultivar CCN51, estavam equipadas com dendrômetros (Figura 22), que mediram a variação e crescimento do diâmetro caulinar.

Os dendrômetros são úteis para o monitoramento detalhado do crescimento da planta. Graças à sua alta sensibilidade, eles podem ser usados para analisar as fases de dilatação e encolhimento sucessivas durante um ciclo de 24 horas. Eles têm uma resolução de alguns micrômetros (μm) e as alterações em escala diária são de cerca de 100-200 μm (de até 500 μm).



Figura 22: Dendrômetro medindo a variação do diâmetro caulinar de um ramo principal da árvore.

A Figura 23 mostra uma curva típica do dendrômetro ao longo de um período de 4 dias com as fases alternadas de encolhimento, desde o início da manhã até o final da tarde, e de dilatação, desde o final da tarde até a manhã seguinte. O encolhimento diário (ED) reflete a intensidade do estresse hídrico, enquanto que as fases do final da tarde e da noite, respectivamente, caracterizam a recuperação (o balanço entre o consumo de água e a transpiração é geralmente negativo durante o dia) e o crescimento diário líquido (CD, a biomassa aumenta).

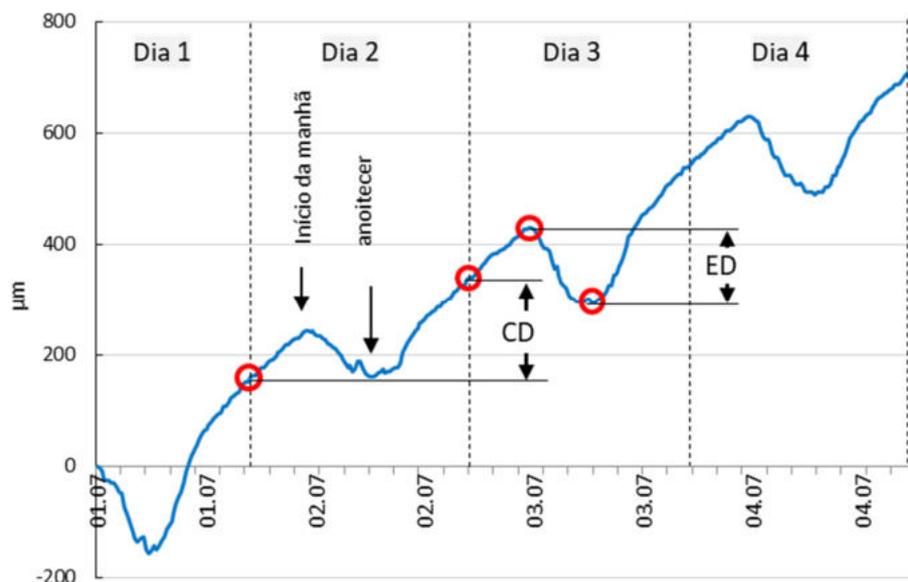


Figura 23: Vários tipos de índices podem ser usados para representar o crescimento e o estresse hídrico, tais como o Crescimento Diário ($CD = \text{valor máx Dia}+1 - \text{valor máx dia}$) ou Encolhimento Diário ($ED = \text{valor máx AM} - \text{valor mín PM}$).

O crescimento rítmico típico das folhas de cacau está ilustrado na Figura 24. Ao contrário dos padrões de crescimento na maioria das espécies de clima temperado, a fase de estiramento das ramos e o lançamento de novas folhas revela uma fase de estagnação do crescimento caulinar. Esta fase de estagnação, que dura cerca de 15 dias, é seguida por uma fase de crescimento do caule, que dura cerca de 1 mês, como ilustrado na Figura 25. Em praticamente 23 árvores, uma intensidade de lançamentos de mais de 50% provocou uma diminuição significativa do crescimento caulinar (Figura 26).

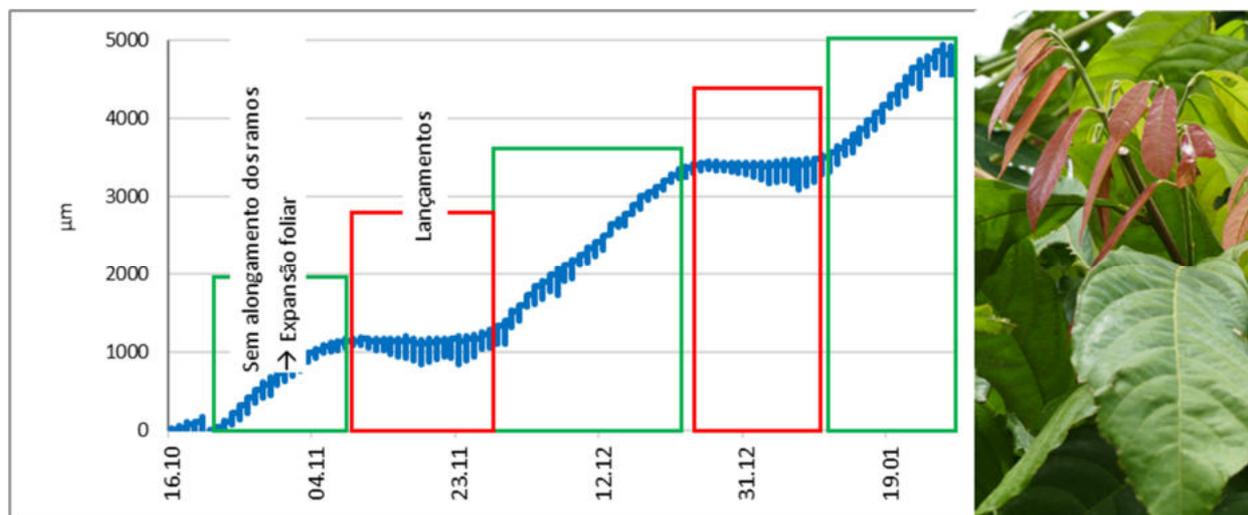


Figura 24: Monitoramento do crescimento durante um período de 15 dias, mostrando as fases alternadas de expansão foliar (áreas circundadas pela linha verde) e de lançamentos (linha vermelha). A figura à direita ilustra a diferença de tamanho entre as folhas jovens (avermelhadas) e as folhas completamente desenvolvidas, o que pode explicar parcialmente o rápido aumento de biomassa refletido na curva durante a fase de expansão foliar.

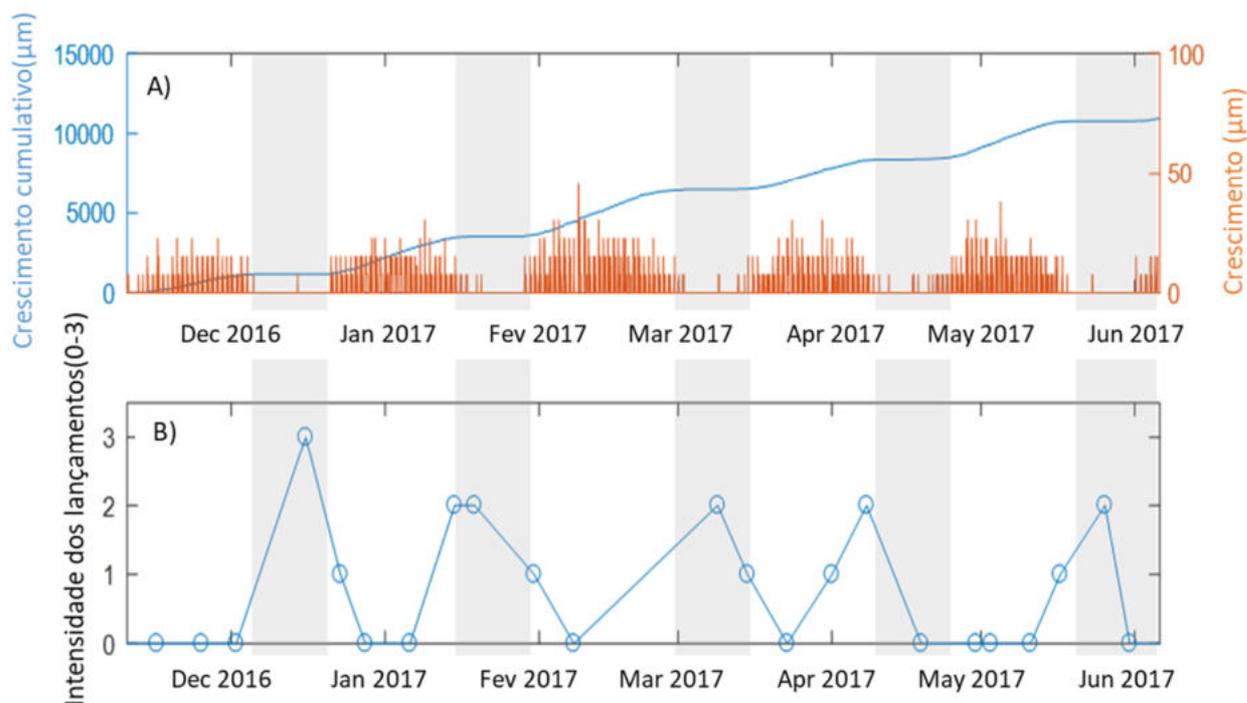


Figura 25: A) Expansão do raio caulinar irreversível induzida por crescimento (linha laranja) e crescimento do raio caulinar cumulativo (linha azul) de uma árvore. B) Intensidade dos lançamentos (0 = sem lançamentos - 3 = lançamento completo). Áreas em cinza mostram estagnação do crescimento caulinar (23 árvores).

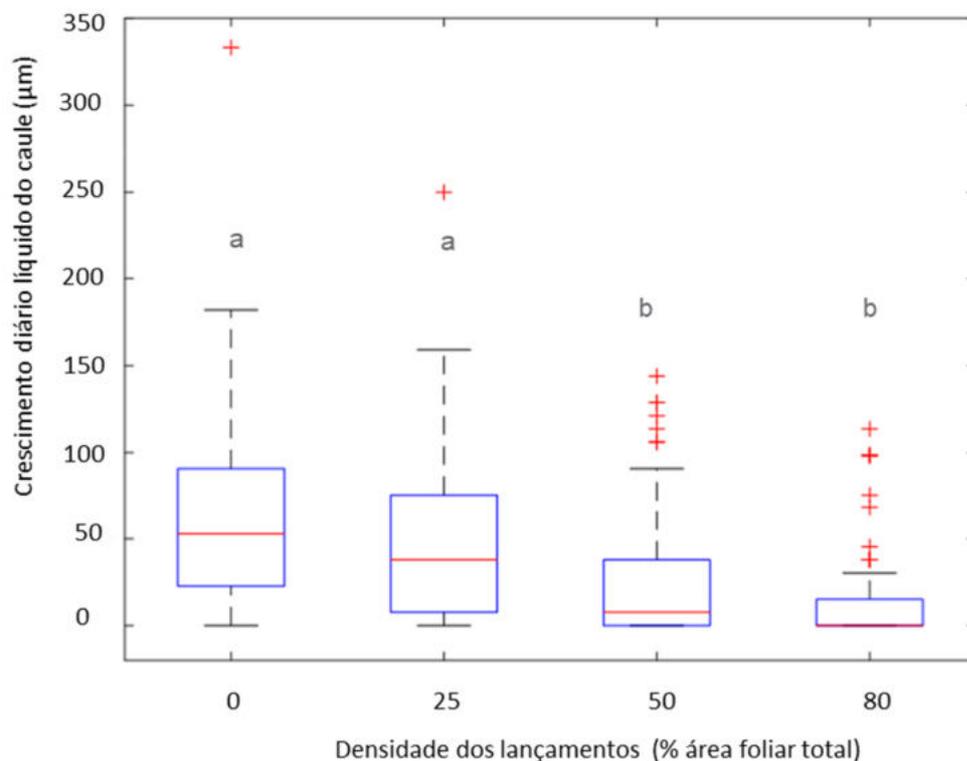


Figura 26: Crescimento diário líquido do caule (micrômetros) para as diferentes classes de densidade de lançamento (expressa em % da área foliar total). As letras comparam as diferenças entre as densidades de lançamento ($p < 0,05$, $n = 23$ árvores).

Dado que a intensidade dos lançamentos foi medida a cada 15 dias, a comparação direta de lançamento e crescimento caulinar tem resolução limitada. Entretanto, conforme apresentado na Figura 17, folhas recentemente lançadas absorvem assimilados no início e são escoadouros antes de se tornarem fontes após 15 dias. Estes resultados corroboram a hipótese de que novos lançamentos são escoadouros prioritários para o carbono em relação ao crescimento caulinar. Assim que as folhas se desenvolvem, o caule volta a crescer. Como os frutos estão fixados ao caule, assumimos que as folhas têm maior prioridade na atribuição de assimilados que os frutos. Carr e Lockwood (2011) mostraram que aproximadamente 10 folhas começam a ser lançadas; após cerca de 40 dias, um segundo lançamento acontece e assim por diante. Isto está de acordo com nossas observações. Entre a evapotranspiração de referência (ET_0) e as atividades de lançamento (Figura 27), encontrou-se uma correlação muito fraca.

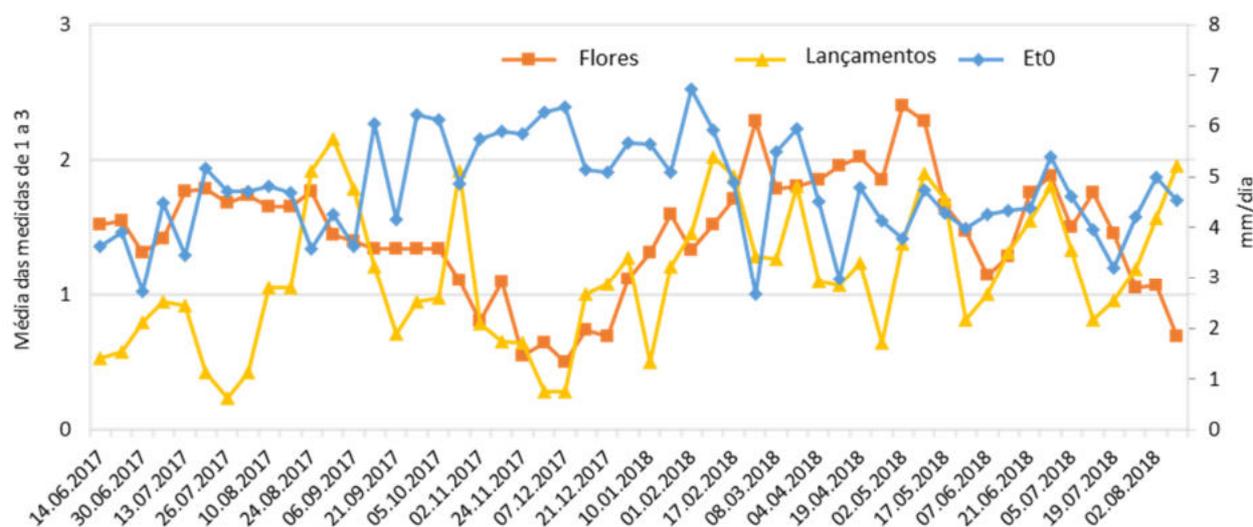


Figura 27: Lançamento foliar e intensidade da floração (estimativa visual 1 = baixa - 3 = alta) e evapotranspiração de referência (ET₀) de 54 árvores da variedade CCN51 durante 2017-2018.

O máximo da evapotranspiração em nov/dez corresponde à atividade de lançamentos mínima. Como este é o período de crescimento máximo dos frutos, é provável que o crescimento do fruto inibiu ainda mais a atividade de lançamentos. Ainda não é possível quantificar a influência destes dois parâmetros, mas assumimos que o crescimento dos frutos tem maior influência que as condições climáticas.

6.5 Floração, vingamento e aborto dos frutos

O cacauero floresce quase o ano inteiro. Assim como os lançamentos, a intensidade da floração foi mínima durante nov/dez de 2017 (Figura 28). Como descrito acima, isto é impulsionado provavelmente pelo crescimento dos frutos e pode ser devido à baixa umidade do ar. Alvim (1977) mostrou que este comportamento comum em plantas, do crescimento do fruto inibir a floração e as atividades de lançamento, também acontece no cacau. Neste estudo, nos concentramos na intensidade da floração entre árvores em áreas sombreadas e em pleno sol e não encontramos diferença.

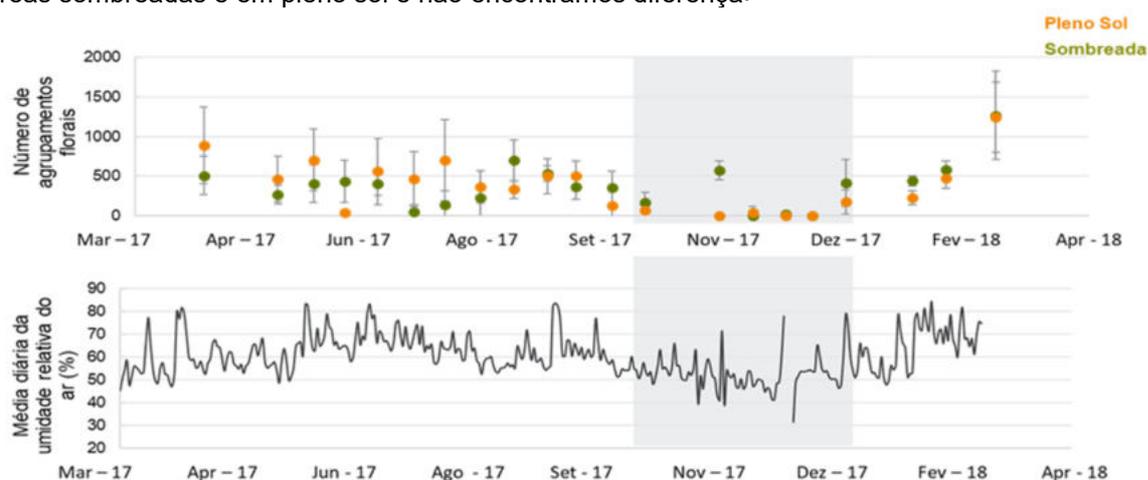


Figura 28: Padrão de floração ao longo da estação de crescimento para árvores em área sombreada e a pleno sol do cultivar CCN51. Umidade relativa do ar (média diária em %) medida em parcelas a pleno sol.

Infelizmente, o aborto dos frutos pode ser muito alto e parece ser o principal fator limitante do rendimento. No clima semiárido, as árvores apresentaram dois períodos de vingamento: em mar/abr e ago/set. Entretanto, durante ago/set de 2017 e nov de 2017, perderam-se muitos frutos (Figura 29). Conhecidos como pecos, o aborto de frutos é um processo fisiológico que envolve a competição, principalmente por carboidratos.

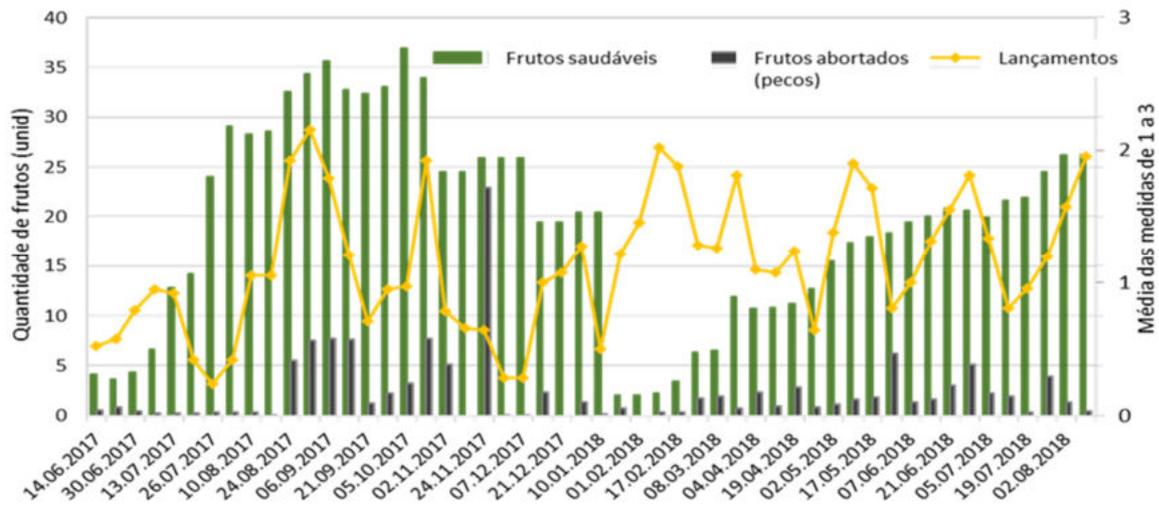


Figura 29: Estimativa visual do número de frutos saudáveis e abortados por árvore (n = 54 árvores) de CCN51 em relação ao lançamento durante 2017-2018.

O aborto dos frutos ocorre apenas até que os frutos atinjam um comprimento de cerca de 15 cm (Figura 30A)). Isto confirma os achados de Carr e Lockwood (2011), que mencionam que frutos pequenos são mais propensos a murchar que os grandes. Os frutos atingem seu tamanho final após cerca de 1500 graus de crescimento (Figura 30B)). No clima semiárido de Juazeiro, isto aconteceu após 3 meses. Os graus de crescimento foram calculados de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Graus de crescimento (GDC)} = \max\left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - 10^{\circ}, 0\right).$$

O aborto dos frutos pode ser visto como uma competição entre o crescimento vegetativo e o crescimento generativo das plantas. NAIR (2010) observou maiores quantidades de pecos durante e após os lançamentos das folhas. Este comportamento é parcialmente refletido pelos dados de campo (Figura 29). As altas atividades de lançamento em set/out se correlacionaram com o aborto dos frutos. Isto reforça a hipótese de que folhas recentemente lançadas são escoadouros primários de carbono e competem com o crescimento dos frutos. A grande quantidade de frutos perdidos em novembro pode ser explicada pelo excesso de água no solo.

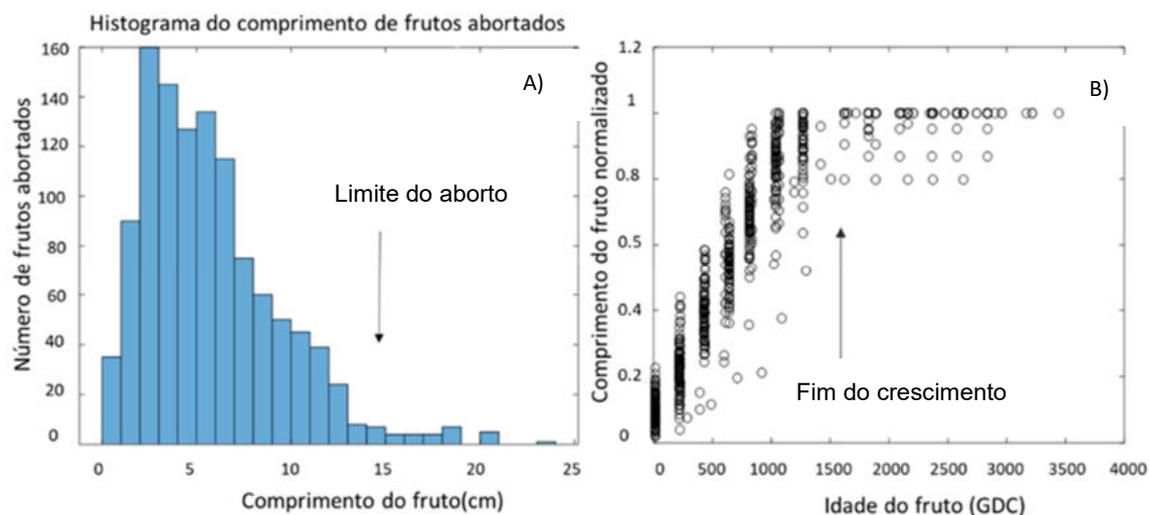


Figura 30: A) Comprimento dos frutos abortados mostrando o estágio final do aborto em cerca de 15 cm. B) Comprimento normalizado do fruto em função da idade do fruto expresso em graus de crescimento. Estes dados são referentes ao cultivar CCN51.

Para uma alta taxa de vingamento dos frutos, Sodré et al. (2017) recomenda manter um estoque de água acima de 60% quando a floração é mais intensa. Este nível de estoque de água deve ser mantido por sete semanas após o aparecimento dos frutos. Muitas observações de campo demonstraram que frutos pequenos bem polinizados são abortados pela árvore. Portanto, a polinização não parece influenciar este processo (Figura 31). O desenvolvimento contínuo de novos frutos é responsável pelas numerosas pequenas colheitas espalhadas ao longo do ano (consultar 6.10).



Figura 31: Os frutos pequenos abortados foram todos bem polinizados.

6.6 Equilíbrio entre crescimento vegetativo e generativo

Um número suficiente de flores e frutos jovens é produzido no clima semiárido, mas o aborto de frutos limita o rendimento. Lançamentos de novas folhas são escoadouros prioritários e podem, portanto, prejudicar o crescimento dos frutos. Como consequência, o aborto de frutos ocorre preferencialmente durante e após os períodos de lançamento. Os experimentos em Juazeiro mostraram que o cacaueiro tem um forte desenvolvimento vegetativo, que pode atingir Índices de Área Foliar (IAF) de até 6. Estes valores altos não estão correlacionados a rendimentos mais altos. Portanto, mesmo as árvores mais produtivas podem abortar grandes quantidades de frutos, resultando em um rendimento abaixo do ideal. Assim, métodos de redução do crescimento vegetativo após o vingamento dos frutos devem ser estabelecidos para diminuir o número de frutos abortados.

6.6.1 Água e nitrogênio

Como o nitrogênio e a água são os principais fatores que impulsionam o crescimento vegetativo, deve-se perguntar como este crescimento pode ser reduzido durante o período de vingamento dos frutos. Um estudo com plantas jovens cultivadas em contêineres mostrou que não houve aumento significativo no desenvolvimento vegetativo acima de 120 g/planta de quantidades de nitrogênio na faixa de 0 a 480 g/planta (o que corresponde a 150 kg de nitrogênio/ha em 1250 árvores/ha) (Ribeiro *et. al.* 2008). Estes experimentos com aplicações diferenciadas de nitrogênio e de níveis de água confirmam que são necessárias árvores fortes para a obtenção de altos rendimentos. Entretanto, nenhum estudo apresentou, até o momento, uma curva de resposta ao nitrogênio para o rendimento em amêndoas secas e/ou crescimento vegetativo da planta. É sabido que, para outras frutíferas, os crescimentos vegetativo e generativo devem estar bem balanceados e que altas quantidades de nitrogênio favorecem o crescimento vegetativo. A Figura 32 mostra uma alta taxa de pecos no CP49 no semiárido da fazenda Ibacem. Não há evidências de que esta taxa de danos possa ser atribuída a uma nutrição inadequada, mas esta hipótese é aventada por alguns pesquisadores.



Figura 32: Uma taxa bastante alta de pecos no CP49 no semiárido da fazenda Ibacem.

6.7 Necessidade hídrica e irrigação

Devido ao nível de precipitação limitado no clima semiárido, o manejo eficaz da irrigação representa um dos maiores desafios na produção do cacau. A compreensão da fisiologia peculiar do cacau permite o desenvolvimento de práticas otimizadas de irrigação.

6.7.1 Sensibilidade ao estresse hídrico

Estômatos são pequenas aberturas no tecido das folhas (Figura 33). Eles permitem a troca gasosa e regulam a transpiração nas plantas. Os estômatos são capazes de se abrir mais ou menos de acordo com o clima (temperatura, umidade do ar, vento) para manter as taxas de fotossíntese mais altas. Entretanto, em certas condições, eles tendem a se fechar para reduzir a perda excessiva de água. Os limites críticos que afetam a função do estômato, particularmente o estresse hídrico, diferem de espécie para espécie. O cacau é considerado muito sensível, embora alguns autores tenham encontrado diferenças entre genótipos (Alban *et al.* 2016). A reatividade dos estômatos é particularmente baixa nas folhas jovens, o que explica os sintomas de estresse durante os ciclos de lançamento.

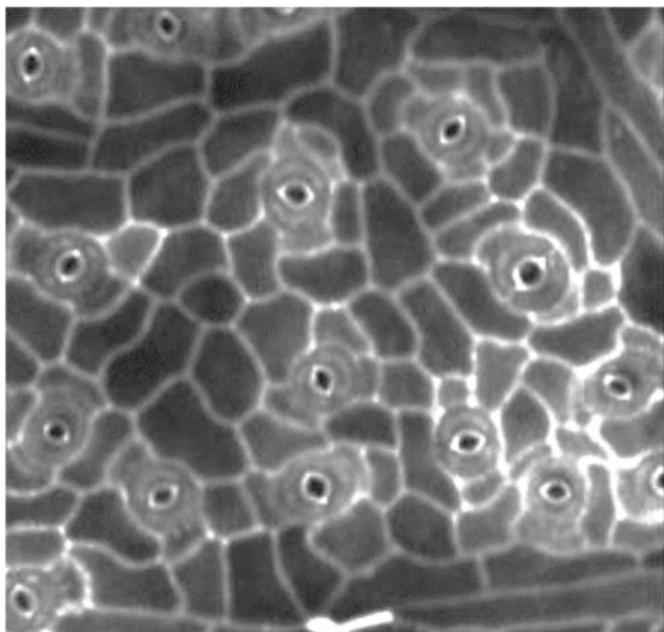


Figura 33: Folhas maduras do cacauete mostrando a densidade particularmente alta de estômatos mencionada pelos autores.

Neste trabalho, observamos que as folhas do cacauete (CCN51) têm cerca de 900 estômatos/mm², que é cerca de 10 x mais que o milho (Liu et al. 2015). De acordo com Hardy (1960), a densidade de estômatos é maior em áreas de pleno sol, por que as células da epiderme são menores que as de áreas sombreadas, o que foi confirmado por Daymond et al. (2009), que contou 788 a 1081 estômatos/mm² de acordo com a exposição à luz. Almeida e Valle (2007) argumentam que a ineficácia do fechamento dos estômatos à perda de água se deve, provavelmente, à alta transpiração pela cutícula. Esta relação não foi observada nos experimentos na região do semiárido. O início e o final do encolhimento ao nascer e por do sol são muito distintos e mostram que a abertura e fechamento dos estômatos é determinada fortemente pela luz do sol.

O potencial hídrico (ψ) medido com a bomba de Schollander (ou bomba de pressão) é usado com frequência como referência para o estresse da planta. Ele é usado atualmente na pesquisa para medir o status hídrico das plantas em função da disponibilidade de água no solo e da taxa de transpiração devida a restrições climáticas. Para o manejo hídrico, o ψ meio-dia (potencial hídrico medido ao meio dia), que reflete o status hídrico da planta como um todo, seria mais preciso e útil como indicador para o estresse hídrico. Nas condições do semiárido, ele é usado em diferentes culturas perenes. Isto requer valores limites indicando um nível de estresse que induza a incidência aceitável sobre a produtividade da cultura e qualidade do rendimento. De Almeida (2016) observou quatro diferentes genótipos quanto à tolerância à seca e documentou valores de -0,65 MPa para plantas bem irrigadas e valores entre -1,08 e -2,08 MPa para plantas com irrigação deficitária. Não foram encontradas referências sobre medidas do potencial hídrico aplicadas ao manejo da irrigação.

6.7.2 Necessidade hídrica de acordo com o clima

A evapotranspiração é um indicador comum para expressar o nível de restrição climática induzido por parâmetros meteorológicos (temperatura, radiação solar, umidade do ar, velocidade do vento). Para aplicações agronômicas, outros parâmetros com menos importância podem ser ignorados. Entretanto, para o manejo da irrigação adequado, as características dos sistemas de cultivo devem ser levadas em consideração. O índice de área foliar (IAF = área foliar da lavoura/m² de solo) é o parâmetro mais útil para expressar a área foliar evaporativa relativa de uma lavoura. Há uma fração específica da ET₀ (Coeficiente da Lavoura = K_c) que expressa as necessidades das espécies cultivadas mais comuns. Para espécies de crescimento rápido, como o milho, o K_c é dado para diferentes estágios de desenvolvimento. Para a maioria das perenes e, em particular, para o cacauete, a FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) dá uma única informação, independentemente do desenvolvimento do dossel, que fica entre

1,0 e 1,05 (Allen et al.1998). Entretanto, podemos assumir que este valor pode ser aplicado a árvores adultas em sistemas de cultivo com IAF $\geq 3,0$.

Para um procedimento aplicado de manejo de irrigação, Pereira et al. (2006) sugere o uso do valor derivado da evapotranspiração de referência para gramíneas da FAO (= 2,88) para o uso de água por unidade de área foliar das árvores irrigadas. Para calcular a necessidade diária de água de acordo com o IAF da cultura, o coeficiente aceito normalmente seria $1/2,88 = 0,347$ de onde obtemos um valor simplificado de $K_c = 0,347 * IAF$. Portanto, a equação completa para o cálculo diário da irrigação pode ser obtida como se segue:

$$\text{mm irrigação/dia} = ET_0 * 0,347 * IAF$$

ET_{LA} é a evapotranspiração por unidade de área foliar e cresce linearmente até IAF entre 3 e 4, que pode ser considerado representativo para lavouras adultas. Em nossos experimentos, usamos um dispositivo específico (Licor LAI 2200, Lincoln, Nebraska EUA) para medidas diretas e em parcelas bastante vigorosas, e obtivemos o valor máximo de 6,0. Este valor alto foi confirmado por medições manuais em 6 árvores da variedade CCN51. Entretanto, muitos experimentos feitos com culturas perenes mostram que o K_c não aumenta significativamente à partir do IAF de 3,5.

6.7.3 Umidade do solo como ferramenta para a gestão da irrigação

A irrigação pode ser manejada eficazmente usando-se sensores de umidade do solo. Diferentes tipos de sensores podem ser usados com este fim. Tensímetros ou Watermarks® são adequados para o manejo da irrigação por gotejamento, pois seu preço acessível permite que sejam instaladas configurações de medição com base em algumas replicatas. A Figura 34 mostra o posicionamento correto dos sensores em relação à posição dos gotejadores. Na maior parte do tempo, usamos 3 replicatas por camada de solo, que resulta em um total de 6 sensores por estação de medição.

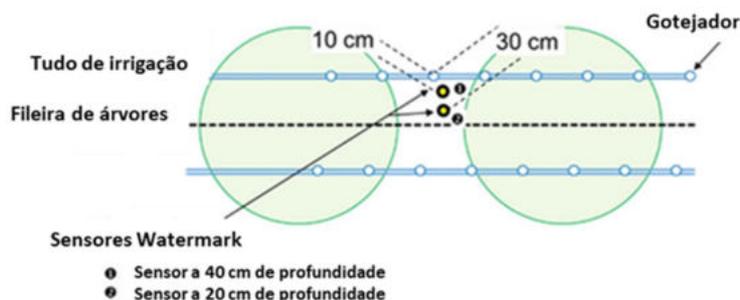


Figura 34: Instalação de sensores de umidade de solo para controlar a irrigação. Para cada parcela, devem ser instalados 3 sensores a 20 cm e 3 sensores a 40 cm para que se obtenha uma boa representação da quantidade de irrigação.

Os sensores devem ser posicionados na profundidade correta para refletir a distribuição de água no bulbo úmido. O posicionamento correto pode ser determinado de acordo com a textura dos diferentes horizontes. Em solos muito antigos, onde a lixiviação da argila formou uma camada compacta e impermeável, a profundidade potencial máxima da raiz ficou em torno de 40 cm (Figura 35).

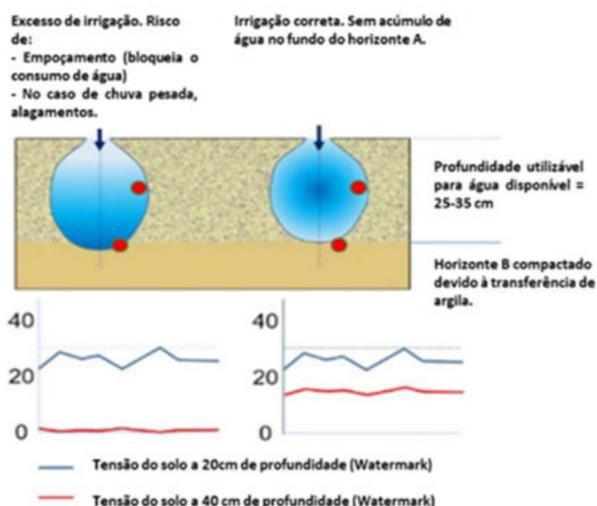


Figura 35: Esquema da vista transversal da distribuição de água produzida por um único gotejador. À esquerda, imagem típica de irrigação em excesso levando ao acúmulo de água no fundo da camada superior. Consequentemente, a curva de sensores a 40 cm retorna solo saturado constantemente (0 KPa). À direita, as curvas refletem a situação correta sem risco de alagamento.

A irrigação ideal é obtida ajustando-se as quantidades diárias de água de forma que a umidade do solo permaneça constante nas duas profundidades, evitando o alagamento, como explicado na Figura 35.

Limiares entre -30 KPa e -60 KPa e -20 KPa e -40 KPa são usados comumente para solo e subsolo, respectivamente. A Figura 36 mostra que a irrigação diária foi insuficiente durante a primeira semana. A partir de 5 de janeiro, a primeira chuva após um longo período de estiagem ajudou a estabilizar as curvas; embora a camada mais inferior de solo (40 cm) pudesse ter ficado um pouco mais úmida (especialmente quando comparada à camada superior), os valores não estão tão distantes do ideal. Entretanto, a irrigação duas vezes ao dia foi eficaz para evitar o alagamento, o que não foi fácil na maior parte do tempo. A irrigação diária foi de 1,6 mm (variando de 1,5 a 2,3) e a ET_0 média foi de 5,1 mm. A chuva contribuiu para o teor de água em 30%. Portanto, o coeficiente K_c ideal, calculado retroativamente, é dado por $K = (irrigação + chuva) / ET_0$.

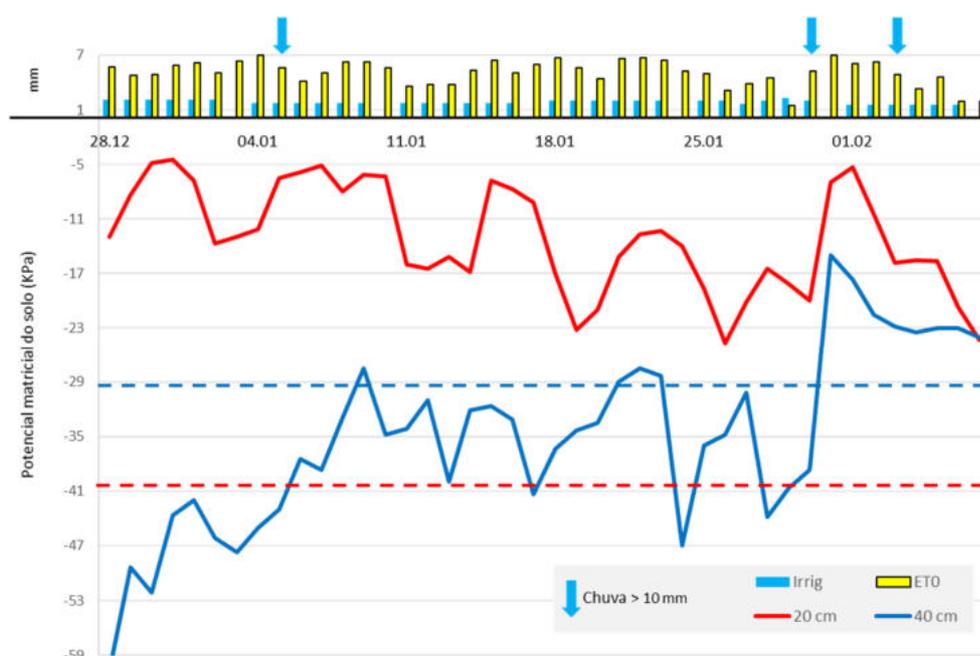


Figura 36: Exemplo de um período de 6 semanas de irrigação aplicado à lavoura de cacau na fazenda de Juazeiro conduzido de acordo com a umidade do solo. Para manter a umidade do solo dentro de uma faixa aceitável, a configuração do programador foi ajustada toda semana.

No caso de baixa capacidade hídrica do perfil da raiz ilustrado na Figura 36, a melhor solução é dividir a irrigação em 2-3 pulsos, como são chamados, por dia. Isto ajuda a minimizar o estresse hídrico durante os dias quentes e contribui para evitar o empoçamento, com acúmulo de água acima das camadas compactadas. Infelizmente, devido a limitações técnicas e de trabalho (janela de tempo limitada a um período relativamente curto do dia, complexidade da rede de distribuição de água, setores de irrigação que agrupam parcelas com necessidades hídricas diferentes, comando manual de válvulas, etc), a irrigação diferenciada não é possível em qualquer contexto.

6.7.4 Indicadores vegetais como ferramentas para a gestão da irrigação

A gestão da irrigação com indicadores vegetais pelo método da bomba de Schollander é discutida brevemente na seção 6.7.1. Dendrômetros que oferecem medições contínuas do crescimento caulinar apresentam uma outra solução (consultar 6.4). As medições feitas com o dendrômetro mostram que o encolhimento caulinar começa ao amanhecer e cessa com o por do sol. A comparação do encolhimento diário (ED), descrito na seção 6.4, com o crescimento caulinar (Figura 37) mostra uma tendência a estresses mais altos durante a fase de estagnação do crescimento caulinar. Este aumento no estresse se deve provavelmente aos novos lançamentos que resultam da perda de controle dos estômatos por folhas novas. Além disso, o círculo vermelho mostra estresse extremo causado por uma possível falta de irrigação. A relação entre restrição climática e déficit hídrico na árvore (correspondendo ao índice ED) sinaliza que as medições do dendrômetro podem ser usadas como bons indicadores de estresse para orientar a irrigação do cacau.

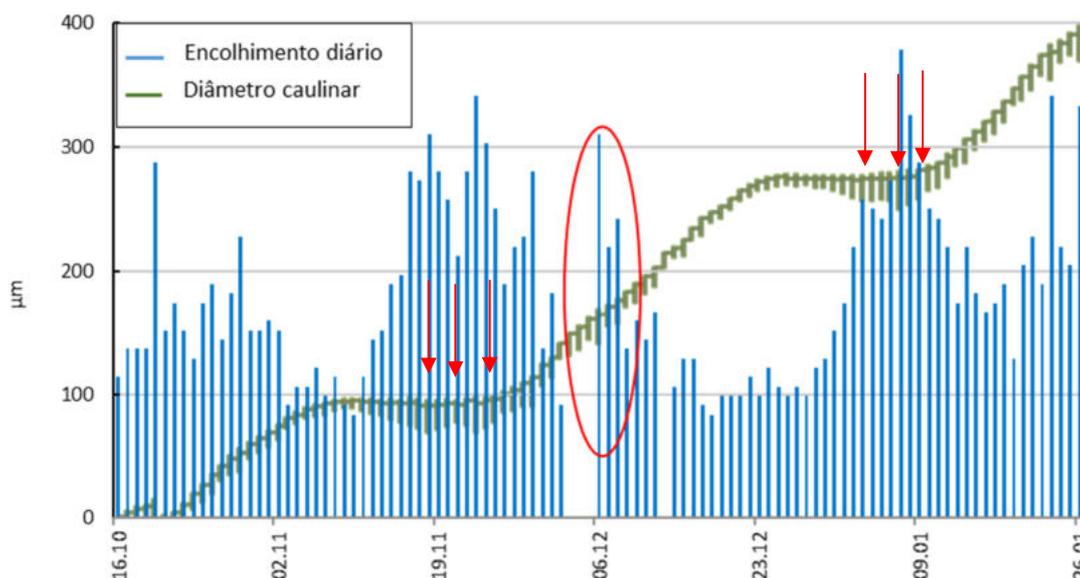


Figura 37: Encolhimento diário (ED) extraído da curva dos dendrômetros (azul) e o diâmetro caulinar (verde). Setas vermelhas indicam uma correlação entre a estagnação do crescimento caulinar e o aumento constante do encolhimento diário, e o círculo vermelho indica um possível déficit hídrico.

A Figura 38A) confirma a maior sensibilidade das árvores ao estresse hídrico durante os períodos de lançamento, que caminha lado a lado com a falta de controle dos estômatos de parte do dossel. Em contrapartida, a Figura 38B) mostra que o cacau é mais tolerante durante a fase de expansão foliar.

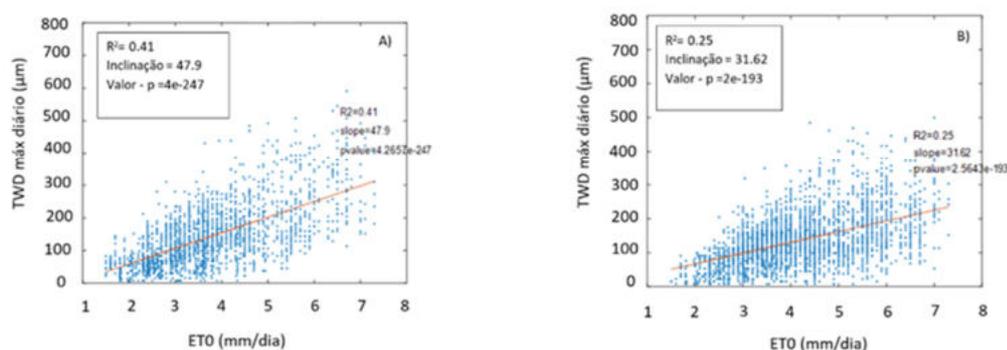


Figura 38: Relação entre o déficit hídrico máximo diário na árvore e a ET_0 diária (A) durante o período de lançamento e (B) durante o período de crescimento caulinar para o cultivar CCN51.

6.7.5 Reação da árvore ao estresse hídrico

Para verificar a sensibilidade das árvores da variedade CCN51 ao estresse hídrico, definimos um experimento de três semanas em que a irrigação foi reduzida durante períodos intermediários em 100%, 50% e 0%. Após cerca de três semanas de irrigação limitada, a umidade do solo medida com as sondas de umidade do solo Watermark (Irrometer, Riverside CA, EUA) atingiram um nível de 180 cbar na profundidade de 20 cm e mais de 160 cbar em 40 cm. Durante este período, a ET_0 exibiu valores médios de 4,4 mm. Isto induziu um forte estresse nas árvores. As folhas murcharam intensamente, passaram a exibir uma coloração mais brilhante e cair (Figura 39).



Figura 39: Mesma árvore sem estresse hídrico (esquerda) e com estresse hídrico em 180 cbar de umidade do solo (direita).

Além disso, observamos que novos lançamentos de folhas caíram mais cedo que os mais antigos e o lançamento foi cessado. Durante este período de estresse, os dendrômetros indicaram um forte encolhimento do diâmetro caulinar, de cerca de 1000-1300 μm (Figura 40).

Três dias após a retomada da irrigação com 2,5 mm/dia, as folhas se recuperaram e o caule atingiu o diâmetro original novamente. Isto mostra que o estresse hídrico de cerca de 180 cbar de umidade do solo parece aplicar uma condição de estresse forte às árvores. A atividade do câmbio não foi completamente bloqueada já que o encolhimento foi causado principalmente pela desidratação da casca (Alvim e Alvim 1980). De acordo com nossas observações, não aparecem folhas murchas à partir de um teor de umidade do solo de 100 cbar. Devemos ter em mente que o solo deste experimento é bastante raso e tem uma profundidade de raízes de apenas 30 cm. Abaixo desta profundidade, o solo é impermeável para as raízes e a água. Isto significa que a capacidade de armazenamento de água do solo é muito limitada. Portanto, em outro tipo de solo, o tempo até o estresse extremo será diferente.

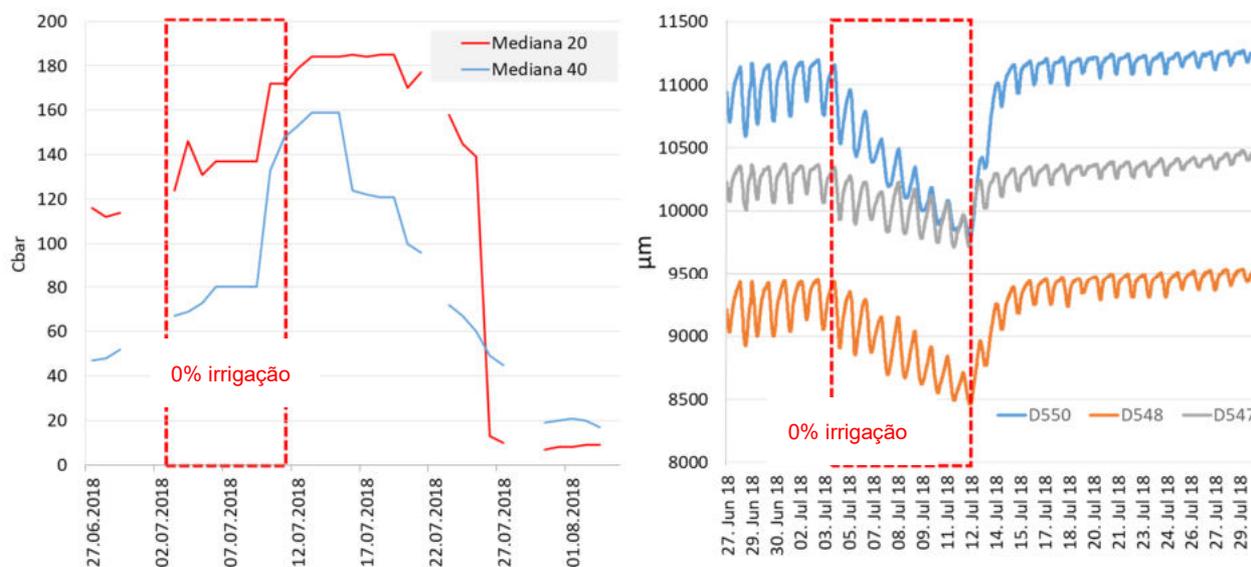


Figura 40: Evolução da umidade do solo nas profundidades de 20 e 40 cm (à esquerda). Diâmetro caulinar de 3 árvores: D550, D548, D547 (μm) durante um período sem irrigação de 4 de julho a 12 de julho de 2018.

De acordo com Alvim (1977), a diminuição na umidade do solo resultou no encolhimento caulinar e na clorose das folhas, principalmente para as mais antigas. Muito poucas folhas caíram durante a murcha. Entretanto, assim que a umidade do solo voltou a aumentar, o desfolhamento ocorreu simultaneamente a um aumento abrupto no inchaço do caule. Ele explica que *"o aumento na queda das folhas parece resultar de uma ruptura da camada de abscisão das folhas após o rápido inchaço da casca dos ramos. De sete a oito dias após a retomada da irrigação, muitas gemas terminais começaram a inchar, iniciando um novo ciclo de lançamentos"*.

6.7.6 Excesso de água

Assim como outras plantas, o cacau é sensível ao excesso de água (Figura 41). A hiperidratação causa anoxia na região da raiz, que pode levar à redução do crescimento da árvore e a uma perda total dos frutos. Além disso, fortes perdas de nitrogênio são intensificadas pela desnitrificação. De qualquer modo, é importante um bom controle da umidade do solo durante os períodos chuvosos. Almeida e Valle (2007) observaram que solos alagados podem causar *"diminuição na área foliar, condutância dos estômatos e taxas fotossintéticas, além de induzir a formação de lenticelas e raízes adventícias"*. Já Gomes e Kozlowski (1986) observaram que geralmente o alagamento é seguido de epinastia, extenso apodrecimento das raízes e formação de lenticelas hipertrofiadas e de raízes adventícias em caules submersos.



Figura 41: Alagamento pode causar grandes danos, desde crescimento baixo até a perda total dos frutos.

6.8 Fertilização

A fertirrigação com a irrigação por gotejamento é adequada para a nutrição do cacaveiro. Durante os experimentos nas fazendas, a fertilização era responsabilidade de cada fazenda e não fazia parte do experimento. Foi disponibilizado um relatório técnico com informações sobre a quantidade, composição e doses de fertilizantes que devem ser aplicadas a cada lavoura, desde o viveiro até a produção (Chepote et al. 2013). A principal recomendação é que a fertilização deve levar o desenvolvimento das plantas em consideração e que a quantidade de fertilizante necessária para a planta deve ser proporcional ao seu estado fenológico.

O nitrogênio é comumente considerado o nutriente mineral mais importante, limitando a produção em muitas culturas agrícolas no mundo todo. Entretanto, muitos estudos mostram que as taxas de fornecimento de nitrogênio são muito maiores que o necessário para as árvores. Por um lado, esta última é frequentemente superestimada especialmente em lavouras maduras. De acordo com as diretrizes suíças para a fertilização de frutíferas, lavouras de maçã produzindo 60.000 kg/ha requerem 80 kg/ha de nitrogênio para atender suas necessidades. Alguns fatores de ponderação, como vigor dos ramos, rendimento no ano anterior, intensidade da floração, vigor do porta-enxerto, profundidade útil do solo e matéria inorgânica no solo também devem ser levados em consideração para uma boa estimativa. Nas diretrizes publicadas por Tagliavini et al. (2016), a fertilização ideal com nitrogênio pode ser baseada na remoção líquida deste elemento (N) em g N/kg de fruto fresco. Os valores diferem consideravelmente de acordo com a espécie arbórea (por exemplo, 0,9 para maçãs, 2,7 para o pêssego, 10 para nozes e 22 para a oliveira). No caso de uma lavoura de maçãs produzindo 60.000 kg de frutos/ha, a fertilização ideal seria de $60 * 0,9 = 54$ kg N/ha. Com relação à fertilização de cacau, Jiska et al. (2015) apontam que há diversas lacunas de conhecimento na área. Em sua revisão, os autores notam que muito da principal pesquisa relacionada à nutrição na produção do cacau foi conduzida há mais de 40 anos. Muitos resultados destacam o efeito positivo da

fertilização de acordo com o manejo da lavoura (fixação de nitrogênio, matéria orgânica) e sistema de cultivo (densidade, sombreamento), mas ainda existem deficiências com relação ao consumo e uso dos nutrientes. Entretanto, apesar da falta de informação quantitativa sobre o consumo e uso de nutrientes, propõem-se diretrizes baseadas na idade da lavoura (Tabela 2A) ou no dobro da quantidade de nutrientes removida pela lavoura (Tabela 2B).

Tabela 2: Diretrizes de nutrientes. A) Brazil BA, com base na densidade de 1300 árvores/ha (Cabala Rosand et al. em De Geus, 1973) B) Com base no dobro da quantidade de nutrientes removida pela lavoura (Von Uexküll e Cohen 1980).

A		B	
Ano	kg N/ha	Meta de rendimento (amendôa secas(t)/ha)	kg N/ha
Plantio	9-14	1	40
2	18-28	2	80
3	28-42	3	130
Adulta	45-70	4	190

A Figura 42 mostra um alto vigor das árvores da variedade CCN51 (4º ano após o plantio) sob sombrite que absorve 30% da luz. Comparadas às árvores em pleno sol, o vigor foi 90% maior. Ambas as parcelas receberam a mesma fertilização, embora considere-se que as árvores em áreas sombreadas requeiram menos nitrogênio. Com este nível de redução da radiação solar, a luz não é considerada um fator limitante, portanto, pode-se argumentar que a baixa produtividade se deve à competição entre crescimento vegetativo e vingamento dos frutos como uma possível consequência da superfertilização com nitrogênio (Zuidema 2005).



Figura 42: Vigor bastante alto das árvores da variedade CCN51 após 4 anos do plantio.

6.9 Proteção fitossanitária

Conforme esperado, após 4 anos da plantação no clima semiárido de Juazeiro, até agora apenas os fungos *Lasiodiplodia theobromae* (Figura 43) e *Ceratocystis Fimbriata* ou *Ceratocystis Coccofunesta* (Figura 44) foram encontrados. De acordo com Sodré (2017), este tipo de doença é bastante comum em climas secos com áreas não sombreadas e solos menos férteis. Estes fungos são descritos como patógenos secundários que, normalmente, infectam o hospedeiro através de alguma lesão. Oliveira e Luz (2005) mostraram uma incidência e intensidade mais altas em plantas com baixo crescimento vegetativo sob estresse em áreas de pleno sol e um grande número de ataques por insetos.



Figura 43: Fungo *Lasiodiplodia theobromae* nos frutos (esquerda). Características e sintomas da morte descendente causada pelo fungo *Lasiodiplodia* (direita).

Fungo *Lasiodiplodia theobromae* (Sodré 2017; Oliveira and Luz 2005)

Sintomas:

- Manchas escuras na casca.
- Aprofundamento progressivo na madeira.
- Hipertrofia das áreas atacadas nos caules.

Recomendações:

- Eliminação 20 ou 30 cm abaixo das áreas necróticas.
- Aplicar solução de hipoclorito de sódio a 5% e óxido cuproso 5%.
- Borrifar as plantas afetadas e as plantas próximas a elas.
- Evitar lesão mecânica (poda e colheita).
- Borrifar com inseticidas ou misturas com fungicidas



Figura 44: Plantas afetadas pelo fungo da murcha de *Ceratocystis* (mal do facão), que ocorre devido às lesões causadas nas plantas pelos insetos.

Ceratocystis Fimbriata* or *Ceratocystis Coccofunesta (Sodré 2017; Oliveira and Luz 2005)

Sintomas:

- Murcha, amarelamento e folhas secas, parcialmente ou genérico.
- Lesões necróticas.
- Às vezes, exsudação de um líquido escuro.

Recomendações:

- Queimar as plantas doentes e mortas.
- Evitar lesão mecânica (poda e colheita).
- Limpar todas as ferramentas de trabalho com solução 1:6 de hipoclorito de sódio ou formaldeído.
- Práticas de manejo para cuidados com a área.
- Aplicar solução de hipoclorito de sódio 5% e óxido cuproso 10% e carbendazim (C₉H₉N₃O₂) 1%.
- Borrifar a cada quinze dias com óxido cuproso a 3% com Metamidofós 0,5 % (APUD Ram et al. 2004).

Os tratamentos necessários para cada tipo de doença e inseto estão descritos em Sodré (2017), Oliveira e Luz (2005). Foram encontrados poucos tipos de insetos que facilitam a manifestação do fungo na lavoura de Juazeiro durante estes anos. Os dois mais frequentes foram Cochineal (*Planococcus citri*) mostrado na Figura 45 e Cocoa thrips (*Thrypidae Selenothrips rubrocinctus*) na Figura 46.



Figura 45: Cochineal (*Planococcus citri*) vivendo em mutualismo com a formiga "pixixica" *Wasmannia auropunctata*.

Cochineal (*Planococcus citri*) (Agrolink 2019; Sánchez 2011)

Sintomas:

- Sucção da seiva.
- Reduz a qualidade do fruto causando rachaduras e formação de macerações de excrementos líquidos.
- Dano direto. Recomendações:
- Borrifar com óleos solúveis nas horas mais frias do dia ou com mistura de inseticida à base de fósforo. Sugestões para óleos comerciais: Argenfrut RV, Assist and Dytrol



Figura 46: Sintomas causados pelo inseto *THRYPIDAE Selenothrips rubrocinctus* - Cocoa thrips. O ataque deste inseto é mais intenso com a ausência do sombreamento, seca prolongada e presença de folhas parcialmente maduras.

Thrypidae *Selenothrips rubrocinctus* - Cocoa thrips (Agrolink 2019; Menezes *et al.* 2005)

Sintomas:

- Inflorescências.
- Danos aos frutos.
- Folhas: ocorre principalmente na superfície inferior, próxima à nervura central, causando necrose seguida de queda.

Recomendações:

- Arrancar e queimar as plantas com sintomas da doença.
- Borrifar com inseticidas específicos como Actara 250 WG ou Adage 350 FS.

O manejo de pragas e doenças nas regiões semiáridas também requer bastante esforço. De fato, o clima seco e a baixa umidade favorecem as lavouras de cacau reduzindo a proliferação de doenças causadas por fungos, particularmente o *Crinipellis pernicioso* ("Vassoura de Bruxa"), mas outros tipos de doenças são encontradas, o que evidencia a importância do controle e manejo periódicos da lavoura.

6.10 Expectativas de colheitas e rendimento

A Figura 47 apresenta os rendimentos das colheitas de amêndoas secas em Juazeiro para as diferentes variedades, de outubro de 2017 a setembro de 2018. Salobrinho 03, CCN51 e Cepec 2002 tiveram os maiores rendimentos. Entretanto, a variação entre os rendimentos maior e menor no mesmo tratamento foram muito grandes. Enquanto as melhores parcelas tiveram desempenho de mais de 3000 kg/ha de amêndoas secas, as piores atingiram menos de 1500 kg/ha (Figura 47).

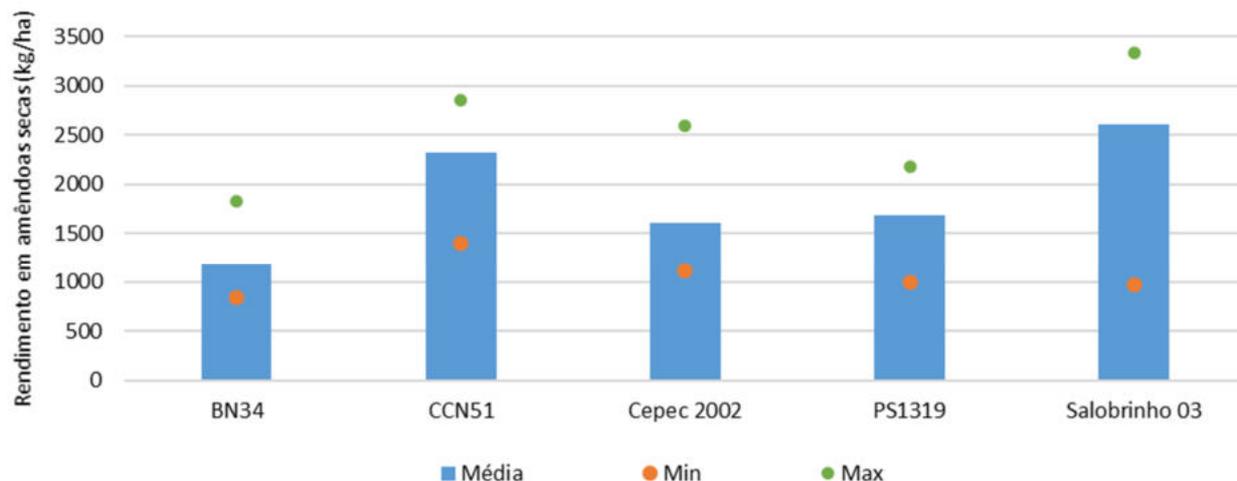


Figura 47: Rendimento em amêndoas secas (kg/ha) de 5 diferentes variedades em Juazeiro de outubro de 2017 a setembro de 2018. (Média de 4 parcelas com 10 árvores em cada).

A Figura 48 mostra todas as colheitas ao longo dos anos de 2017 e 2018, com muitas colheitas pequenas ocorrendo ao longo do ano. As colheitas mais importantes aconteceram nos meses de Nov/Jan. Isto está de acordo com os períodos de colheita conhecidos nas regiões úmidas e com os processos de floração e vingamento de frutos das plantas (consultar 6.5). A realização de tantas pequenas colheitas é trabalhosa e, portanto, cara. Devem ser encontradas soluções para um manejo melhor das árvores e diminuição do número de colheitas, levando a um maior número de períodos distintos para o vingamento e colheitas. Saber o tempo certo de maturação dos frutos não é tão fácil quanto parece; cada variedade tem características específicas que indicam o tempo certo para a colheita através da cor e som produzido ao bater no fruto.

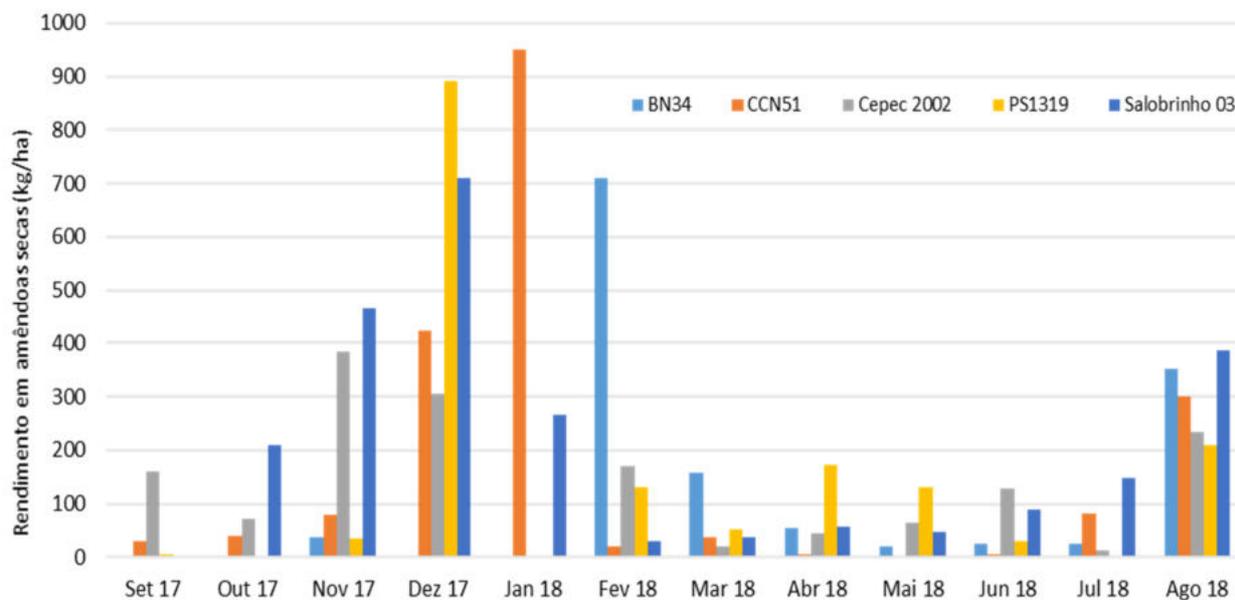


Figura 48: Colheitas únicas e seus rendimentos (kg/ha) em Juazeiro em 2017 e 2018.

7 Sistemas de cultivo futuros para o cacau

O conhecimento discutido nos capítulos anteriores foi obtido através dos dados em campo, experimentos e revisões da literatura. Este capítulo é dedicado a compartilhar o conhecimento da nossa equipe. Para as plantações de maçã, foram desenvolvidos diversos procedimentos de cultivo, que se comprovaram eficazes. Estes procedimentos podem ser aplicados às lavouras de cacau para melhorar a estrutura e manejo da plantação. Algumas melhorias em potencial incluem:

- Aumentar as densidades de plantio para melhorar a eficácia do sistema de produção.
- Árvores menores e padronizadas para facilitar o trabalho de poda e colheita.
- Aplicação reduzida de produtos de proteção fitossanitária através de uma melhor penetração de árvores pequenas em comparação com árvores maiores.
- Diminuição da ocorrência de doenças fúngicas devido ao fato de que plantas menores secam mais rápido após a chuva
- Uso de clones em vez de plantas por sementes: como as plantas jovens são normalmente enxertadas em mudas obtidas de sementes, a heterogeneidade das árvores é alta, dificultando o manejo eficiente das lavouras. Até agora, porta-enxertos anões clonados, que resultam em plantas mais homogêneas, ainda não foram introduzidos na produção de cacau.

Estes aspectos apontam para o grande potencial de melhoramento nas tecnologias de cultivo do cacau que podem ser exploradas no futuro.

7.1 Sistemas de cultivo semi-intensivos

A densidade dos sistemas de cultivo semi-intensivo na faixa de 1000 a 1300 árvore/ha é baseada no método de plantação como o descrito na Figura 53. Sua formação aberta oferece diversas vantagens:

- Alta interceptação da luz (Figura 53B)).
- Treinamento e poda sendo afetada de maneira que as alturas das copas permaneçam sob controle (geralmente em torno de 3m).
- Uso racional de um vigor relativamente alto, distribuindo o potencial de crescimento entre diversas formações principais, também chamadas de pernadas.

Entretanto, esta configuração de dossel oferece oportunidades limitadas para a densificação.

7.1.1 Treinamento de novas árvores

O comprimento do enxerto (círculo azul na Figura 49A)) influencia o número de novos ramos. Se 3 ou 4 ramos de vigor semelhante se desenvolvem regularmente ao redor do caule, eles formarão a futura formação principal. Na Figura 49A), 6 gemas produziram 6 ramos laterais de vigor desigual. Portanto, apenas 2 deles (4 e 5) podem ser usados para formar a estrutura básica da árvore. O ramo 6 se desenvolve quase que verticalmente, o que iria aumentar o vigor e produzir uma copa desbalanceada. Em contrapartida, os ramos 1-3 crescem quase que horizontalmente e, portanto, produzem estruturas ruins. Além disso, devido ao oposto da filotaxia, todos os ramos se desenvolvem no mesmo plano vertical (1, 3 e 5 à direita e 2, 4 e 6 à esquerda). A Figura 49B) demonstra um caso relativamente incomum em que, pelo menos, 3 (talvez 4) ramos bem equilibrados e bem orientados podem ser usados para formar a estrutura principal, como mostrado na Figura 49C). Em contraste, a Figura 50A) ilustra um caso muito comum com duas gemas (na extremidade distal do enxerto) crescendo vigorosamente e, portanto, elas mesmas produzindo muitas laterais fortes. A poda, como exibida na Figura 50A), permite a formação de uma estrutura de base balanceada, como a apresentada na Figura 50B). Na Figura 51A), o enxerto (círculo azul) produziu apenas 1 caule vertical vigoroso, que desenvolveu 3 ramos laterais.

Após a poda (Figura 51B) e C)), permaneceram 3 ramos relativamente bem orientados. O mais fraco, por estar na posição apical, tem uma boa chance de compensar seu atraso no desenvolvimento.



Figura 49: Treinamento de árvores jovens logo após seu crescimento inicial na lavoura. Para obter a "forma de vaso" clássica baseada em 3-4 estruturas principais.

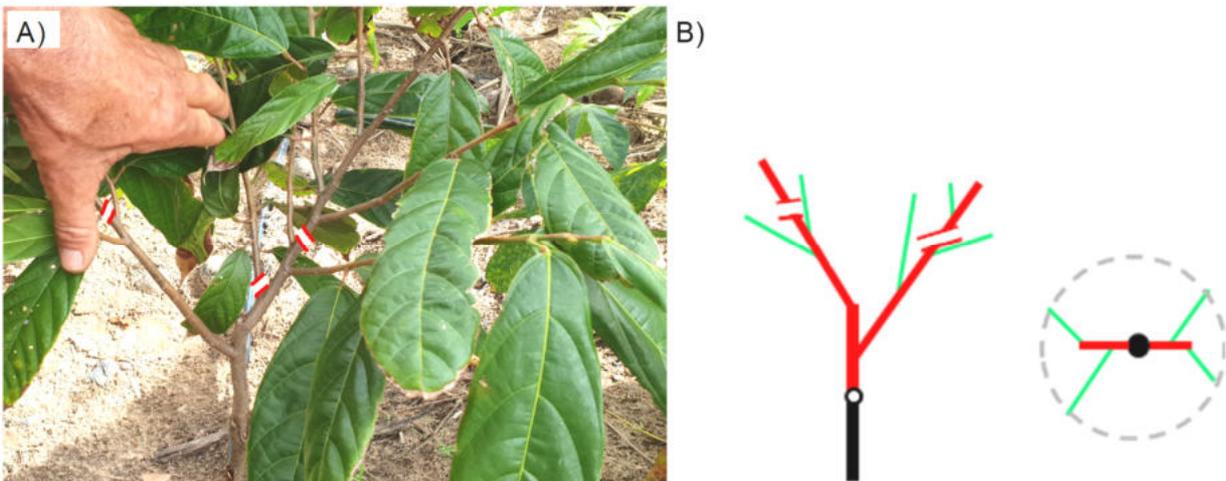


Figura 50: Um caso muito comum com 2 gemas crescendo vigorosamente e, portanto, elas mesmas produzindo diversos ramos laterais fortes.



Figura 51: Apenas 1 caule vertical vigoroso, que desenvolveu 3 treinamentos iniciais de ramos laterais, deve ser adaptado à ampla diversidade de morfologias de mudas devido à pré-formação não padronizada nos viveiros.

7.1.2 Controle adequado de ramificações

Por exemplo, PS1319 e BN34 geralmente produzem ramos laterais suficientes para o treinamento da árvore, enquanto que CCN51 oferece menos possibilidades para a construção de uma estrutura de base balanceada. A poda de ramos jovens é uma maneira eficaz de induzir a reação vegetativa lateral no caso de ramificação insuficiente. A Figura 52A) mostra o resultado da poda do ramo principal. A seleção dos ramos laterais adequados de acordo com seus respectivos ângulos de crescimento e vigor oferece a possibilidade de formar diversos ramos (geralmente 2) a partir do ramo primário. É possível até atingir uma nova reação vegetativa pelo encurtamento dos ramos de uma certa idade (Figura 52B)).

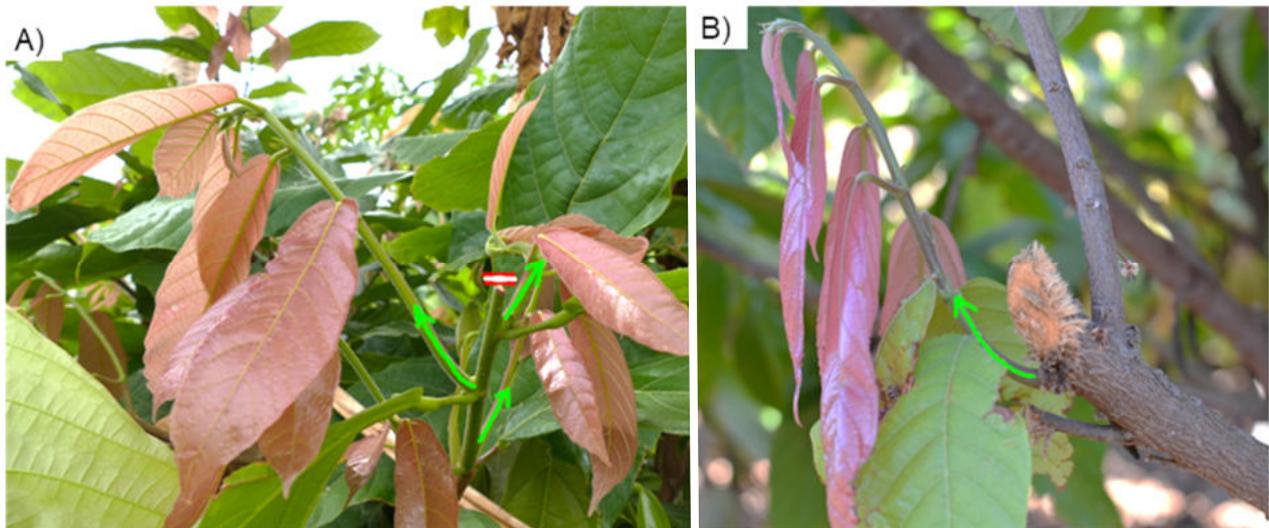


Figura 52: O encurtamento de lançamentos (A) ou ramos (B) é útil para a obtenção da ramificação adequada durante a fase de formação de árvores jovens.

7.1.3 Modelos de formação das macieiras

Em sistemas de cultivo de maçã com a mesma densidade de árvores e porta-enxerto, a formação da árvore influencia fortemente a produtividade (Henriot and Monney 2003). Árvores estreitas verticais (Figura 53A)) comparadas com árvores em forma de V (Figura 53B)) interceptam menos radiação fotossinteticamente ativa (32 e 48%, respectivamente). O índice de área foliar também foi menor (-44%), o que resultou em menor produtividade (-21%) durante todo o período de produção (7° a 11° ano de plantio).

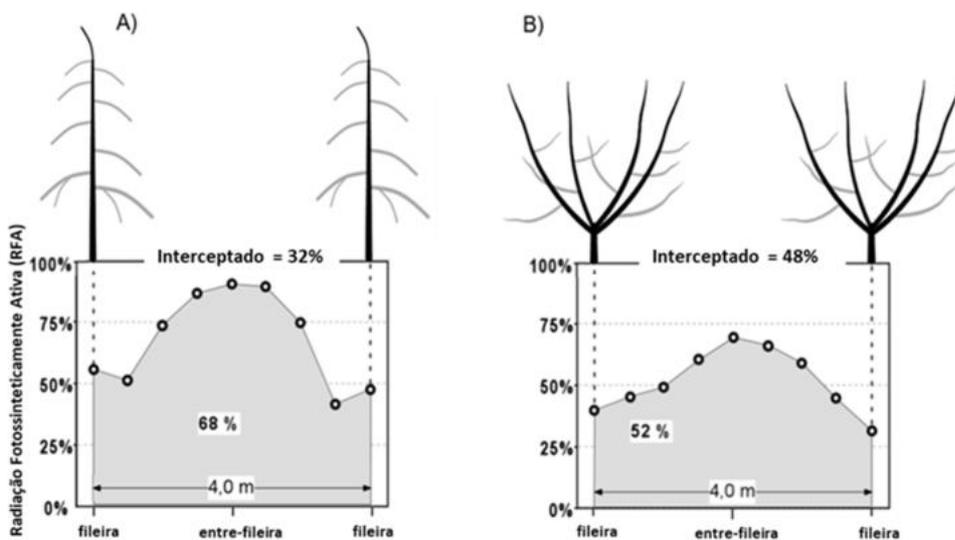


Figura 53: Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) medida sob o dossel de uma única formação vertical (A) e um sistema de treinamento em V (B). A RFA interceptada é a diferença entre o total disponível (100%) e a média das medições a cada 50 cm em uma linha perpendicular à fileira de árvores durante um período de 24 horas.

7.1.4 Formação do cacaueiro de acordo com o hábitat de crescimento

Nos experimentos conduzidos na fazenda em Juazeiro, o sistema de cultivo para todas as variedades foi o mesmo. Ele é baseado no esquema apresentado na Figura 53 com uma densidade de 1250 árvores/ha (intervalo de 4m entre as fileiras e de 2m na fileira). Esta formação é normalmente chamada "em vaso". A estrutura da árvore é baseada nos ramos principais (linhas pretas) e nos elementos secundários (linhas cinza), sendo os primeiros subordinados aos últimos. Na realidade, algumas estruturas secundárias são frequentemente treinadas como estruturas primárias para compensar a ramificação insuficiente de certos indivíduos. Este é o caso para os ramos 3 e 4 na Figura 54A), que cresceram como laterais dos caules principais 1 e 2. Ainda assim, a árvore mostra uma estrutura bem balanceada com uma alta taxa de interceptação da luz. Em contrapartida, a árvore na Figura 54B) tem uma capacidade muito menor de interceptar a energia da luz.

A variedade BN34 exibida na Figura 54C) tem um crescimento espalhado, que tende a expor os frutos à luz solar direta. A falta de vigor limita a emergência de ramos no meio da copa, que formariam uma proteção. PS1319 (Figura 54D)) mostra um hábito de crescimento semelhante, mas o vigor leva à formação de um dossel mais compacto, o que evita que os frutos sejam danificados pela luz solar direta. Entretanto, o hábito de espalhamento se torna um obstáculo para a mecanização e eficiência do trabalho, especialmente na colheita.

Na fazenda de Juazeiro, a área mais baixa das árvores permaneceu saturada por um número muito grande de pequenos ramos por um longo período. A Figura 54E) mostra o resultado da poda manual que permitiu aliviar as áreas em frutificação. A vegetação das áreas superiores do dossel é suficientemente densa para evitar queimaduras solares nos frutos. A poda mecânica foi introduzida recentemente. Em uma parcela CP49 com árvores vigorosas em formação aberta, a poda mecânica restaurou espaço suficiente para o movimento livre da mecanização e da força de trabalho (Figura 54F)). A poda manual seria mais precisa, mas com um custo de trabalho muito mais alto.



Figura 54: Assim que a formação inicial esteja completa, a poda adequada é aplicada, considerando as características fenotípicas.

7.1.5 O desafio da formação principal das árvores

Ramificação ruim é uma situação comum com algumas variedades, em particular a CCN51. Ela resulta em um número insuficiente de estruturas primárias (Figura 55A) e, portanto, baixa interceptação da luz, mas também um potencial de produção menor já que o rendimento de frutos depende amplamente de um comprimento acumulado de ramos fortes que suportem os frutos. Em contrapartida, a árvore da Figura 55B), obviamente, apresenta uma capacidade de suporte maior. Como uma reação à ramificação insuficiente no estágio inicial de desenvolvimento, muitas árvores produzem ramificação excessiva na parte superior da copa (Figura 55C)), o que resulta em uma formação não ideal.

A variedade PS1319 mostra que o número de ramos determina o rendimento potencial da árvore, como mostrado na Figura 55D)). Entretanto, um número menor de ramos (Figura 55E)) aumenta a eficiência do trabalho na colheita e poda e reduz o risco de formação de um microclima úmido no meio da árvore, o que favorece a instalação de doenças. As Figuras 55F) e G) mostram que a ramificação excessiva pode resultar

em formação ruim (formação excessiva de camadas e proliferação de ramificações na camada superior, respectivamente). Isto pode ser evitado com maior atenção aos estágios iniciais de treinamento (Figura 55F)) e poda na fase posterior (Figura 55C) e G)).



Figura 55: Para manter ou restaurar uma estrutura adequada, as áreas saturadas das copas devem ser limpas, removendo-se ramos em excesso ou posicionados de maneira inadequada.

7.2 O modelo de treinamento da maçã

O desempenho de sistemas de cultivo de maçã aumentou consideravelmente ao longo dos últimos 50 anos. Isto se deve à adoção de uma formação com um eixo central no porta-enxerto M9 em densidades de 2000 a 4000 árvores/ha pela maioria dos produtores na Europa ocidental e à alta qualidade de material vegetal fornecida pelos viveiros especializados (Figuras 56 e 57).



Figura 56: Macieiras em sua primeira etapa de crescimento. Ramos laterais que se desenvolveram no viveiro estão prontos para frutificar no próximo ano. Quase nenhuma poda é necessária após a primeira etapa de crescimento já que a formação final da árvore já é determinada durante o processo de treinamento no viveiro. O rendimento no segundo ano fica geralmente entre 5 e 8 kg/árvore, o que corresponde, mais ou menos, a 15.000 kg/ha com uma densidade de 2500 árvores/ha.



Figura 57: Estrutura da macieira baseada em dois ramos (esquerda); graças ao formato em V, o caule duplo foi capaz de produzir um rendimento muito alto e de alta qualidade, com 2000-2500 árvores/ha (direita).

Com base nos resultados com as lavouras de maçã, nosso objetivo foi implementar as mesmas ideias em lavouras de cacau. A maioria dos cacauzeiros jovens desenvolvem sua estrutura principal a partir de 2 ramos iniciais e, devido à falta de seleção, os ramos laterais que derivam dos 2 ramos principais se desenvolvem em espaços livres, resultando em copas muito heterogêneas. Os 2 ramos principais são equivalentes em força, enquanto que os outros mostram muita heterogeneidade.

7.3 Possíveis futuros designs de plantações e arquiteturas arbóreas

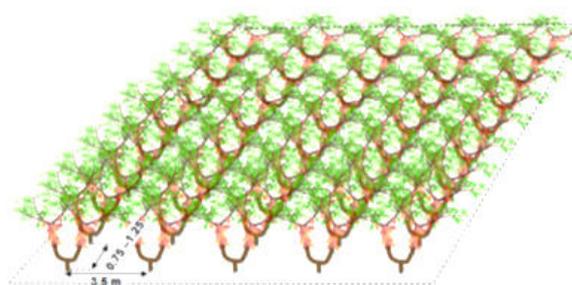
O design das lavouras determina sua produtividade e eficiência em termos de rendimento, força de trabalho e proteção fitossanitária. Como o cultivo de cacau é muito trabalhoso, o design da lavoura deve receber especial atenção.

Os objetivos dos novos designs são:

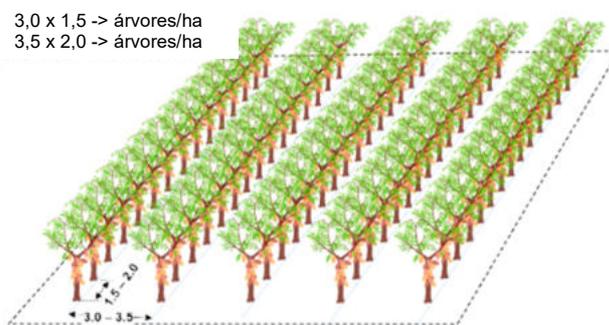
- Exploração boa e regular da luz solar e proteção das plantas contra a exposição excessiva ao sol e, como consequência, rendimentos maiores e mais regulares.
- Facilitar o trabalho para a poda e colheita (boa acessibilidade)
- Aplicação eficiente de produtos fitossanitários.

De acordo com a nossa experiência, os cacaueiros geralmente formam dois caules principais por si sós, o que poderia ser uma primeira abordagem para a arquitetura futura da árvore (Figura 58).

Design com 2 ramos principais



1 ramo principal



3,0 x 1,5 -> árvores/ha
3,5 x 2,0 -> árvores/ha

Figura 58: Design das lavouras de cacau construídas com árvores com um ou dois caules principais.

De acordo com os experimentos no Brasil, as densidades ideais parecem ficar em torno de 2000 árvores/ha. Portanto, árvores com dois caules podem ser plantadas a cada 3,5m (distância entre as fileiras) x 1,5m (distância dentro das fileiras), o que resultará em 1904 árvores/ha. Estas observações de campo estão de acordo com as simulações feitas com o modelo de lavoura de cacau "CocoaFlo" (Audrey E. e Lecoeur J. in prep.) (Figura 59).

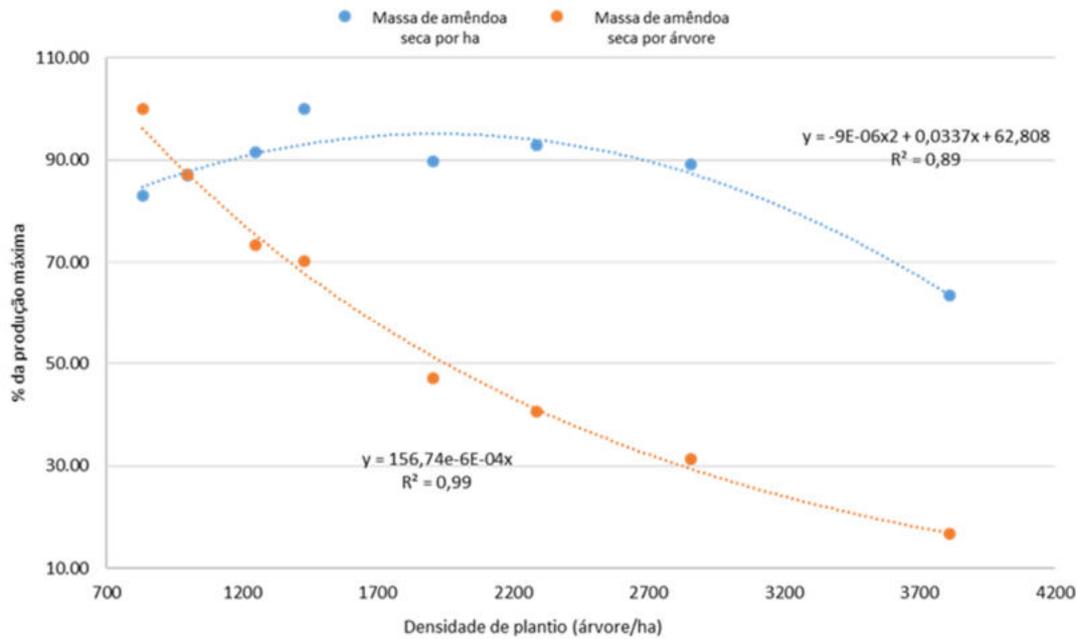


Figura 59: Efeito previsto da densidade de plantio do cacau sobre a produção de amêndoa seca no nível da árvore ou da lavoura.

As variedades plantadas sobre o porta-enxerto usual "Parazinho" mostram um crescimento vigoroso. Mesmo com uma densidade de 1200 árvores/ha, as árvores de cultivares como CCN51 ou Salobrinho 03 fecharam as fileiras após 2-4 anos. Isto mostra claramente a limitação da densificação com os porta-enxertos e cultivares disponíveis atualmente. Outros modelos de lavoura, como as de alta densidade de árvores com um único ramo, são possíveis. Entretanto, sua eficiência é desconhecida no momento.

Devido ao comportamento natural do seu desenvolvimento, a arquitetura da árvore deve ser determinada no viveiro. Não deve ser realizado o plantio de árvores com pré-formação ruim. Atualmente, leva-se entre 4 e 5 meses para preparar um porta-enxerto. Após o plantio, as mudas precisam permanecer no viveiro de 30 a 50 dias. Ao invés de manter as mudas em pequenos contêineres no viveiro por apenas 2 meses, elas devem ser mantidas ali por cerca de 5 meses antes do plantio no campo. Para fazer isso, é necessário um contêiner maior para o desenvolvimento adequado do sistema radicular, sendo assim, as plantas precisam ser replantadas em contêineres de cerca de 5 litros (Figura 60). Os primeiros experimentos mostraram resultados muito bons para a manutenção das plantas no viveiro por mais tempo.



Figura 60: Contêineres pequenos (esquerda) são adequados para manter as plantas por cerca de 2 meses. Depois disto, elas precisam ser plantadas em contêineres de 3-5 litros (direita).

O cuidado com a muda no viveiro por mais tempo resulta em maiores custos e afirma-se que o contato da planta com o solo no campo favorece o seu desenvolvimento, ou seja, menos tempo no viveiro, embora isto já tenha sido desmentido. Ainda assim, é mais vantajoso ter uma muda mais forte (Figuras 61 a 63) com uma arquitetura pré-formada do que uma muda fraca, não pré-selecionada (Figura 63). As formações das árvores estão descritas na Figura 63.



Figura 61: Árvore com dois ramos principais treinada no viveiro.



Figura 62: Árvores com um, dois e múltiplos ramos em Macacos, no Ceará plantadas com uma densidade de 2200 árvores/ha.

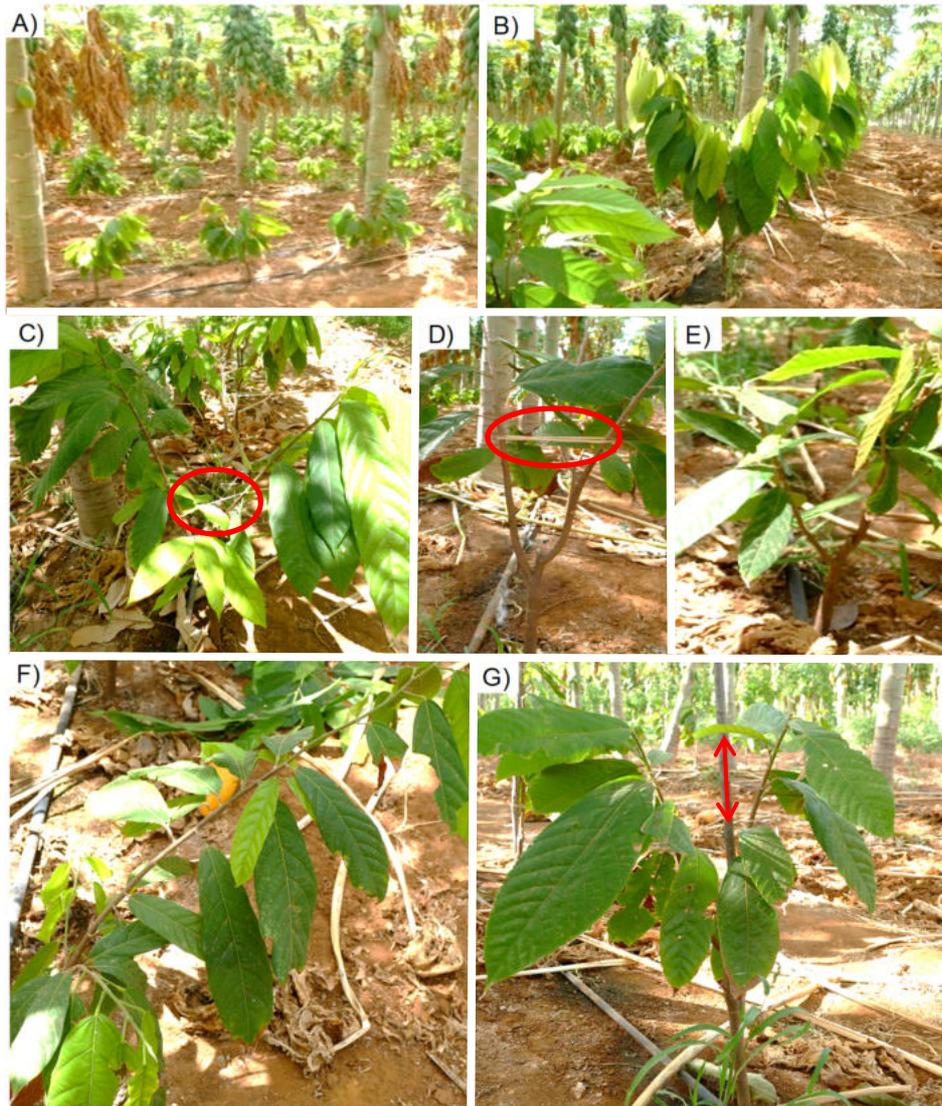


Figura 63: Primeira lavoura experimental com ambas as formações (caule duplo e único, respectivamente). A) - E) e F) - G) em diferentes densidades de plantio, ou seja, 1420 - 2850 árvores/ha. O sombreamento feito com mamoeiros resultou em um microclima com luminosidade ideal (A) e o bom manejo geral resultou em crescimento inicial bastante homogêneo. Diferenças no hábito arbóreo dos diferentes cultivares levaram à poda adaptada e suporte para o início da formação de estruturas primárias balanceadas. Algumas plantas produziram 2 elementos naturalmente bem balanceados com o ângulo correto (B) enquanto outras precisaram de suporte com um elástico (círculo vermelho) (C). Poda e suporte de ambos os ramos jovens (círculo vermelho) (D) foram necessários por vezes para evitar inclinação excessiva. Embora os cacauzeiros jovens produzam, em geral, ramos com vigor equivalente quando seu número não excede 2, não foi fácil encontrar a solução correta no caso de vigor desigual, como mostrado na figura (E). A maioria das plântulas que seriam treinadas como árvores de caule único não cresceu para se adaptar à direção vertical (F) e necessitou de poda e suporte de uma estaca de madeira (seta vermelha) (G).

7.4 Proteção das árvores jovens do excesso de luz solar

As árvores jovens são sensíveis à luz solar direta, especialmente quando combinada com exposição ao vento, altas temperaturas e baixa umidade do ar. Diversos experimentos de campo no clima semiárido mostraram que as árvores precisam estar bem protegidas durante os dois primeiros anos de crescimento. Após os dois anos, as plantas atingem o status de adultas e são capazes de construir uma camada de folhas para sua própria proteção. O mamoeiro (*Carica papaya*) parece ser uma cultura adequada para o sombreamento nos primeiros dois anos. Seu longo caule e copa em forma de guarda-chuva cria o sombreamento ideal para os cacauzeiros jovens (Figura 64). Conforme mostrado, a plantação dos mamoeiros a cerca de 50 cm das fileiras de cacau com uma distância de plantio entre eles de 1-3 m funciona bem. O sombreamento também é possível usando-se bananeiras (*Musa acuminata*) ou mandioca (*Manihot esculenta*). No caso das bananeiras, o controle destas plantas de forte crescimento, bem como sua remoção,

pode ser um desafio. Para facilitar sua remoção, as bananeiras devem ser plantadas fora da fileira de cacau. Isto também possibilita o corte manual repetido ou por picadora. Recomenda-se uma distância de 3 m entre as bananeiras.

A combinação de duas lavouras pode resultar em renda extra e, em alguns casos, favorecer a proteção ambiental.

Vantagens do mamoeiro

- Crescimento rápido.
- Plantio 2 meses antes do plantio das mudas de cacau.
- Ciclo de vida de 2 a 3 anos.
- Consome menos água que outras lavouras temporárias.
- Fácil remoção.
- Cria uma boa sombra.

Desvantagens do mamoeiro:

- Sensível a vírus.



Vantagens da bananeira:

- Crescimento rápido.
- Plantio 4 meses antes do plantio das mudas de cacau.
- Semiperene.

Desvantagens da bananeira:

- Dificil controle e remoção
- Competição por água e nutrientes.



Figura 64: Mamoeiro e bananeira podem ser usados para sombrear as árvores jovens. Em vez de fileiras duplas como na imagem, uma única fileira de bananeiras é suficiente para proteger o cacau.

8 Inovação digital para a geração de conhecimento e apoio à decisão na agricultura

Até hoje, quase não foram usados dados ambientais ou de lavouras no manejo do cacau. A quantificação das condições de cultivo e do comportamento das plantas possibilitará um refinamento do sistema de cultivo. Redes de sensores oferecem um potencial para melhoria dos sistemas de cultivo futuros.

8.1 Agronomeet – plataforma em nuvem para a agricultura de precisão

Para atender os requisitos dos experimentos com o cacau e para possibilitar uma aplicação futura pelos fazendeiros, o projeto EnvEve SA desenvolveu uma nova plataforma digital em nuvem: Agronomeet. Hoje, a Agronomeet é um sistema de última geração para o manejo agrícola, usada e validada por diversos clientes. Este exemplo de aprendizado oferece novas ideias sobre o sistema de cultivo agrícola e libera seu potencial para, por exemplo, o controle de pragas e predição de doenças ou modelos de irrigação. A Agronomeet é um software em nuvem disponível como interface web e APP no Google Play. Diferentes usuários (cooperativas, serviços de extensão agrícola, fazendeiros, agrônomos, agropesquisadores, usuários corporativos) podem fazer o upload de seus dados para a nuvem da Agronomeet para armazená-los, processá-los, compartilhar dados de economia e receber apoio à decisão.

A Agronomeet é interoperável com qualquer sensor IoT - Internet das Coisas (traduzindo do inglês) ou estação meteorológica. Combinando modelos avançados de cultivo, irrigação e pragas, a Agronomeet é desenhada para que pesquisadores e agrônomos a usem como uma plataforma para a modelagem e integração do processamento de dados dentro de seus próprios projetos. Além dos fazendeiros, estes especialistas são um pilar importante para a adoção da Agronomeet. Os dois exemplos de manejo de pragas de macieiras e o sistema de irrigação automatizado para o cacau são produtos da Agronomeet disponíveis comercialmente, que são facilmente aplicáveis a qualquer cultura.

8.2 Sistemas de sensores – integração de hardware e “sensores humanos”

A interoperabilidade da plataforma digital Agronomeet, que significa fácil integração de diferentes tipos e marcas de sensores, permitiu conjuntos de dados completamente integrados com custo razoável. A infraestrutura existente foi integrada em pouco tempo. Em seguida, os seguintes sensores (Tabela 3) foram instalados nos diversos locais de teste e integrados à plataforma digital Agronomeet.

Tabela 3: Sensores usados para o monitoramento do campo de cacau em Juazeiro.

Sensor	Parâmetro
Sensirion SHT75, Sensirion, Stäfa, CH	Temperatura e umidade do ar
Apogee SP212, Apogee, Logan, USA	Piranômetro, radiação solar
Davis 6410 Anemometer, Davis, Hayward, USA	Velocidade e direção do vento
Watermark, Irrometer, Riverside, USA	Teor de umidade do solo
Megatron, MSLPT 25, Megatron, Allinges, FR	Dendrômetro, diâmetro caulinar
Arad SF15, Arad, Dalia, IR	Medidor de vazão para a água de irrigação
Solenoides, Arad	Válvula elétrica para controlar a irrigação
DavisRain DS3_, SB104-0, Rain Collector, Hayward, USA	Quantidade de precipitação (mm)

Além disso, dados foram coletados manualmente através de um aplicativo fácil de usar, em conjunto com uma opção offline, que também alimenta a plataforma digital. Estes dados coletados manualmente são

considerados como dados de "sensores humanos", que complementam perfeitamente os dados capturados automaticamente por sensores instalados dentro do sistema de cultivo (Figura 65 e 66). É possível seguir o crescimento da planta com o uso do sensor do dendrômetro que envia dados para a nuvem. A Figura 67 mostra um exemplo de como este tipo de dado processado pode ser visualizado na plataforma. A Figura 68 mostra sistemas usados para a irrigação automática.



Figura 65: Esquerda: Estação meteorológica: velocidade e direção do vento, pluviometria, temperatura e umidade do ar e antena de RF. Direita: Conexão com o modem e internet.



Figura 66: Dendrômetro Megatron (potenciômetro linear, fixação construída pela Agroscope).

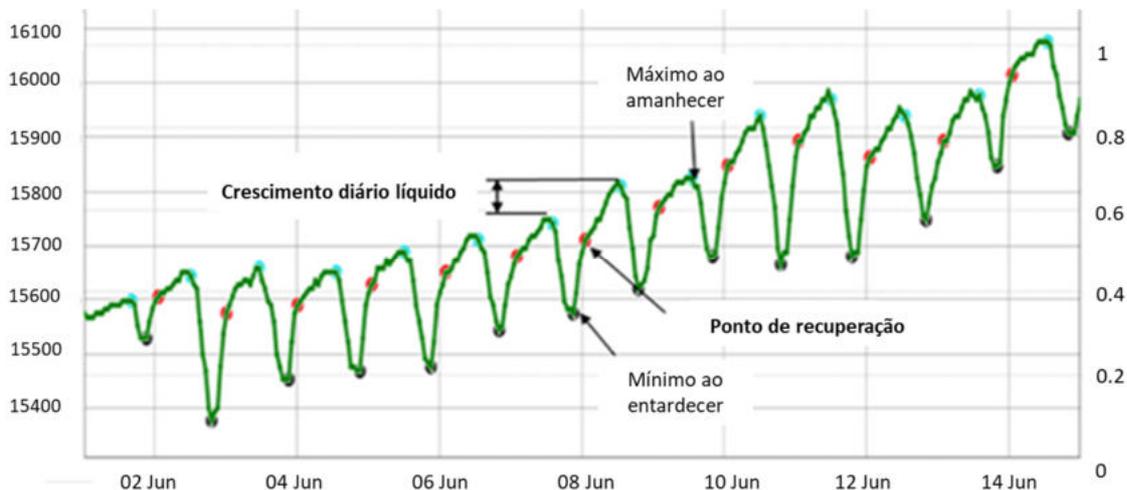


Figura 67: O gráfico fornecido pela plataforma evidencia as fases críticas do crescimento na escala do dia. O encolhimento diário está em "azul" - "preto" e o crescimento líquido diário está em "azul" - "azul do dia anterior".



Figura 68: Medidor de fluxo e válvulas elétricas para a irrigação automatizada.

8.3 Dados em tempo real melhoram o apoio à decisão, a gestão e o compartilhamento de conhecimento

Os insights sobre o comportamento da planta ganhos com a coleta de dados digitais em tempo real, como por exemplo, monitoramento do clima, umidade do solo, crescimento e respiração da planta, se mostraram cruciais para a melhoria dos sistemas de cultivo do cacau neste novo contexto. Aplicativos para desktop e dispositivos móveis ofereceram acesso ao desempenho da lavoura a qualquer momento e proporcionaram a base para melhorias nas práticas de irrigação, economizando grandes quantidades de água e melhor produtividade (Figura 69). Os medidores de vazão e solenóides foram usados para controlar e automatizar a irrigação (Figura 68). A experiência durante os três anos de projeto revelaram que esta tecnologia proporcionou uma economia substancial de água, já que o excesso de água não é facilmente identificado visualmente.

Os dendrômetros permitiram a medição do crescimento caulinar e indicaram árvores em condição de estresse. Eles proporcionaram insights sobre os ritmos de crescimento da planta. Como os dendrômetros são muito sensíveis e precisam de muita manutenção, eles são usados principalmente para a pesquisa. Eles ainda precisam ser melhor desenvolvidos para permitir seu uso em fazendas. Entretanto, uma vez que seu manuseio e a análise de dados esteja mais padronizada, estas ferramentas oferecerão um potencial para a otimização do manejo da fazenda.

Respostas sólidas dos dados requerem uma validação rigorosa antes da série de dados ser criada. Para a Agronomeet, os dados heterogêneos recebidos passam por um processo automatizado:

- Coleta de dados (campo - humanos ou sensores).
- Upload dos dados para a nuvem.
- Dados brutos são gerados e atualizados automaticamente.
- O agrônomo pode configurar regras automáticas e verificações de plausibilidade para criar a série de dados usada e apresentada na Agronomeet. Eles podem voltar aos dados brutos a qualquer momento para verificações de plausibilidade individuais.
- A série de dados é criada a partir dos dados brutos, usando os filtros configurados pelo agrônomo. Se nenhum filtro estiver configurado, os dados brutos serão iguais à série de dados correspondente.

As tecnologias digitais podem levar à inovação na agricultura. A Agronomeet combina a interoperabilidade dos sensores com a análise e modelagem de dados. A plataforma oferece apoio à decisão e permite compartilhar o conhecimento de melhores práticas no manejo da lavoura. O projeto atual demonstra que o monitoramento automatizado da umidade do solo e da irrigação permite economizar uma quantidade considerável de água, o que é crítico em regiões semiáridas. Isto pode preparar os sistemas agrônômicos para as secas previstas com as alterações climáticas. Além disso, o projeto mostrou que a combinação de dados de diferentes fontes (Figura 70), como de dendrômetros, umidade do solo e estações meteorológicas, analisados com métodos de aprendizado de máquina, permitirá a otimização do manejo da lavoura.

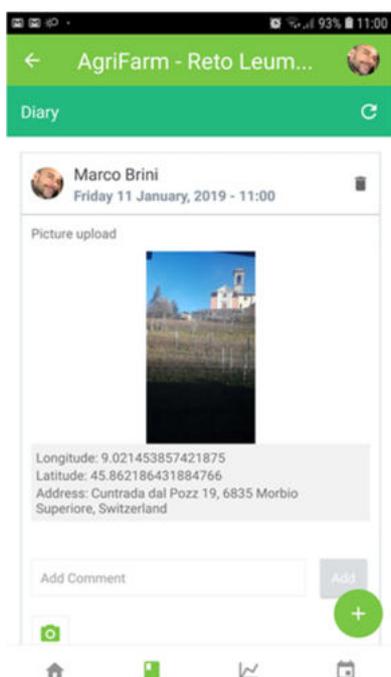


Figura 69: Função offline do app para smartphone da Agronomeet. 1. No campo sem conexão com a internet, os dados são baixados para um smartphone através de um aplicativo. 2. Assim que a conexão com a internet é restabelecida, o smartphone envia os dados para o servidor.

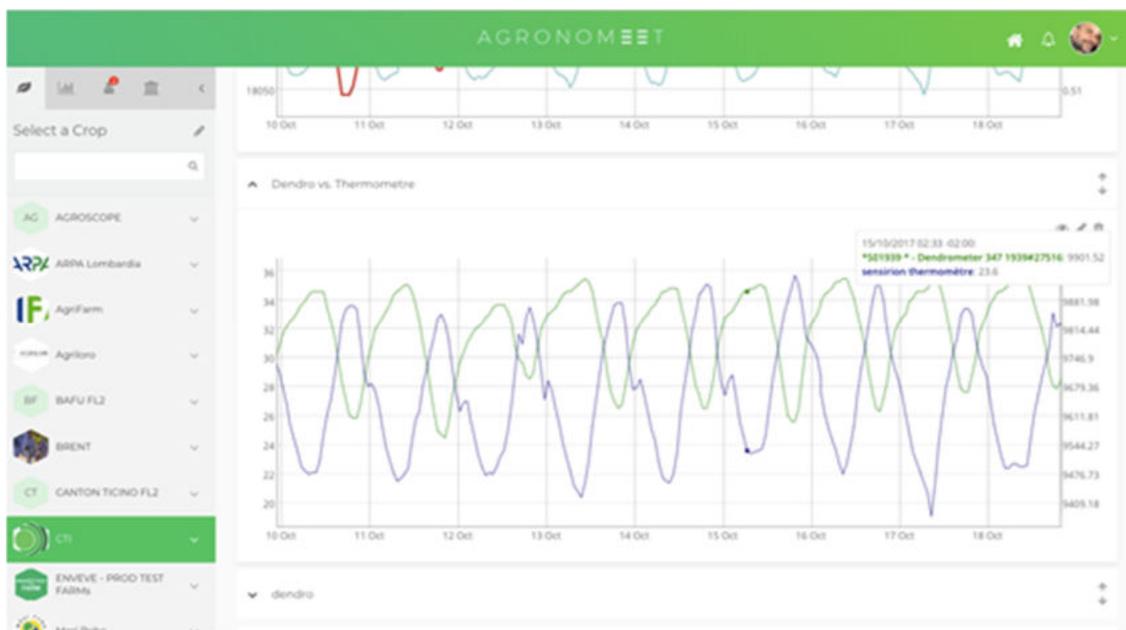


Figura 70: A Agronomeet é uma plataforma validada para a agricultura digital, oferecendo a coleta de dados em tempo real e análises avançadas para o apoio à decisão.

9 Agradecimentos

Agradecemos Paul Steffen e Bernard Lehmann pelas ideias desenvolvidas na viagem à Costa do Marfim. Realizamos estas ideias neste projeto. Em nossas mãos, finalmente temos o resultado: O Manual do Cacau. Agradecemos a Innosuisse, Nestlé e Syngenta por financiar este projeto.

Gostaríamos de agradecer a todos os nossos parceiros por seu compromisso e cooperação.

Virginie Moser, Erika Györvary e Martin Seneclauze da CSEM por contribuir com sua expertise em análise de dados e aprendizado de máquina.

Gostaríamos de agradecer todas as fazendas participantes por sua hospitalidade. Além disso, seu apoio técnico e logístico foi essencial para conduzir este projeto:

Wellington Passos Oliveira por coletar os dados para o desenvolvimento deste projeto.

A fazenda Ibacem, em particular Nelson e Nelsinho Costa por estabelecer uma fazenda de cacau no semiárido. Sílvio Sancler e William Nascimento pela assistência essencial.

Dona Neide por nos oferecer suas deliciosas refeições durante nossa estadia.

A todos os outros funcionários que contribuíram para o sucesso deste projeto.

A empresa Agrícola Famosa, Richard Müller e Carlos Roberto por seu inestimável apoio nos experimentos na fazenda Macacos além do engenheiro agrônomo Bernardo Ehle, por seu notável conhecimento.

Marivaldo Nascimento Nunes e sua esposa “Mira” por estabelecer um novo experimento de densidade em sua fazenda e contribuir com seu conhecimento sobre o cacau.

Obrigada às fazendas da Gabrielli por seu apoio técnico e logístico e por sua hospitalidade.

10 Lista de Figuras

Figura 1:Localização das fazendas no Brasil. A localização de cada fazenda está indicada por pontos coloridos no mapa (à esquerda), correspondendo aos pontos coloridos nas fotos (à direita).....	10
Figura 2: Falta de homogeneidade dentro das lavouras de cacau depende do manejo da lavoura, fatores ambientais (luz, microclima) e genótipos. As fotos mostram:.....	12
Figura 3A): Média \pm DP do rendimento em amêndoa seca de cacau entre 1961 e 2014 (barras pretas) e média \pm PD de rendimento potencial técnico observado (barras verdes) para 10 países usados para validação do modelo. B): Localização e variabilidade de rendimento de 1961 a 2014 para os 1200 pontos de dados coletados da literatura (Etienne and Lecoeur 2019).....	13
Figura 4: Lavoura de cacau a pleno sol no sul da Bahia.....	14
Figura 5: Sistema tradicional de cultivo do cacauzeiro (Cabruca) com árvores de sombreamento no sul da Bahia.....	15
Figura 6: Quebra-ventos estabelecidos por eucalipto.....	16
Figura 7: Folhas danificadas pelo vento em uma área não protegida (à esquerda). As folhas estão praticamente intactas na área protegida por um quebra-vento alto de eucaliptos (à direita).....	17
Figura 8: Amostra de folhas danificadas pelo vento na área não protegida (à esquerda). As folhas estão praticamente intactas na área protegida (à direita).....	17
Figura 9: Precipitação mensal na região semiárida de Petrolina, na fazenda Juazeiro (medidas próprias) e na região úmida de Ilhéus (Anonym, 2019).....	18
Figura 10: ET_0 da região semiárida em Juazeiro e na região úmida de Ilhéus de 2016 a 2018.....	19
Figura 11: Umidade do ar diária média da fazenda em Juazeiro e da fazenda em Ilhéus entre novembro de 2016 e outubro de 2017.....	19
Figura 12 Folhas da primeira camada são queimadas rapidamente pelo sol. Os frutos também são muito sensíveis à radiação solar direta, que pode danificá-los, e atuam como sombreamento das próprias árvores.....	20
Figura 13: Cacauzeiros protegidos por sombrite com capacidade de absorção de 30% da luz solar.....	21
Figura 14: A) Déficit hídrico da planta (μm) em áreas sombreadas e não sombreadas (pleno sol), calculado a partir dos dados do dendrômetro, de acordo com Zweifel et al. 2016. B) ET_0 medida em parcelas a pleno sol (mm/dia) em Juazeiro, Bahia, BR.....	21
Figura 15: Árvores em áreas sombreadas tiveram maiores taxas de vingamento que a pleno sol.....	22
Figura 16: Rendimento em amêndoa seca de áreas não sombreadas (pleno sol) contra áreas sombreadas e protegidas do vento (Quebra-vento/sombreamento) em Juazeiro para as principais colheitas de 2017 e 2018.....	22
Figura 17: Evolução da área foliar do cacauzeiro desde o lançamento até o desenvolvimento completo. De acordo com seu estágio de desenvolvimento, as folhas podem ser classificadas em quatro tipos.....	23
Figura 18: Curva de resposta da fotossíntese à luz de quatro tipos diferentes de folhas de cacauzeiro cultivado em estufa. Tipo 1 = recém lançadas - tipo 4 = totalmente desenvolvida (ver Figura 17).....	23
Figura 19: Efeito previsto do nível de sombreamento na produção da lavoura de cacau (Cálculo feito com o modelo de cultivo "Cocoa Flo", E. Audrey, Syngenta).....	24
Figura 20: Perfil de solo em Juazeiro. O crescimento radicular fica concentrado nos primeiros 20 cm. Quase não são encontradas raízes abaixo de 30 cm.....	25
Figura 21 A irrigação por gotejamento determina a formação de raízes finas, que são encontradas apenas sob as linhas de gotejamento. A formação de uma raiz pivotante é inibida pela compactação do subsolo.....	25
Figura 22: Dendrômetro medindo a variação do diâmetro caulinar de um ramo principal da árvore.....	26
Figura 23: Vários tipos de índices podem ser usados para representar o crescimento e o estresse hídrico, tais como o Crescimento Diário ($CD = \text{valor máx Dia}+1 - \text{valor máx dia}$) ou Encolhimento Diário ($ED = \text{valor máx AM} - \text{valor mín PM}$).....	26
Figura 24: Monitoramento do crescimento durante um período de 15 dias, mostrando as fases alternadas de expansão foliar (áreas circundadas pela linha verde) e de lançamentos (linha vermelha). A figura à direita ilustra a diferença de tamanho entre as folhas jovens (avermelhadas) e as folhas completamente desenvolvidas, o que pode explicar parcialmente o rápido aumento de biomassa refletido na curva durante a fase de expansão foliar.....	27
Figura 25: A) Expansão do raio caulinar irreversível induzida por crescimento (linha laranja) e crescimento do raio caulinar cumulativo (linha azul) de uma árvore. B) Intensidade dos lançamentos (0 = sem lançamentos - 3 = lançamento completo). Áreas em cinza mostram estagnação do crescimento caulinar (23 árvores).....	27

Figura 26: Crescimento diário líquido do caule (micrômetros) para as diferentes classes de densidade de lançamento (expressa em % da área foliar total). As letras comparam as diferenças entre as densidades de lançamento ($p < 0,05$, $n = 23$ árvores).....	28
Figura 27: Lançamento foliar e intensidade da floração (estimativa visual 1 = baixa - 3 = alta) e evapotranspiração de referência(ET_0) de 54 árvores da variedade CCN51 durante 2017-2018.....	29
Figura 28: Padrão de floração ao longo da estação de crescimento para árvores em área sombreada e a pleno sol do cultivar CCN51. Umidade relativa do ar (média diária em %) medida em parcelas a pleno sol....	29
Figura 29: Estimativa visual do número de frutos saudáveis e abortados por árvore ($n = 54$ árvores) de CCN51 em relação ao lançamento durante 2017-2018.....	30
Figura 30: A) Comprimento dos frutos abortados mostrando o estágio final do aborto em cerca de 15 cm. B) Comprimento normalizado do fruto em função da idade do fruto expresso em graus de crescimento. Estes dados são referentes ao cultivar CCN51.....	30
Figura 31: Os frutos pequenos abortados foram todos bem polinizados.....	31
Figura 32: Uma taxa bastante alta de pecos no CP49 no semiárido da fazenda Ibacem.....	32
Figura 33: Folhas maduras do cacauero mostrando a densidade particularmente alta de estômatos mencionada pelos autores.....	33
Figura 34: Instalação de sensores de umidade de solo para controlar a irrigação. Para cada parcela, devem ser instalados 3 sensores a 20 cm e 3 sensores a 40 cm para que se obtenha uma boa representação da quantidade de irrigação.....	34
Figura 35: Esquema da vista transversal da distribuição de água produzida por um único gotejador. À esquerda, imagem típica de irrigação em excesso levando ao acúmulo de água no fundo da camada superior. Consequentemente, a curva de sensores a 40 cm retorna solo saturado constantemente (0 KPa). À direita, as curvas refletem a situação correta sem risco de alagamento.....	35
Figura 36: Exemplo de um período de 6 semanas de irrigação aplicado à lavoura de cacau na fazenda de Juazeiro conduzido de acordo com a umidade do solo. Para manter a umidade do solo dentro de uma faixa aceitável, a configuração do programador foi ajustada toda semana.....	35
Figura 37: Encolhimento diário (ED) extraído da curva dos dendrômetros (azul) e o diâmetro caulinar (verde). Setas vermelhas indicam uma correlação entre a estagnação do crescimento caulinar e o aumento constante do encolhimento diário, e o círculo vermelho indica um possível déficit hídrico.....	36
Figura 38: Relação entre o déficit hídrico máximo diário na árvore e a ET_0 diária (A) durante o período de lançamento e (B) durante o período de crescimento caulinar para o cultivar CCN51.....	37
Figura 39: Mesma árvore sem estresse hídrico (esquerda) e com estresse hídrico em 180 cbar de umidade do solo (direita).....	37
Figura 40: Evolução da umidade do solo nas profundidades de 20 e 40 cm (à esquerda). Diâmetro caulinar de 3 árvores: D550, D548, D547 (μm) durante um período sem irrigação de 4 de julho a 12 de julho de 2018.....	38
Figura 41: Alagamento pode causar grandes danos, desde crescimento baixo até a perda total dos frutos...39	39
Figura 42: Vigor bastante alto das árvores da variedade CCN51 após 4 anos do plantio.....	40
Figura 43: Fungo <i>Lasiodiplodia theobromae</i> nos frutos (esquerda). Características e sintomas da morte descendente causada pelo fungo <i>Lasiodiplodia</i> (direita).....	41
Figura 44: Plantas afetadas pelo fungo da murcha de <i>Ceratocystis</i> (mal do facão), que ocorre devido às lesões causadas nas plantas pelos insetos.....	42
Figura 45: Cochineal (<i>Planococcus citri</i>) vivendo em mutualismo com a formiga "pixixica" <i>Wasmannia auropunctata</i>	42
Figura 46: Sintomas causados pelo inseto THRYPIDAE <i>Selenothrips rubrocinctus</i> - Cocoa thrips. O ataque deste inseto é mais intenso com a ausência do sombreamento, seca prolongada e presença de folhas parcialmente maduras.....	43
Figura 47: Rendimento em amêndoas secas (kg/ha) de 5 diferentes variedades em Juazeiro de outubro de 2017 a setembro de 2018. (Média de 4 parcelas com 10 árvores em cada).....	44
Figura 48: Colheitas únicas e seus rendimentos (kg/ha) em Juazeiro em 2017 e 2018.....	44
Figura 49: Treinamento de árvores jovens logo após seu crescimento inicial na lavoura. Para obter a "forma de vaso" clássica baseada em 3-4 estruturas principais.....	46
Figura 50: Um caso muito comum com 2 gemas crescendo vigorosamente e, portanto, elas mesmas produzindo diversos ramos laterais fortes.....	46
Figura 51: Apenas 1 caule vertical vigoroso, que desenvolveu 3 treinamentos iniciais de ramos laterais, deve ser adaptado à ampla diversidade de morfologias de mudas devido à pré-formação não padronizada nos viveiros.....	46
Figura 52: O encurtamento de lançamentos (A) ou ramos (B) é útil para a obtenção da ramificação adequada durante a fase de formação de árvores jovens.....	47

Figura 53: Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) medida sob o dossel de uma única formação vertical (A) e um sistema de treinamento em V (B). A RFA interceptada é a diferença entre o total disponível (100%) e a média das medições a cada 50 cm em uma linha perpendicular à fileira de árvores durante um período de 24 horas.....47

Figura 54: Assim que a formação inicial esteja completa, a poda adequada é aplicada, considerando as características fenotípicas.....49

Figura 55: Para manter ou restaurar uma estrutura adequada, as áreas saturadas das copas devem ser limpas, removendo-se ramos em excesso ou posicionados de maneira inadequada.....50

Figura 56: Macieiras em sua primeira etapa de crescimento. Ramos laterais que se desenvolveram no viveiro estão prontos para frutificar no próximo ano. Quase nenhuma poda é necessária após a primeira etapa de crescimento já que a formação final da árvore já é determinada durante o processo de treinamento no viveiro. O rendimento no segundo ano fica geralmente entre 5 e 8 kg/árvore, o que corresponde, mais ou menos, a 15.000 kg/ha com uma densidade de 2500 árvores/ha.....51

Figura 57: Estrutura da macieira baseada em dois ramos (esquerda); graças ao formato em V, o caule duplo foi capaz de produzir um rendimento muito alto e de alta qualidade, com 2000-2500 árvores/ha (direita)...51

Figura 58: Design das lavouras de cacau construídas com árvores com um ou dois caules principais.....52

Figura 59: Efeito previsto da densidade de plantio do cacau sobre a produção de amêndoa seca no nível da árvore ou da lavoura.....53

Figura 60: Contêineres pequenos (esquerda) são adequados para manter as plantas por cerca de 2 meses. Depois disto, elas precisam ser plantadas em contêineres de 3-5 litros (direita).....54

Figura 61: Árvore com dois ramos principais treinada no viveiro.....54

Figura 62: Árvores com um, dois e múltiplos ramos em Macacos, no Ceará plantadas com uma densidade de 2200 árvores/ha.....54

Figura 63: : Primeira lavoura experimental com ambas as formações (caule duplo e único, respectivamente). A) - E) e F) - G) em diferentes densidades de plantio, ou seja, 1420 - 2850 árvores/ha. O sombreamento feito com mamoeiros resultou em um microclima com luminosidade ideal (A) e o bom manejo geral resultou em crescimento inicial bastante homogêneo. Diferenças no hábito arbóreo dos diferentes cultivares levaram à poda adaptada e suporte para o início da formação de estruturas primárias balanceadas. Algumas plantas produziram 2 elementos naturalmente bem balanceados com o ângulo correto (B) enquanto outras precisaram de suporte com um elástico (círculo vermelho) (C). Poda e suporte de ambos os ramos jovens (círculo vermelho) (D) foram necessários por vezes para evitar inclinação excessiva. Embora os cacauzeiros jovens produzam, em geral, ramos com vigor equivalente quando seu número não excede 2, não foi fácil encontrar a solução correta no caso de vigor desigual, como mostrado na figura (E). A maioria das plântulas que seriam treinadas como árvores de caule único não cresceu para se adaptar à direção vertical (F) e necessitou de poda e suporte de uma estaca de madeira (seta vermelha) (G).....55

Figura 64: Mamoeiro e bananeira podem ser usados para sombrear as árvores jovens. Em vez de fileiras duplas como na imagem, uma única fileira de bananeiras é suficiente para proteger o cacauzeiro.....56

Figura 65: Esquerda: Estação meteorológica: velocidade e direção do vento, pluviometria, temperatura e umidade do ar e antena de RF. Direita: Conexão com o modem e internet.....58

Figura 66: Dendrômetro Megatron (potenciômetro linear, fixação construída pela Agroscope).....58

Figura 67: O gráfico fornecido pela plataforma evidencia as fases críticas do crescimento na escala do dia. O encolhimento diário está em "azul" - "preto" e o crescimento líquido diário está em "azul" - "azul do dia anterior".....58

Figura 68: Medidor de fluxo e válvulas elétricas para a irrigação automatizada.....59

Figura 69: Função offline do app para smartphone da Agronomeet. 1. No campo sem conexão com a internet, os dados são baixados para um smartphone através de um aplicativo. 2. Assim que a conexão com a internet é restabelecida, o smartphone envia os dados para o servidor.....60

Figura 70: A Agronomeet é uma plataforma validada para a agricultura digital, oferecendo a coleta de dados em tempo real e análises avançadas para o apoio à decisão.....60

11 Lista de Tabelas

Tabela 1: Redução da velocidade do vento em área abrigada em diversas distâncias a barlavento e sotavento de cortinas de abrigo com diferentes densidades ópticas no meio-oeste dos EUA. As reduções são expressas como porcentagem da velocidade do vento em campo aberto. Assume-se a velocidade do vento em campo aberto como sendo menor que 10 metros por segundo, e a distância do quebra-vento é expressa em termos de um múltiplo da altura do quebra-vento (H) (Brandle et al. 2014).....	15
Tabela 2: Diretrizes de nutrientes. A) Brazil BA, com base na densidade de 1300 árvores/ha (Cabala Rosand et al. em De Geus, 1973) B) Com base no dobro da quantidade de nutrientes removida pela lavoura (Von Uexküll e Cohen1980).....	40
Tabela 3: Sensores usados para o monitoramento do campo de cacau em Juazeiro.....	57

12 Referências

- Agrolink – disponível em: https://www.agrolink.com.br/problemas/cochonilhaabranca_333.html acesso em: 23.01.2019.
- Agrolink - disponível em: https://www.agrolink.com.br/problemas/tripes_407.html acesso em: 23.01.2019.
- Ahenkorah Y., Halm B., Appiah M., Akrofi G. u. Yirenyi J., 1987: Twenty years results from a shade and fertilizer trial on Amazon cocoa (*Theobroma cacao*) in Ghana. *Experimental agriculture*, **23**, 1, S. 31-39.
- Alban Kacou Antoine, M., Elain Apshara, S., Hebbar, K.B. et al. 2016 Morpho-physiological criteria for assessment of two month old Cocoa (*Theobroma cacao* L.) genotypes for drought tolerance. *Ind J Plant Physiol.* **21**: 23. <https://doi.org/10.1007/s40502-015-0195-y>
- Allen R. G. P., L. S.; Raes, D.; Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements., S. 300.
- Almeida, A. A. F. D., Valle, R. R., 2007. Ecophysiology of the Cacao Tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, **19**(4), 425-448.
- Alvim P., R. Alvim., 1980. Environmental Requirements of Cocoa with Emphasis on Responses to Shade and Moisture Stress. Environmental requirements of cocoa with emphasis on responses to shade and moisture stress., **93**-111.
- Alvim, P. de T., 1977. Cacao. In *Ecophysiology of Tropical Crops*, 279–313 (Ed. T. T. Kozłowski). London, Academic Press.
- Anonym., 2014. Jeder Schweizer isst 12 Kilo Schokolade pro Jahr available in: <https://www.handelszeitung.ch/konjunktur/jeder-schweizer-isst-12-kilo-schokolade-pro-jahr-567557#> last accessed: 04.02.2014.
- Anonym, 2019. Data base of the World Bank Group - available in: <http://sdwebx.worldbank.org/climateportal> last accessed: 23.01.2019.
- Brandle, James R.; Hodges, Laurie; and Zhou, Xinhua H., 2004. Windbreaks in North American Agricultural Systems Agronomy. In *New vistas in agroforestry* (pp. 65-78). Springer, Dordrecht.
- Campbell, R.J., R.P. Marini, and J.B. Birch. 1992. Canopy position affects light response curves for gas exchange characteristics of apple spur leaves. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* **117**:467–472.
- Carr, M. K. V, Lockwood, G., 2011. The Water Relations And Irrigation Requirements Of Cocoa (*Theobroma Cocoa* L.): A Review. *Experimental Agriculture*, **47**(4), 653-676.
- Chepote R. E., Sodr  G. A., Reis E. L., Pacheco R. G., Marrocos P. u. Valle R. R., 2013. Recomendações de corretivos e fertilizantes na cultura do cacauero no sul da Bahia. *Ministério da Agricultura, Pecu ria e Abastecimento, Brazil, Boletim Técnico n 203*. 44p
- Daymond, A. J., Tricker, P. J. and Hadley, P., 2009. Genotypic variation in photosynthetic and leaf traits in Cocoa. Paper presented at the International Cocoa Research Conference, Bali, November 2009.
- De Almeida, J., Tezara, W., & Herrera, A., 2016. Physiological responses to drought and experimental water deficit and waterlogging of four clones of Cocoa (*Theobroma Cocoa* L.) selected for cultivation in Venezuela. *Agricultural Water Management*, **171**, 80-88.
- De Geus, J. G., 1973. Fertilizer guide for the tropics and subtropics. Fertilizer guide for the tropics and subtropics., (Ed. 2).
- Etienne A., Leco ur J., 2019. Cocoa Flo. in prep
- Gomes S. A., Kozłowski T., 1986: The effects of flooding on water relations and growth of *Theobroma Cocoa* var. catongo seedlings. *Journal of horticultural science*, **61**, 2, S. 265-276.
- Götz Schroth, Peter L derach, Armando Isaac Martinez-Valle, Christian Bunn, Laurence Jassogne 2016. Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation, *Science of The Total Environment*. **556**, 231-241

- Hakim S., Hani M., De Meyer J., Nicod C., Pizzarro A. & Werth K., 2014. Apple-producing family farms in south tyrol: an agriculture innovation study. FAO - Innovation in family farming E-ISBN 978-92-5-108366-6, 31 p.
- Hardy F., 1960: Cacao Manual. Inter-America Inst. of Agricultural Sciences. Turrialba, Costa Rica. 395p.
- Henriot C., Monney P., 2003. Mesure de l'indice de surface foliaire et incidence agronomique sur le pommier. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, **35**(4), 223-230.
- Jiska A. van Vliet, Maja Slingerland and Ken E. Giller, 2015. Plant Production Systems Group, Wageningen University. Retrieved December 12, 2018, from <http://edepot.wur.nl/356090>
- Liu Y, Han L, Qin L, Zhao D. 2015. *Saccharomyces cerevisiae* gene TPS1 improves drought tolerance in *Zea mays* L. by increasing the expression of SDD1 and reducing stomatal density. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)* **120**, 779-789.
- Menezes E. A., Barbosa F. R., 2005. Pragas da mangueira: monitoramento, nível de ação e controle. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2005.
- Nair K. P., 2010: The agronomy and economy of important tree crops of the developing world. Elsevier.
- Oliveira M. L.; Luz E.D.M.N., 2005. Identificação e manejo das principais doenças do cacau no Brasil. Ilhéus, CEPLAC/ CEPEC/SEFIT. 132p.
- Owen-Turner, J. and Hardy, S., 2006. "Windbreaks for Citrus." Citrus Fact sheet, CITT group Australia: 15 p
- Pereira A. R., Green, S., Nova N. A. V., 2006. Penman–Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. *Agricultural water management*, **83**(1-2), 153-161.
- Ribeiro M. A. Q., Da Silva J. O., Aitken W. M., Machado R. C. R., Baligar V. C., 2008. Nitrogen use efficiency in Cocoa genotypes. *Journal of plant nutrition*, **31**(2), 239-249.
- Sánchez S., 2011. Cacao e Graviola: Descrição e Danos das Principais Pragas-de-Insetos. Editus, Ilhéus, Brazil.
- Silva Neto P. J. d., 2001. Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira. Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira, Belém, PA (Brasil).
- Sodré G. A., ed. 2017: Cultivo Do Cacaueiro no Estado da Bahia. Ilhéus, BA, MAPA/Ceplac/Cepec. 126.
- Sodré G. A., Marrocos P. C. L., Sarmiento D. H. A., 2017: Cultivo do Cacaueiro Irrigado no Estado do Ceará. Fortaleza. Ceará.
- Tagliavini M.; Scandellari F.; Toselli M., 2016. La fertilizzazione dei sistemi frutticoli. In *Fertilizzazione Sostenibile*; Grignani, C., Ed.; Edagricole-New Business Media: Bologna, Italy; pp. 391–416
- Von Uexküll H., Cohen A., 1980. Potassium requirements of some tropical tree crops (oil palm, coconut palm, rubber, coffee, cocoa). *Potassium Requirements of Crops*, pp. 71-104. International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- Zuidema P. A., Leffelaar P. A., Gerritsma W., Mommer L. u. Anten N. P., 2005. A physiological production model for cocoa (*Theobroma cacao*): model presentation, validation and application. *Agricultural Systems*, **84**, 2, S. 195-225.
- Zweifel R., Haeni M., Buchmann N. u. Eugster W., 2016: Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytologist*, **211**, 3, S. 839-849.