

RELATÓRIO DE CARBONO DE LINHA DE BASE DO SAF DA RC

Ilhéus, Bahia, Brasil

2023

Índice

01 | Introdução

02 | Sistemas Agroflorestais da RC

03 | Metodologia de Mensuração de Carbono Agroflorestal da Courageous Land

04 | Resultados

05 | Considerações Finais

06 | Conclusão

07 | Referências



Resumo

A implementação de sistemas agroflorestais pode ajudar a reverter as mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, fornecer ao mundo alimentos, ingredientes e madeira positivos para o clima. Os sistemas agroflorestais também podem aumentar a renda dos agricultores e criar habitat para a biodiversidade. O presente estudo tem como objetivo medir a remoção de carbono em sistemas agroflorestais da fazenda da "Resgate Climático", associação agroflorestal pioneira no Brasil. A fim de monitorar o sequestro de carbono nos próximos anos, começamos agora com uma medição de estoque de carbono de linha de base, medindo tanto a biomassa viva abaixo do solo (Carbono Orgânico do Solo) quanto acima do solo. Medimos o estoque de carbono em um sistema agroflorestal com 0,854 hectares. O sistema estudado foi plantado em 2022 e combina frutos com espécies madeireiras preciosas, palmeiras, bananas e regeneração natural.

Os resultados mostraram que o Sistema Agroflorestal (SAF) da "Resgate Climático" (RC) tem uma média de 29,70 toneladas de CO₂ eq./ha no componente ABG, o que significa que tem um alto potencial para aumentar o estoque de carbono acima do solo nos próximos anos de vida do projeto.

O Instituto Arapyaú, ao fazer o levantamento do estoque de carbono acima do solo, observou que o valor médio entre algumas propriedades foi de 242 toneladas de CO₂ por hectare em sistemas agroflorestais de Cabruca. Dito isto, também provamos a importância do solo na estocagem de carbono, principalmente no início de um projeto AFS. Atualmente, enquanto os sistemas agroflorestais são jovens, aproximadamente 80% do carbono total está na biomassa subterrânea.

O carbono estocado no sistema agroflorestal foi igual a 157,03 toneladas de CO₂ equivalente/ha. Multiplicando esses valores por sua respectiva área temos 134,1 toneladas de CO₂ equivalente sequestradas no sistema agroflorestal da RC.

Esses resultados já sugerem que a implantação de sistemas agroflorestais pelo Resgate Climático e outras fazendas tem enorme potencial para ajudar a mitigar as mudanças climáticas. À medida que os sistemas agroflorestais se desenvolvem, eles reduzem as emissões líquidas de GEE, além de fornecer outros serviços ecossistêmicos e alimentos de alta qualidade.



01 | Introdução

O aquecimento global tem sido um consenso científico desde a década de 1990, quando a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) foi criada, e o Protocolo de Kyoto foi estabelecido como um tratado internacional que comprometeu os Estados Partes a reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O Protocolo de Quioto implementou o objetivo da CQNUAC de reduzir o início do aquecimento global através da redução das concentrações de gases com efeito de estufa na atmosfera. Antes disso, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O objetivo do IPCC é fornecer aos governos em todos os níveis informações científicas que possam usar para desenvolver políticas climáticas.

A mudança climática é uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para as sociedades humanas e toda a vida na Terra e as emissões de CO₂ feitas pelo homem não diminuíram nos últimos anos. Em reconhecimento a isso, a esmagadora maioria dos países ao redor do mundo adotou o Acordo de Paris na 21ª Conferência das Partes (COP21) em dezembro de 2015, cujo objetivo central inclui manter o aumento da temperatura média global neste século o mais próximo possível de 1,5 graus Celsius acima dos níveis pré-industriais.



A UNFCCC apoia uma arquitetura complexa de órgãos que servem para avançar na implementação da Convenção, do Protocolo de Quioto e do Acordo de Paris. Fornece conhecimentos técnicos especializados e presta assistência na análise e revisão das informações sobre as alterações climáticas comunicadas pelas Partes e na implementação dos mecanismos de Quioto.

Também mantém o registro de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) estabelecido sob o Acordo de Paris, um aspecto fundamental da implementação do Acordo de Paris.

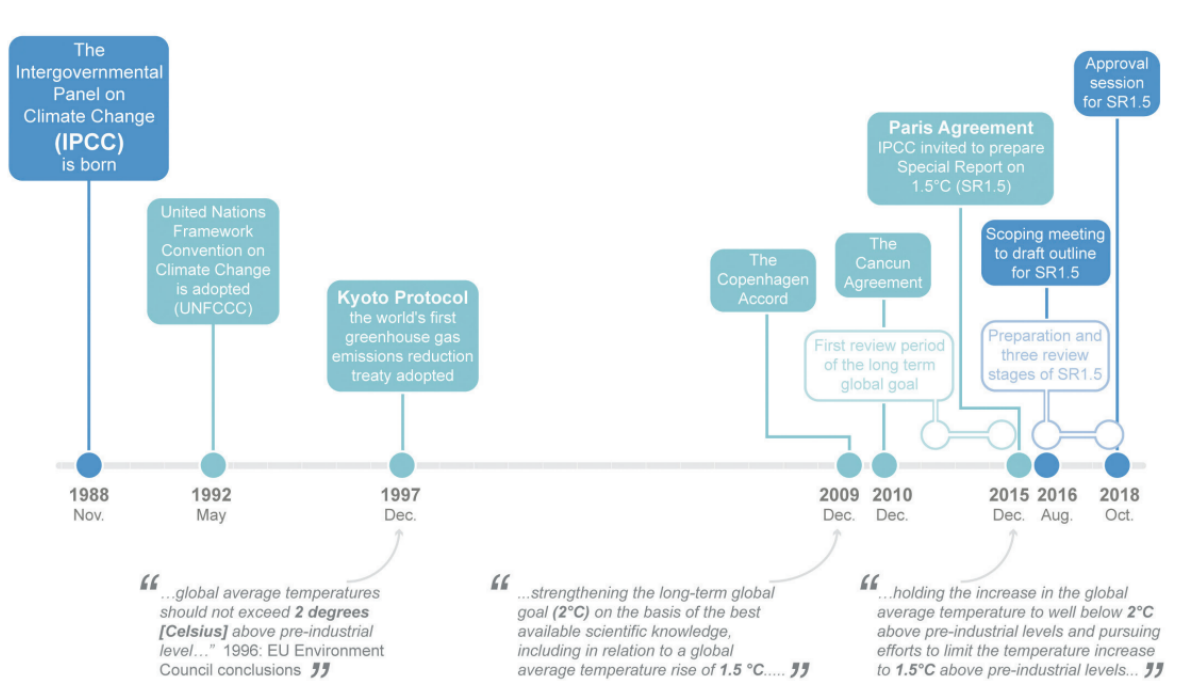


Figura 1 - Eventos relevantes das negociações internacionais sobre o clima (Relatório do IPCC, 2018).

O aquecimento induzido pelo homem já atingiu cerca de 1 ° C acima dos níveis pré-industriais. Na década de 2006-2015, a atividade humana aqueceu o mundo em 0,87 ° C (± 0,12 ° C) em comparação com os tempos pré-industriais (1850-1900). Dado que a temperatura global está atualmente aumentando em 0,2 ° C (± 0,1 ° C) por década, o aquecimento induzido pelo homem atingiu 1 ° C acima dos níveis pré-industriais por volta de 2017 e, se esse ritmo de aquecimento continuar, chegaria a 1,5 ° C por volta de 2040.

Embora a mudança na temperatura média global nos diga sobre como o planeta como um todo está mudando, olhar mais de perto para regiões, países e estações específicas revela detalhes importantes. Desde a década de 1970, a maioria das regiões terrestres vem se aquecendo mais rápido do que a média global, por exemplo. Isso significa que o aquecimento em muitas regiões já excedeu 1,5 ° C acima dos níveis pré-industriais. Mais de um quinto da população global vive em regiões que já experimentaram aquecimento em pelo menos uma estação que é superior a 1,5 ° C acima dos níveis pré-industriais.

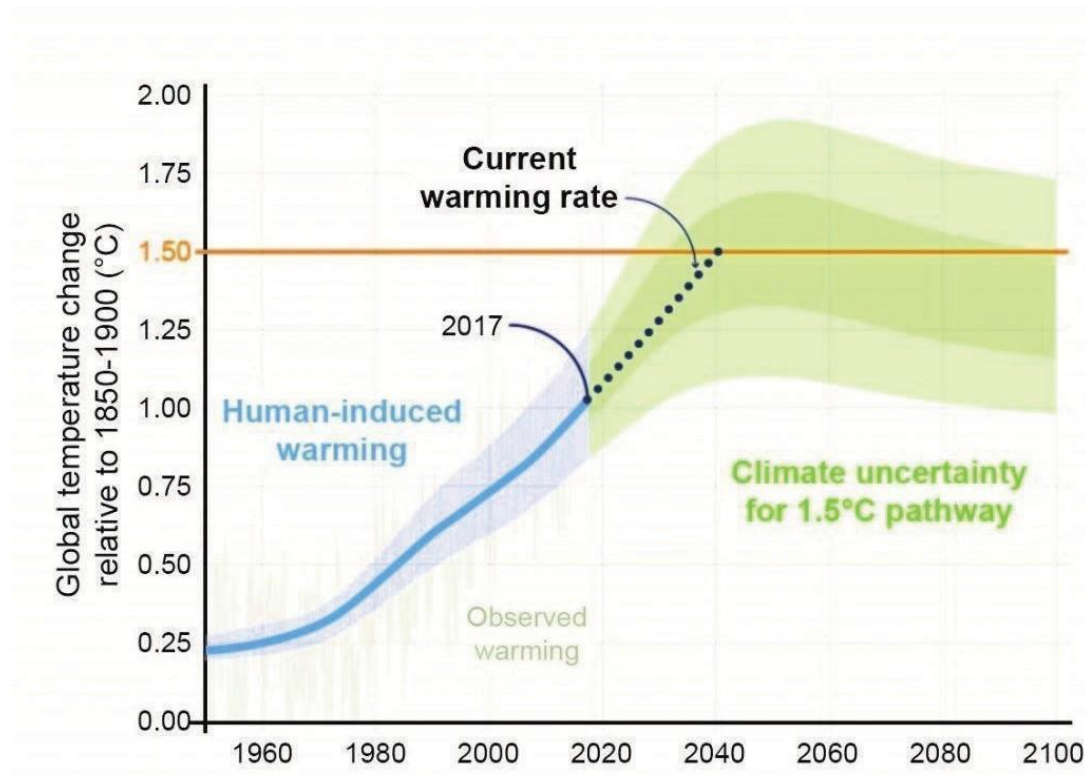


Figura 2 - Aquecimento induzido pelo homem (Relatório do IPCC, 2018).

O Protocolo de Quioto aplicou-se a sete gases com efeito de estufa enumerados: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC), hexafluoreto de enxofre (SF₆), trifluoreto de azoto (NF₃). O trifluoreto de nitrogênio foi adicionado para o segundo período de conformidade durante a Rodada de Doha. As emissões de dióxido de carbono são o principal motor das mudanças climáticas globais e é amplamente reconhecido que, para evitar os piores impactos das mudanças climáticas, o mundo precisa urgentemente reduzir as emissões e aumentar o sequestro delas.

As estratégias brasileiras para mitigar as mudanças climáticas incluem a redução do desmatamento na Amazônia e no Cerrado, restauração de pastagens, mudança nas práticas agrícolas, redução do consumo de energia (eficiência energética, fontes alternativas de energia, etc.), estabilização da participação de fontes de energia renováveis na matriz energética, aumento do uso de biocombustíveis, etc. Isso apresenta desafios nos níveis federal, estadual e municipal para o Brasil, tanto para os setores público quanto para o privado.

Há também um interesse crescente no papel de diferentes sistemas de uso da terra na estabilização da concentração atmosférica de CO₂. Foi dada atenção primária às florestas, que representam 45% dos estoques de carbono terrestre e são responsáveis por 17% das emissões anuais por meio do desmatamento. É, no entanto, notável que as árvores em outros sistemas de terra, como terras agrícolas, têm grande potencial de sequestro devido à sua extensão espacial. Iniciativas recentes têm enfatizado a importância de melhorar e compreender as funções ecossistêmicas e os serviços dos sistemas agroflorestais, principalmente nas questões de sequestro de carbono e biodiversidade.

02 | Sistemas Agroflorestais da RC

Agrofloresta é um termo geral para sistemas que integram árvores cultivadas e agricultura. Existem diferentes tipos de agrofloresta, incluindo silvopastoril (árvores e animais), agrisilvicultural (árvores e agricultura) e agrosilvopastoril (árvores, agricultura e animais). Todas essas podem ser ótimas opções para aumentar o sequestro de carbono e, assim, reduzir ou mesmo eliminar a pegada de carbono geral da agricultura. Além da função de regulação climática (através do sequestro de carbono), as árvores em agroflorestas contribuem para a proteção do solo, regulação da água, melhoria das condições climáticas locais, sequestro de carbono do solo, impactos reduzidos nas florestas naturais e outros benefícios ambientais (Kerr et al. 2022) como habitat da biodiversidade.

Por fim, a agrofloresta não apenas ajuda a mitigar as mudanças climáticas, mas também ajuda os agricultores a se prepararem para elas. Os sistemas agroflorestais superam a agricultura tradicional exposta em eventos climáticos extremos, como seca, inundações, calor e geada. Isso ocorre porque o clima dentro das florestas é naturalmente mais moderado do que fora.



Para o cultivo do cacau podemos elencar algumas estratégias de adaptação e mitigação alinhadas com a vulnerabilidade climática da região sul da Bahia:

- 1) O uso de genótipos melhorados;
- 2) A utilização de sistemas de policultura (por exemplo, consórcio agroflorestal);
- 3) Maior densidade de plantio;
- 4) Manejo inteligente e ecológico de plantas espontâneas.

Neste contexto, os projetos agroflorestais executados pela associação Resgate Climático (RC) apresentam uma valiosa estratégia de mitigação das alterações climáticas e garantia de resiliência face ao iminente aquecimento global através do estabelecimento de uma produção de cacau consorciada com árvores e frutos nativos e exóticos com diferentes funções ecológicas e económicas. A RC está trabalhando para mitigar as mudanças climáticas e produzir cacau agroflorestal e outros produtos, aumentando a qualidade. O presente estudo tem como objetivo estimar o potencial do projeto agroflorestal RC para sequestrar carbono.

a. Sistema Analisado

O presente estudo tem como foco analisar o sequestro de carbono nos sistemas agroflorestais do CR tendo o cacau como cultura principal. O CR está localizado no município de Ilhéus/BA (figura 3). Esta é uma das regiões produtoras agrícolas estabelecidas no Brasil, especialmente para o cacau. Nessas condições, o solo da região se degradou. Ilhéus tem um clima tropical. Em Ilhéus existe muita chuva mesmo no mês mais seco. A classificação do clima é Af de acordo com a Köppen e Geiger. 23.9 °C é a temperatura média em Ilhéus | 75,0 °F. Pluviosidade anual de 1325 mm | 52,2 polegadas. Ao realizar um inventário de carbono, é importante saber por causa da diferença do estoque de carbono nos componentes da cama e do solo em cada estação do ano. Devido ao processo de decomposição da serapilheira no solo ser acelerado pela água, a tendência é que nas estações chuvosas o carbono orgânico fique mais concentrado no solo, enquanto nas estações secas a tendência é maior concentração de carbono orgânico na serapilheira. Dito isto, é importante que todos os inventários de carbono subsequentes sejam realizados na mesma época do ano que este inventário de relatório de referência, que foi em fevereiro. A fazenda RC está localizada no bioma Mata Atlântica.

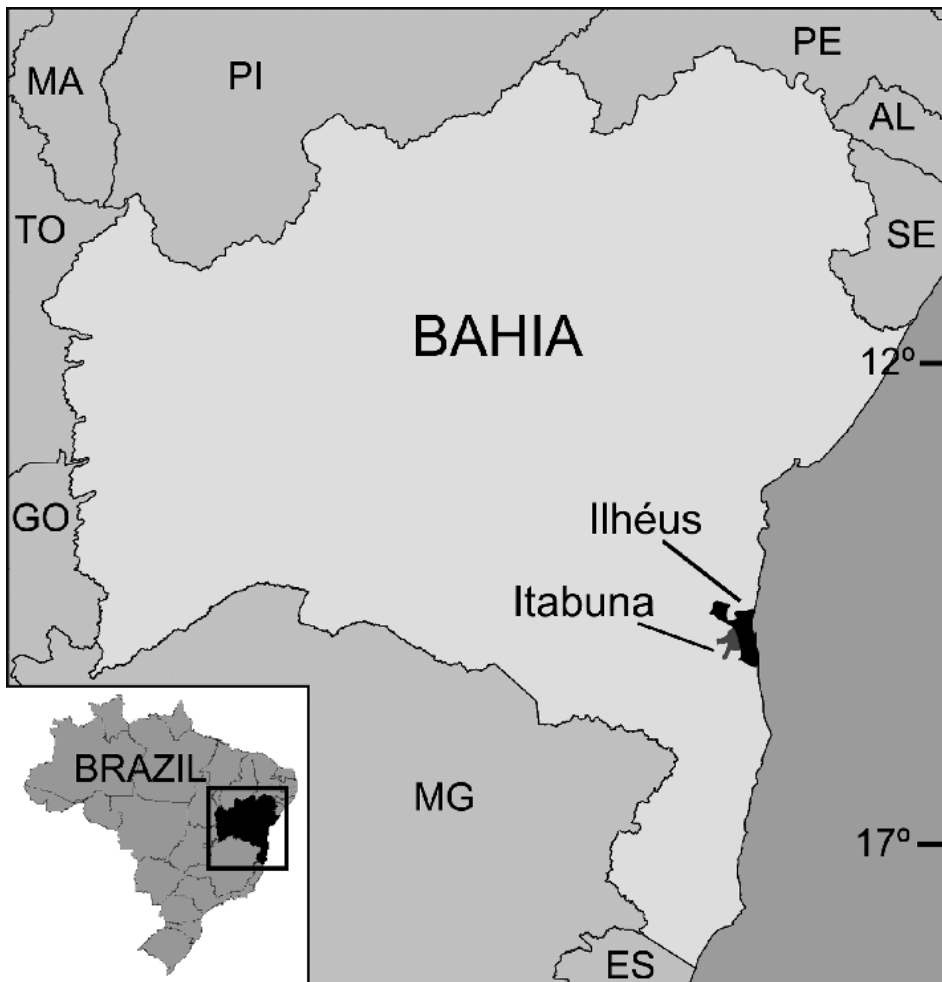


Figura 3 - Localização do município de Ilhéus.

A situação da cobertura do solo da cidade onde se situa a exploração agrícola RC é apresentada na figura 3.5. Para analisar a mudança na cobertura do solo nessa região, foram analisados e comparados 6 anos, entre 2015 e 2021 (figura 3.5 mostra a perda de cobertura arbórea da fazenda cidade de RC entre 2015 e 2021). Nesta análise é possível verificar a diminuição das áreas florestais sobre a região e o aumento das terras agrícolas. A situação da cobertura da terra do estudo da região agrícola RC foi baseada no Global Forest Watch.

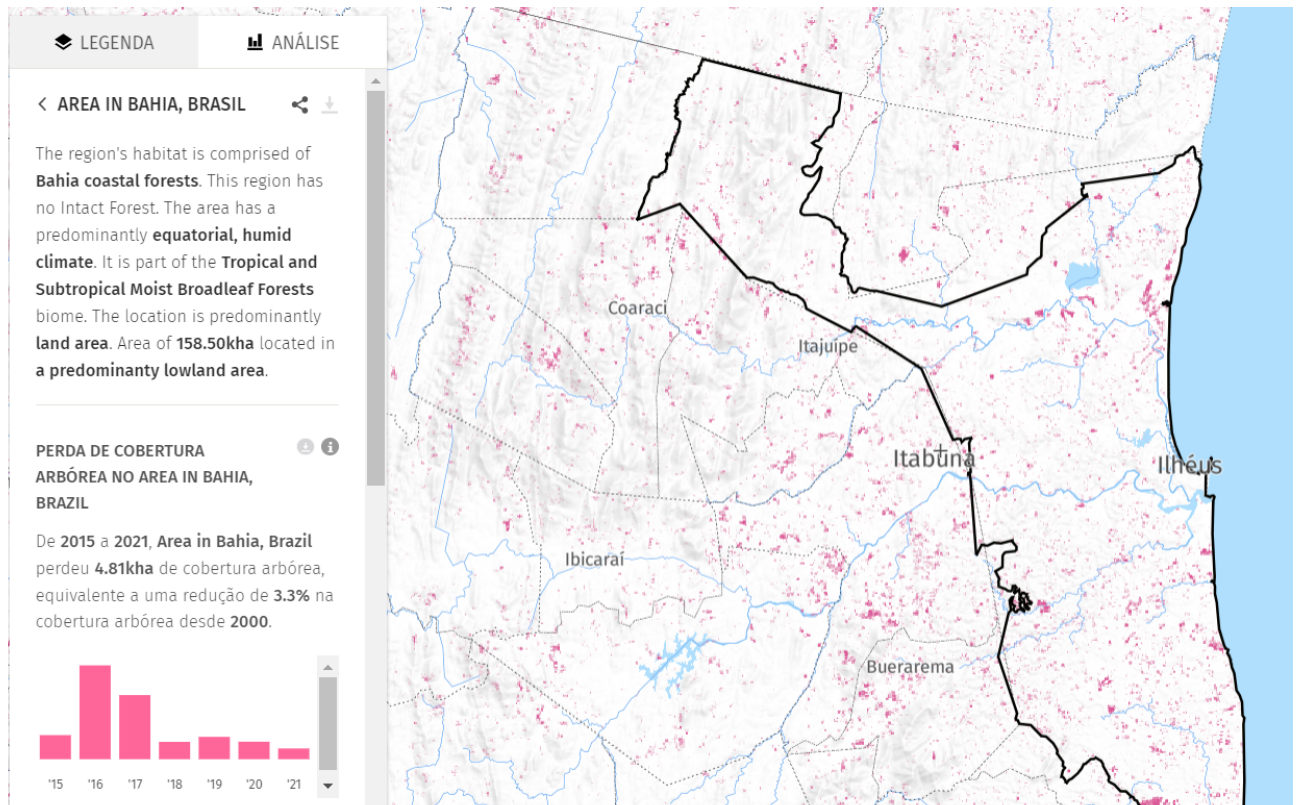


Figura 3.5 - Perda de cobertura arbórea entre 2015 e 2021 na região da fazenda RC. 3,3% de toda a área de interesse não é mais floresta e, de 2015 a 2021, Ilhéus perdeu 4,81kha de cobertura arbórea.

Tanto para a estratificação de parcelas quanto para o inventário eficaz de carbono, é importante entender a história de uso e gerenciamento de diferentes estandes. Informações sobre manejo, adubação, plantio e estande estão listadas abaixo:

Informações sobre o Sistema Agroflorestal (AFS):

- Área total - 0,854 hectares;
- Nome da área - "Talhão G";
- Abacate, bananeiras e árvores de madeira (*Khaya grandifoliola*, *Cedrela fissilis*, *Handroanthus serratifolius*, *Hymenaea courbaril*, *Cordia trichotoma*, *Inga edulis*, *Spondias pinnata*, *Bowdichia virgilioides*) data de plantio - julho/2022
- Data de Plantio do Cacau - terá início em julho/2023
- Aplicação de Composto Orgânico - 0 toneladas;
- Aplicação de estrume puro - 2 toneladas;
- Semeadura de Culturas de Cobertura - algumas plantas de feijão guandu (*Cajanus cajan*), gliricídia (*Gliricidia sepium*) e margaridão (*Tithonia diversifolia*) distribuídas na área
- Uso da terra antes do plantio - cultivo de mandioca e, em seguida, regeneração florestal natural inicial

System	Spacing between cocoa/banana plants inline [meters]	Spacing between cocoa/banana lines [meters]	Spacing between trees inline [meters]	Spacing between trees lines [meters]
RC AFS (Talhão G)	3	6	3	6

Tabela 1 - Espaçamento do Sistema Agroflorestal do CR. Tradução das colunas da esquerda para direita: Sistema; Espaçamento entre plantas na linha de cacau e banana; Espaçamento entre linhas de cacau e banana; Espaçamento entre as árvores na linha de árvores; Espaçamento entre as linhas de árvores.



Figura 4 - Imagens de satélite da localização da fazenda RC. A área do Sistema Agroflorestal considerada na estimativa de carbono é mostrada no polígono verde opaco com borda vermelha.

03 | Metodologia de Mensuração de Carbono Agroflorestal da Courageous Land



A metodologia que utilizamos foi desenvolvida pela empresa [Courageous Land](#). A estimativa do estoque total de carbono no sistema agroflorestal do CR foi dividida em três etapas: Estratificação, Amostragem e Interpolação de Dados.

I. Estratificação

Estratificação é o processo no qual a terra é dividida em áreas menores, considerando variáveis-chave que são relativamente homogêneas e considerando uma variável que é heterogênea (que pode ser, por exemplo, biomassa acima e abaixo do solo). Esse processo é extremamente importante porque torna o projeto menos dispendioso. O custo da análise laboratorial e das horas de trabalho pode ser alto e a estratificação ajuda a reduzir as necessidades de amostragem, mantendo o rigor científico.

O processo de estratificação é dividido em 3 etapas:

I. Reconhecimento;

II. Seleção dos parâmetros amostrais;

III. Escolha um local de estrato.

I. O reconhecimento da fazenda é crucial porque permite que o requerente da metodologia analise visualmente a terra e verifique as heterogeneidades. Esta etapa da estratificação é necessária para produzir mapas pré-amostragem (de preferência usando um SIG) para orientar o requerente na escolha da posição dos estratos.

Outro resultado importante da etapa de reconhecimento é o julgamento da melhor parcela de tamanho. A área da parcela deve ser grande o suficiente para capturar todos os

principais parâmetros de amostragem de cada parcela, tornando as heterogeneidades explícitas.

II. A seleção dos principais parâmetros de amostragem é feita após o reconhecimento da terra. Neste ponto, o candidato já possui mapas auxiliares e anotações sobre as heterogeneidades locais. Essas heterogeneidades podem estar relacionadas à orografia, número e mortalidade de árvores, presença de arbustos e outros. Esta etapa visa dividir dados contínuos (por exemplo, biomassa acima e abaixo do solo) em categorias discretas. E como essa etapa de agrupamento pode ser subjetiva, é indispensável classificar os fatores-chave na importância de seu efeito na separação da área em categorias homogêneas.

Uma vez que a lista de classificação é feita, as principais diferenças de cada estrato devem ser documentadas para reforçar a razão de ser classificado em estratos distintos. Mapas SIG e imagens da terra podem ser usados como evidência.

III. Após a conclusão da estratificação, é necessário escolher a localização da parcela, de forma aleatória ou sistemática dentro de cada estrato. No projeto RC, as parcelas são permanentes, o que significa que as próximas medições de carbono serão feitas nessas áreas.

A localização aleatória pode ser alcançada usando técnicas de amostragem GIS e a abordagem sistemática de localização das parcelas pode ser feita manualmente com base na etapa II. Figuras com a localização da trama são indispensáveis no relatório.

É importante notar que não há um número máximo ou mínimo de estratos durante o processo de estratificação, uma vez que as heterogeneidades dos fatores-chave são capturadas por cada estrato.

b. Amostragem

A capacidade da terra (acima e abaixo do solo) de capturar carbono difere em diferentes biomas (Scharlemann et al. 2014; Mukul et al. 2020) e dentro de cada bioma, cada árvore (Brown e Iverson 1992; Chave et al., 2005; Parron Padovan et al. 2017) e tipos de solo (Paradelo et al. 2015) têm características diferentes, implicando diferentes capacidades de sequestro de carbono.

Assim, a amostragem de todos os componentes (árvores, arbustos e solo) deve ser baseada em artigos revisados por pares. E, preferencialmente, da literatura onde o estudo foi feito em locais próximos de onde a metodologia está sendo aplicada devido às semelhanças locais, como solo, clima e espécies da terra. A ideia por trás de seguir as metodologias de medição dos artigos revisados por pares é aplicar corretamente as equações de biomassa fornecidas por eles.

Para a biomassa viva acima do solo especificamente, o candidato pode encontrar equações específicas de espécies para certos componentes da área do projeto ou usar equações gerais de um grupo de espécies (por exemplo, florestas tropicais ou palmeiras localizadas no bioma Mata Atlântica) que se encaixam nas necessidades do projeto.

Uma vez conhecida a biomassa de cada componente, é necessário obter a quantidade de carbono correspondente à biomassa de cada planta. Seguindo a diretriz do IPCC (IPCC 2006), a fração de carbono da biomassa da usina é igual a 47%, assim, os valores de biomassa são multiplicados por 0,47 para obter a quantidade de carbono (kg de C) armazenada.

No entanto, o equivalente de CO₂ é a unidade desejada e, para isso, é necessário multiplicar o teor de carbono (kg de C) por 44/12 para obter a massa de CO₂ equivalente (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) 2013).

Para o componente de carbono do solo, duas medições devem ser feitas: densidade aparente e porcentagem de carbono orgânico do solo (SOC) a uma profundidade de 20 cm. A amostra de densidade aparente é coletada do centro da parcela de solo e enviada ao laboratório. Para obter o estoque de carbono do solo, cerca de quatro amostras foram retiradas de pontos distintos dentro da área da parcela e, em seguida, misturadas dentro de um balde limpo para capturar todas as nuances locais.

Por exemplo, se a área da parcela de solo tiver uma árvore e uma linha de uma cultura, sugere-se obter uma amostra abaixo da copa da árvore, outra do solo entre a linha de cultivo e a árvore e, a última, da linha da cultura, evitando vieses devido a nuances de escala muito pequena, como o acúmulo de matéria orgânica devido à inclinação de uma terra.

c. Interpolação de dados

Uma vez que a biomassa acima do solo e seu teor de carbono são medidos, mais o carbono orgânico do solo é medido, é possível descobrir quanto carbono está sendo armazenado por unidade de área. Para conseguir isso, é necessário interpolar os dados das parcelas para toda a área representada por elas.

A interpolação pode ser feita com inúmeras técnicas, mas a mais simples é a Ponderação de Distância Inversa (IDW) (eq. 1) (Isaaks e Srivastava 1989), onde a interpolação é feita com base na distância entre as amostras da parcela e a localização não amostrada e as observações próximas têm peso mais pesado (Collins e Bolstad 1996; Hartkamp et al., 1999).

O IDW precisa de uma entrada chamada potência de ponderação de distância inversa (P). Alterar P implica diferentes saídas, levando o candidato a testar um conjunto de valores de P para poder escolher corretamente qual deles traz interpolação espacial com erros menores.

$$\text{IDW}(L_1) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i}{d_i^P} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^P} \right)}$$

(1)

Da equação 1, z_i é o valor da posição i , d_i é a distância entre a localização L_1 (o local onde queremos estimar o valor de interpolação) e a posição i , P é o poder de ponderação da distância inversa e n é o número total de dados coletados dos gráficos.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\Sigma(Y' - Y)^2}{N}}$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \Sigma \left| \frac{Y' - Y}{Y} \right| * 100$$

$$\text{nSEE} = \frac{1}{\underline{Y}} \sqrt{\frac{\Sigma(Y' - Y)^2}{N}}$$

(2) (3) (4), respectivamente.

Onde Y' é a saída do modelo e Y são dados de campo para o mesmo local, \bar{Y} é a média de todos os valores Y e N é o número de dados medidos no campo.

04 | Resultados

1. Estratificação

O reconhecimento do sistema agroflorestal do CR foi feito em fevereiro de 2023, quando os aspectos orográficos, a densidade arbórea e a mortalidade foram considerados para capturar heterogeneidades no sistema.

Para a biomassa viva acima do solo, 4 parcelas permanentes de 15x15 metros foram deliberadamente localizadas para capturar todas as heterogeneidades dentro do AFS. Para os solos, foram colocadas parcelas permanentes circulares com 5 metros de diâmetro dentro das parcelas acima do solo, pois considerou-se que as variáveis-chave para estratificar a ABA são muito semelhantes às do BLG, uma vez que as parcelas do sistema são todas gerenciadas igualmente. O vértice principal de cada parcela foi georreferenciado com GPS e a posição cardinal desse vértice foi sempre sudoeste. Após a materialização deste vértice no campo, uma fita métrica foi esticada 15 metros ao norte e 15 metros ao leste com o auxílio de uma bússola magnética.

Coordenadas do vértice principal de cada parcela:

P1: 14°34'42.4"S; 39°05'36.2" O

P2: 14°34'41.9"S; 39°05'37.5" O

P3: 14°34'43.5"S; 39°05'39.3" O

P4: 14°34'43.7"S; 39°05'41.4" O

2. Estimativa de Carbono

Uma vez concluída a etapa de estratificação, é necessário calcular o teor de carbono em cada parcela.

I. Existências de CO₂ acima do solo

Para estimar a biomassa viva acima do solo, é necessário medir o que é necessário para atingir a biomassa total para cada parcela seguindo a literatura. Assim, um conjunto de equações foi utilizado com diferentes entradas. Para o cacau, por exemplo, a equação necessita do diâmetro a 30 centímetros (d30) e da altura total (alt) (equação 5) (Somarriba et al., 2013), para as palmeiras, utilizou-se como entrada o diâmetro à altura do peito (DAP) (equação 6) (Velasco, 2009), para as árvores gerais, utilizou-se como entrada a DAP, a altura da árvore (h) e a densidade da madeira (WD) (equação 7) (Alves et al. 2010), para arbustos (usados como sebes) a altura (h) e o diâmetro da coroa (CD) foram utilizados como entradas (equação 8) (Conti et al. 2019) e para bananas, o DAP foi utilizado como entrada (equação 9) (Walter Steenbock et al., 2013).

As equações 5 a 9 foram utilizadas para estimar a biomassa (B) para cada grupo de plantas separadamente, o que é necessário para obter a biomassa total de cada parcela, para depois interpolar para toda a área agroflorestal.

Equações:

$$\text{Log } B = (-1.684 + 2.158 * \text{Log}(d30) + 0.892 * \text{Log}(\text{alt})) \quad (5)$$

$$B = (\exp(-1,497 + 2,548 * \ln(\text{DBH}))) * 0,6 \quad (6)$$

$$B = \exp(-2.977 + \ln(\text{WD} * \text{DBH}^2 * h)) \quad (7)$$

$$B = \exp(-0,37 + (1,903 * \ln(\text{CD})) + (0,652 * \ln(h)) * 1,403) \quad (8)$$

$$B = \exp(-3,98414 + 2,20132 * \ln(\text{DBH})) \quad (9)$$

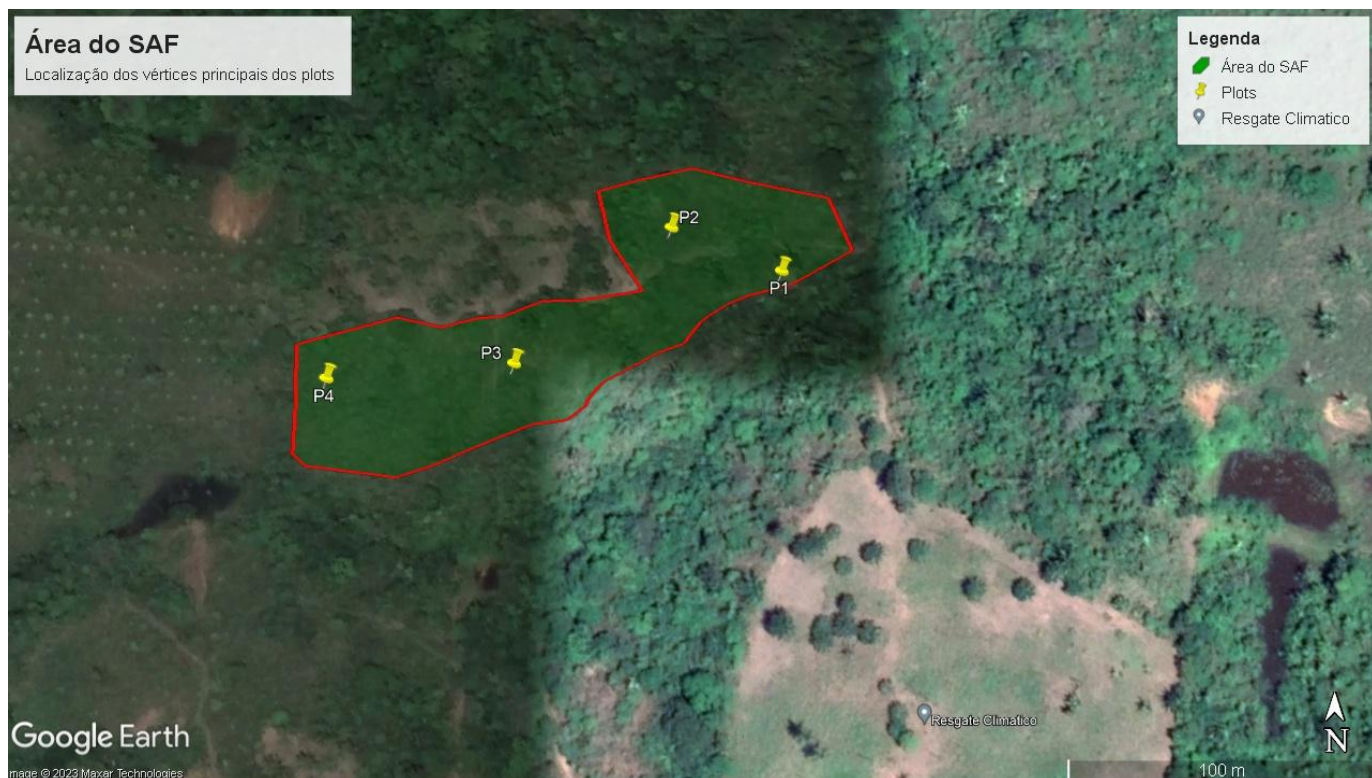


Figura 5 - Sistema agroflorestal estudado na fazenda RC com a localização do vértice principal (sudoeste) das parcelas (15x15 metros).

Todas as plantas foram medidas seguindo a metodologia de artigos revisados por pares (Somarriba 2013, Velasco 2009, Alves et al. 2010 e Conti et al. 2019) para obter as equações de biomassa (equações 5 a 9) e transformar-se em teor de carbono [equivalente CO₂] para cada grupo de plantas nas diferentes parcelas (Figura 6).

A partir da Figura 6, é possível visualizar as diferenças entre o carbono estocado por cada componente nas parcelas dos sistemas analisados. Para que um indivíduo de uma determinada espécie de árvore entre no inventário, ele deve ter pelo menos 5 cm de DBH

(Diâmetro na altura do peito). Como o plantio ainda era muito recente, nenhum indivíduo das espécies plantadas atingiu o fator de inclusão e, portanto, não foram contabilizados aqui (apenas uma banana). Além disso, não foram encontrados arbustos nas parcelas. Portanto, isso explica por que nas parcelas 1, 2, 3 e 4 do RC AFS, o carbono acima do solo é 100% alocado em árvores e palmeiras a partir da regeneração natural.

Com o sequestro de carbono acima do solo calculado para as parcelas, é hora de interpolar esses dados nos limites usados para o AFS. Quatro valores de potências de ponderação de distância inversa foram testados (equação 1) durante a validação cruzada leave-one-out (LOOCV): 1,5, 2, 2,5 e 3,0. Os valores escolhidos foram 2 para o AFS, os erros foram menores do que os erros das demais interpolações utilizando os demais valores de potência, indicando menos erros. Nos mapas dos dados interpolados são mostradas as toneladas de CO₂ equivalente/hectare (figura 7).

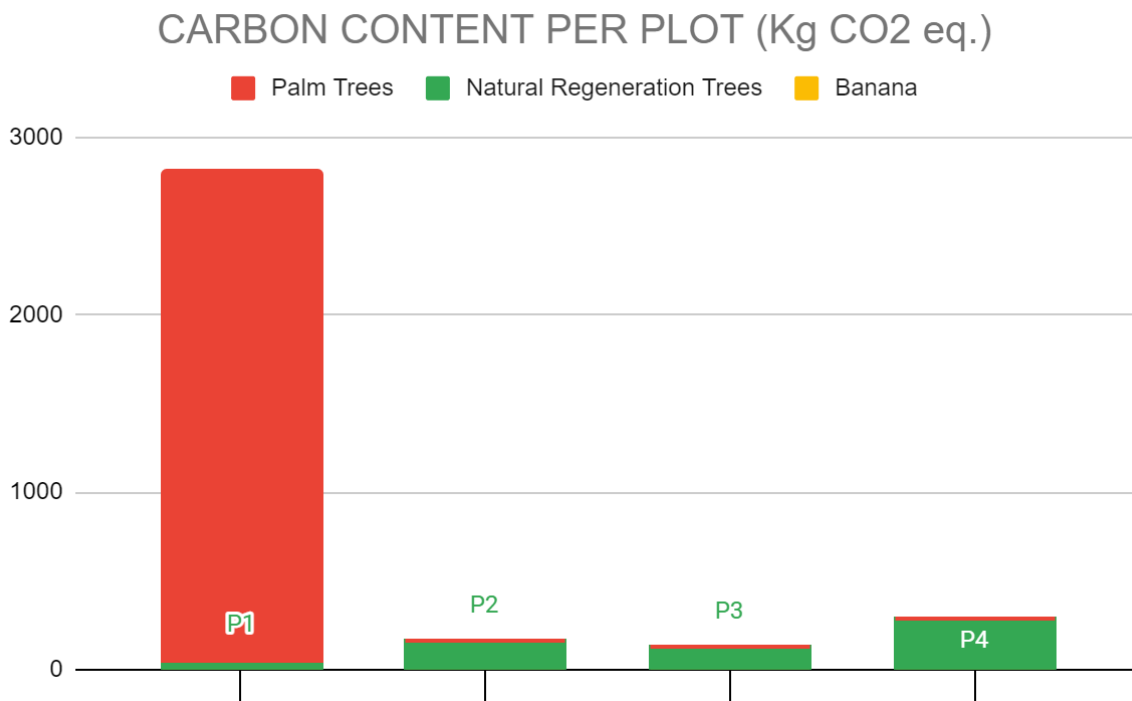


Figura 6 - Estoque total acima do solo de equivalente de Co₂ em cada parcela (P1, P2, P3 e P4) do AFS analisado [Kg CO₂ eq. por parcela]. As cores vermelho, verde e amarelo representam os componentes das palmeiras, árvores de regeneração natural e bananas, respectivamente.

Para entender a eficiência do sistema agroflorestal na remoção de carbono, é crucial calcular as médias de carbono acima do solo estocadas (tabela 2 e figura 7) e o peso total do equivalente CO₂ (média do equivalente CO₂ multiplicado por sua área).

QUANTIDADE DE CARBONO (Kg CO2 eq.)				
GRUPO VEGETAL / PARCELA	P1	P2	P3	P4
Banana	0	0	0	8,66
Árvores de Regeneração Natural	112,42	2853,05	121,22	171,46
Palmeiras	5,98	0	0	0
Cacaueiros	0	0	0	0
Árvores plantadas	0	0	0	0
TOTAL POR PARCELA (Kg CO2 eq.)	118,41	2853,05	121,22	180,12
Kg CO2 eq./hectare por parcela	5262,47	126802,33	5387,61	8005,31
Ton CO2 eq./hectare por parcela	5,26	126,80	5,39	8,01
Média de CO2 eq por hectare após interpolação [tons de CO2 eq./ha]	29,70			
Área total do SAF (ha)	0,854			
Quantidade total de CO2 equivalente no SAF [tons de CO2 eq.]	25,36			

Tabela 2 - Cálculos do teor de carbono ABG.

Interpolação de dados

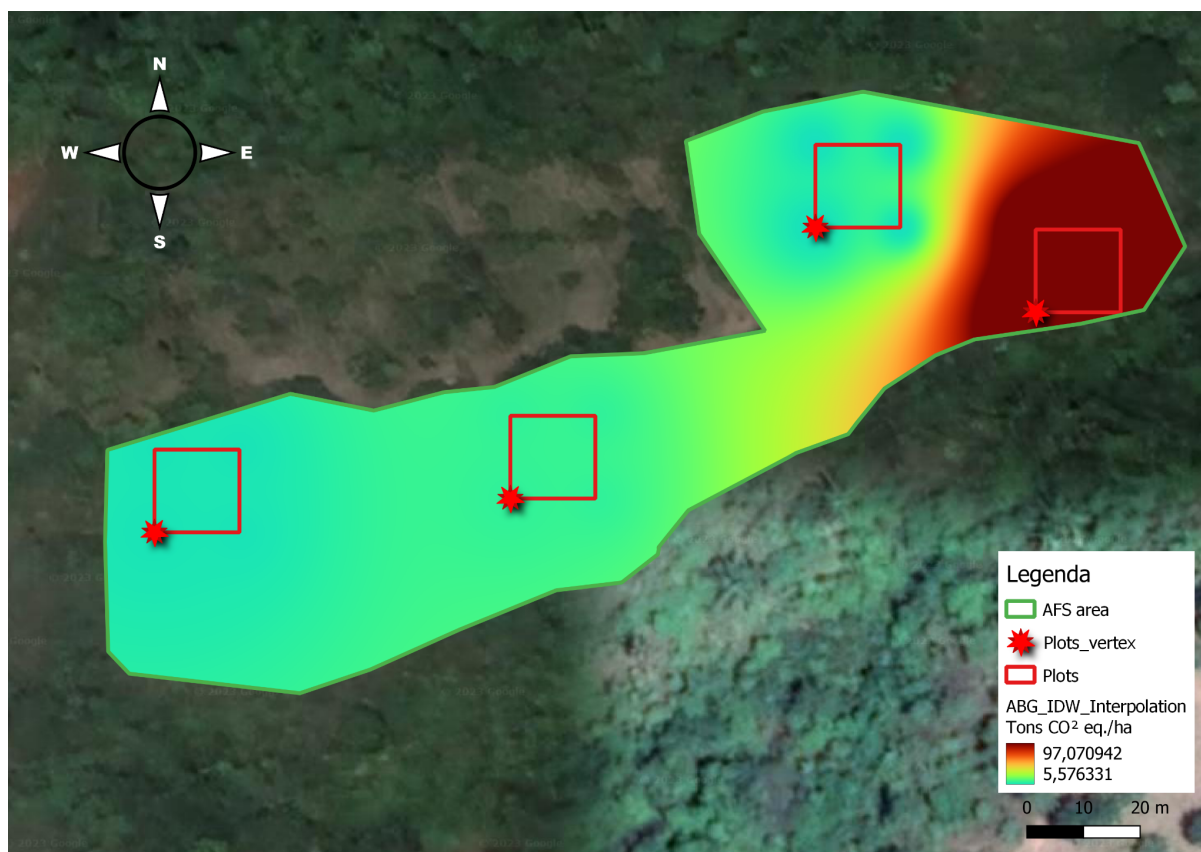


Figura 7 – Estoque de equivalente a Co2 [kg de Co2 eq./ha] do componente acima do solo do RC AFS. [Software de mapas QGIS 3.22. DATUM: UTM SIRGAS 2000 24S]

II. Solo Reserva de equivalente orgânico de CO₂

Para calcular o estoque subterrâneo de dióxido de carbono, é necessário ter a densidade aparente e a porcentagem de carbono no solo. Para acessar esses dados, algumas amostras de solo devem ser coletadas, algumas para a análise de densidade aparente e outras para a análise de porcentagem de carbono. Uma vez feita a análise laboratorial, é necessário utilizar os dados para a porcentagem de carbono no solo (%C) e densidade aparente (BD) (g/cm³) para obter o estoque de Carbono Orgânico do Solo (SOC), então, aplicamos a equação 10 e obtemos o equivalente CO₂.

$$CO_2 \text{ Stock (tons of } CO_2 \text{ equivalent /ha)} = \%C \times BD \times \text{Soil Depth} \times 44/12$$

(10)

A profundidade do solo é igual a 20 cm.

As variáveis de estratificação utilizadas no sistema subterrâneo são as mesmas para o acima do solo, uma vez que as variáveis utilizadas na etapa de estratificação para a ABG também podem distinguir áreas com estruturas de solo semelhantes.

Quatro amostras de solo dentro de cada parcela de solo foram coletadas, misturadas e enviadas ao laboratório para determinação da porcentagem de carbono. Uma amostra foi utilizada para obter a densidade aparente nos primeiros 20 cm abaixo do solo (localizada no centro da parcela de solo) (tabela S2 em material suplementar). Assim, cada parcela possui um valor de porcentagem de carbono e um de densidade aparente, totalizando 4 dados para cada variável.

A mesma metodologia utilizada no componente ABG para selecionar o melhor modelo de interpolação é utilizada para o BLG. No entanto, para o componente solo, é necessário aplicar a equação 10 primeiro e, em seguida, calcular as métricas de erro.

Os mesmos quatro valores utilizados como potências de ponderação de distância inversa na interpolação de carbono ABG foram testados na validação cruzada. O valor escolhido foi 2,0.

O mapa do estoque de CO₂ abaixo do solo é mostrado na figura 8. Note-se que o AFS tem uma enorme variação em seus dados, passando de 82,92 para 174,08 toneladas de CO₂ equivalente. Ocorre devido às diferenças muito locais, especialmente por causa da porcentagem de carbono (tabela S2).

QUANTIDADE DE CARBONO (Kg CO2 eq.)				
PARCELA	P1	P2	P3	P4
QUANTIDADE DE CARBONO POR PARCELA (Tons CO2 eq./ha)	183,88	118,58	91,99	138,81
Média de CO2 equivalente por hectare após interpolação [tons de CO2 eq./ha]	127,33			
Área total do SAF (ha)	0,854			
Peso total do CO2 eq. no SAF [tons de CO2 eq.]	108,74			

Tabela 3 - Média, área e peso total do componente subterrâneo do Sistema Agroflorestal RC.

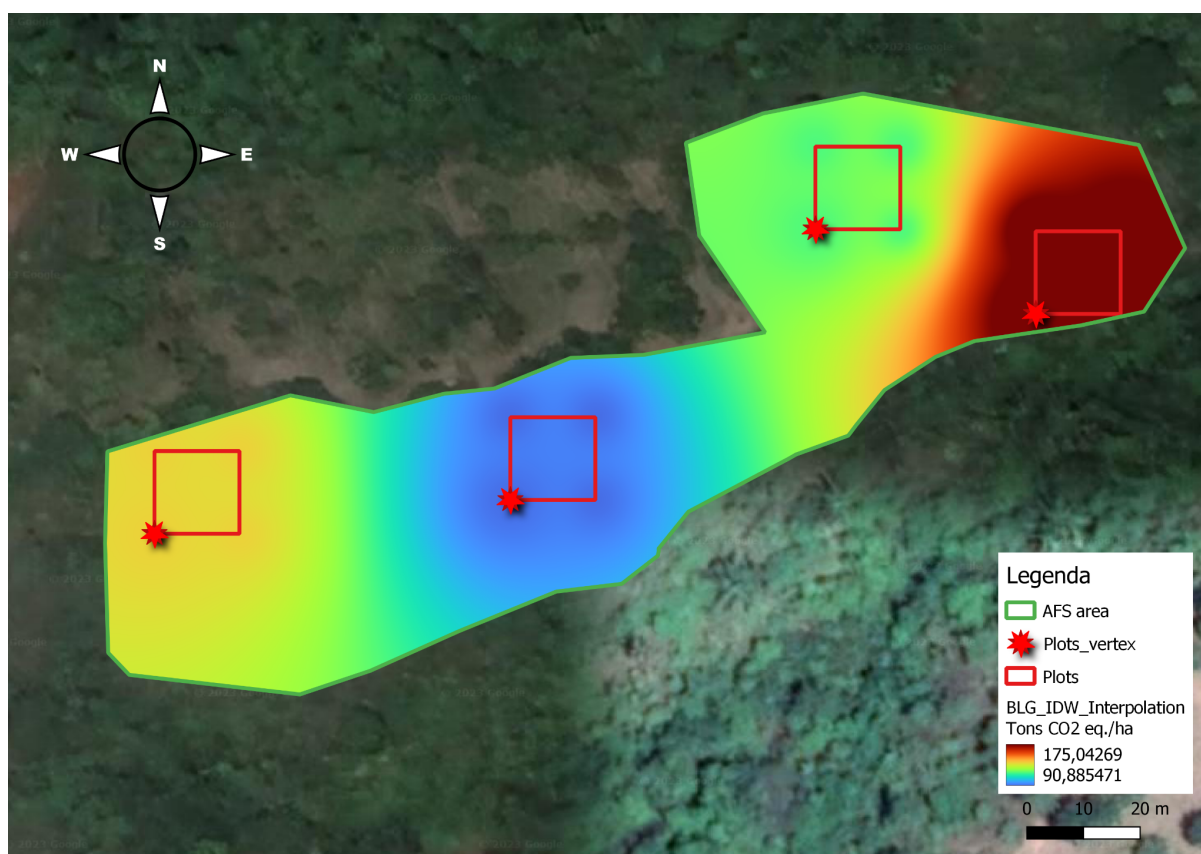


Figura 8 – Estoque de equivalente a Co2 [kg de Co2 eq.] do componente abaixo do solo do RC AFS. [Software de mapas QGIS 3.22. Dados: UTM SIRGAS 2000 24S]

Neste ponto, com o teor de carbono ABG e BLG medido é possível somar esses dois componentes (tabelas 2 e 3) e quantificar o estoque total de CO2 equivalente medido no sistema agroflorestal RC (tabela 4 e figura 9).

Sistema	Média de CO2 eq. por hectare [BLG] (tons de CO2 eq./ha)	Média de CO2 eq. por hectare [ABG] (tons de CO2 eq./ha)	Média de CO2 eq. por hectare [ABG + BLG] (tons de CO2 eq./ha)	Área (ha)	TOTAL DE CO2 NO SAF (tons de CO2 eq.)
SAF da RC	127,33	29,70	157,03	0,854	134,10

Tabela 4 – Média de CO2 equivalente para componentes abaixo do solo (BLG) e acima do solo (ABG), área e peso total de CO2 equivalente (de ABG + BLG) para o Sistema Agroflorestal Resgate Climático. Tradução das colunas da esquerda para direita: Sistema; Média de CO2 eq por hectare abaixo do solo (BLG) (tons CO2 eq. / ha); Média de CO2 eq por hectare acima do solo (ABG) (tons CO2 eq. / ha); Média de CO2 eq por hectare abaixo e acima do solo (tons CO2 eq. / ha); Área (ha); Peso total de CO2 eq.

A eficiência do solo em estocar carbono é maior do que na biomassa viva acima do solo no início da vida útil de um projeto de sistema agroflorestal. Aproximadamente 20% do carbono total do RC SAF foi estocado pelo componente ABG, enquanto 80% é devido ao solo.

Aproximadamente 134,1 toneladas de CO2 equivalente foram estocadas pelos sistemas agroflorestais. É importante deixar claro que a quantidade de carbono mostrada na figura 9 é o equivalente médio de CO2 por hectare calculado a partir da interpolação e multiplicado pela área de SAF.

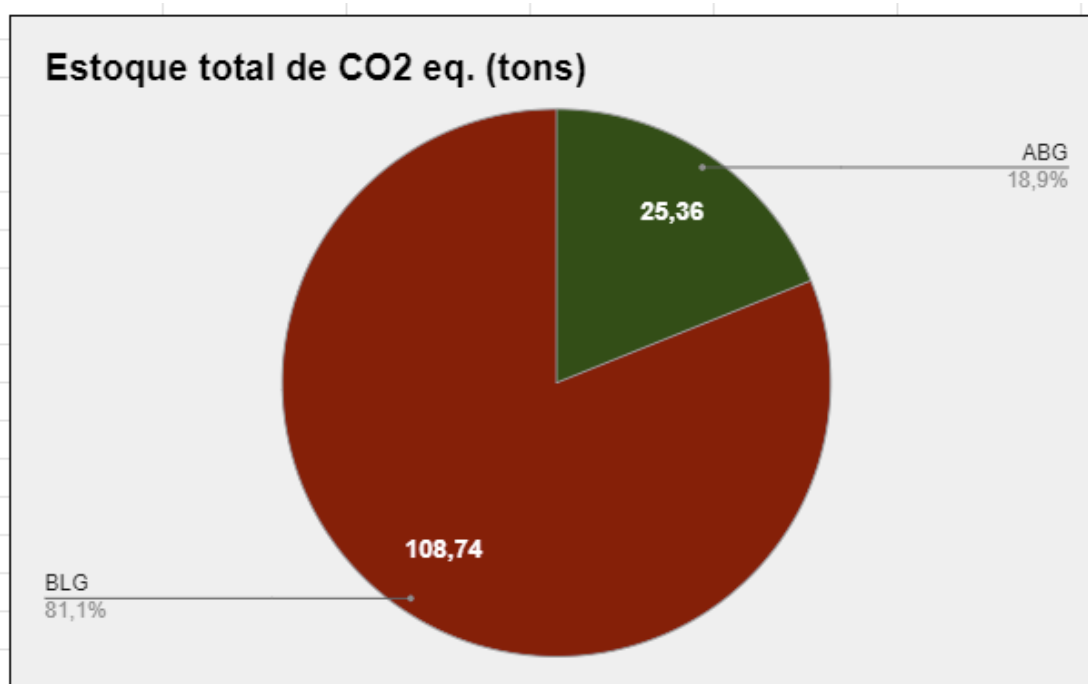


Figura 9 - Peso total de CO2 equivalente para o SAF da RC. A cor verde representa o estoque de componentes ABG e a cor marrom representa o estoque de componentes BLG.

05 | Considerações finais

O CO₂ eq./ha armazenado nas próprias plantas de cacau no sistema agroflorestal da RC ainda não foi contabilizado porque essas plantas serão plantadas em julho/2023 e muitas bananas ainda não têm o diâmetro mínimo para serem incluídas no equação (fator de inclusão de 5 cm). Estudos de Arapyaú mostraram que, em média, o cacau responde por cerca de apenas 40% do carbono aéreo total nos sistemas “Cabruca”. Além disso, esses sistemas “Cabruca” são mais antigos que os SAFs RC, o que mostra que, à medida que a agrofloresta RC amadurece, os números continuarão a aumentar. As próprias plantas de cacau não são o principal fixador de carbono nos sistemas agroflorestais, as árvores são.

Além da comparação entre estudos semelhantes sobre a capacidade de sequestro de carbono em sistemas agroflorestais com cacau, também é interessante comparar a capacidade de captura entre monocultura e sistemas mais complexos (como agroflorestas). Estudos de sistemas de monocultura e cacau não orgânico no vale Kulawi em Sulawesi Central, estado da Indonésia, mostraram que a biomassa viva acima do solo dos sistemas de monocultura de cacau armazenava cerca de 38,86 toneladas de CO₂ eq./ha. Essas áreas foram 25 anos após a implantação, com espaçamento de 3 m x 3 m (Abou Rajab et al., 2016). O Sistema Agroflorestal RC em apenas um ano pós-plantio e já possui 157,03 toneladas de CO₂ eq./ha armazenadas, com o espaçamento de 3 m x 3 m entre linhas de cacau e árvores, que é superior a 25 anos de monocultura e acabamos de contabilizar o estoque de carbono nas árvores de regeneração natural porque as árvores plantadas ainda não estavam com o diâmetro mínimo. No presente estudo, o componente solo possui 108,74 CO₂ eq./ha (SAF implementado em 2022), em uma profundidade de 20 cm. Em sistemas agroflorestais associados a *Inga densiflora*, na Costa Rica, na camada entre 0 e 40 cm, foram encontrados 408,06 toneladas de CO₂ eq./ha (Hergoualc'h et al. 2012), enquanto em 30 cm de profundidade em sistemas agroflorestais no Peru, foram medidos 370 toneladas de CO₂ eq./ha em um sistema com 15 anos de idade. Dadas essas referências e percebendo que as profundidades analisadas nesses sistemas são maiores, o que implica em mais carbono sendo quantificado o que não significa que o sistema necessariamente, estoque mais carbono. Assim, esperamos que o sistema de RC sequestre grandes quantidades de carbono nos próximos anos, à medida que os sistemas amadurecem.

Quando pensamos em outra commodity como o café, que é outra cultura possível de ser cultivada no SAF, estudos relacionados ao sequestro de carbono em sistemas de monocultura e café não orgânico em Minas Gerais mostraram que os solos poderiam capturar de 183,33 a 333,66 toneladas de CO₂ eq. /ha. Esses resultados mostraram que mesmo mais jovem, o sistema agroflorestal do RC mostrou uma enorme capacidade de estocar carbono nos solos, sendo capaz de sequestrar mais do que os sistemas agrícolas mais antigos. A porcentagem de carbono total dos componentes ABG e BLG difere de alguns artigos revisados por pares. Nosso estudo mostrou que aproximadamente 20% do estoque total de carbono foi capturado pelo componente ABG, o que está de acordo com alguns estudos (Andrade et al. 2014; Ehrenbergerová et al. 2016; Nair 2012; Andrade e Zapata 2019). No entanto, outros apresentam menor quantidade de carbono estocada pelo componente ABG em sistemas agroflorestais, com cerca de apenas 10% (Ávila et al. 2001; Schmitt-Harsh et al. 2012; van Noordwijk et al. 2002; Häger 2012; Soto- Pinto et al. 2000; Hernández Vásquez et al. 2019; Dossa et al. 2008).

06 | Conclusão

O presente estudo mostra que o estoque de carbono base do Sistema Agroflorestal da RC é de 134,1 toneladas de CO₂ equivalentes, sendo 25,36 do componente ABG e 108,74 do componente BLG.

A adoção de estratégias ecossistêmicas (um tipo de gestão que aumenta a resiliência e reduz a vulnerabilidade das pessoas e do ecossistema às mudanças climáticas) é crucial para evitar os limites dos efeitos irreversíveis das mudanças climáticas. Além do manejo orgânico, a implementação da agrofloresta fornece biodiversidade, acrescenta mais matéria orgânica aos solos e cria culturas mais resilientes em eventos extremos, ainda sendo economicamente atraente (Kerr et al. 2022).

O Resgate Climático tem mostrado o potencial de aumentar o estoque de carbono nas plantações com a adoção de agroflorestas. Essa estratégia pode ajudar a mitigar as mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, fornecer cacau, madeira, frutas, superalimentos e especiarias que o mundo inteiro adora.

Desenvolvedora do Projeto Agroflorestal: Associação Resgate Climático

Desenvolvedora da Metodologia de Mensuração de Carbono em SAF: Courageous Land (CL)

Orientação, Supervisão e Revisão (Engenheiro Florestal da CL): Rafael Ciriqui



Obrigado!

07 | Referências

- Abou Rajab Y, Leuschner C, Barus H, Tjoa A, Hertel D (2016) Cacao Cultivation under Diverse Shade Tree Cover Allows High Carbon Storage and Sequestration without Yield Losses. *PLoS ONE* 11(2): e0149949. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149949>.
- Andrade, H. J., M. A. Segura, D. S. Canal, M. F. J. J. Alvarado, and L. M. Marín, 2014: Sustainable agroecosystems in climate change mitigation. *Sustain. agroecosystems Clim. Chang. Mitig.*, 53–66.
- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez, and M. Ibrahim, 2001: Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *8*:32–35.
- Alves, L. F., S. A. Vieira, M. A. Scaranello, P. B. Camargo, F. A. M. Santos, C. A. Joly, and L. A. Martinelli, 2010: Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest (Brazil). *For. Ecol. Manage.*, 260, 679–691, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.05.023>.
- Brown, S., and L. R. Iverson, 1992: Biomass estimates for tropical forests. *World Resour. Rev.*, 4, 366–384.
- Chave, J., and Coauthors, 2005: Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87–99, <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.
- Collins, F. C. ., and P. V. Bolstad, 1996: A Comparison of Spatial Interpolation Techniques in Temperature Estimation. *Proc. Third Int. Conf. Integr. GIS Environ. Model. St. Fe, New Mex. January 21-25, 1996. St. Barbar. Calif. Natl. Cent. Geogr. Inf. Anal.*,.
- Conti, G., and Coauthors, 2019: Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 28, 961–975, <https://doi.org/10.1111/geb.12907>.
- Dossa, E. L., E. C. M. Fernandes, W. S. Reid, and K. Ezui, 2008: Above- and below-ground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. *Agrofor. Syst.*, 72, 103–115, <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9075-4>.
- Ehrenbergerová, L., E. Cienciala, A. Kučera, L. Guy, and H. Habrová, 2016: Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agrofor. Syst.*, 90, 433–445.
- Häger, A., 2012: The effects of management and plant diversity on carbon storage in coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agrofor. Syst.*, 86, 159–174, <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9545-1>.

Hartkamp, A. D., K. Beurs, A. Stein, and J. W. White, 1999: Interpolation techniques for climate variables, geographic information systems, vol 99-01.

Hergoualc'h, K., E. Blanchart, U. Skiba, C. Hénault, and J. M. Harmand, 2012: Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 148, 102–110, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.018>.

Hernández Vásquez, E., G. V. Campos Ángeles, J. R. Enríquez del Valle, G. Rodríguez-Ortiz, and V. A. Velasco Velasco, 2019: CAPTURA DE CARBONO POR *Inga jinicuil* Schlttdl. EN UN SISTEMA AGROFORESTAL DE CAFÉ BAJO SOMBRA.

IPCC, 2006: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prep. by Natl. Greenh. Gas Invent. Program. Egglest. H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. Tanabe K. (eds). Publ. IGES, Japan., 4.

Isaaks, H. B., and R. M. Srivastava, 1989: An Introduction to Applied Geostatistics. 561 pp.

Kerr, R. B., and Coauthors, 2022: Food, Fibre, and other Ecosystem Products. *Clim. Chang. 2022 Impacts, Adapt. Vulnerability. Work. Gr. II Contrib. to IPCC Sixth Assess. Rep.*, 1–286.

Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, 2006: World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. In: Zeitschrift*, 15, 259–263, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.

Levantamento dos dados da flora das cabucas e estimativa de estoque de carbono utilizando a ferramenta GHG Protocol. ARAPYAUÍ. 2021.

Mukul, S. A., M. A. Halim, and J. Herbohn, 2020: Forest Carbon Stock and Fluxes: Distribution, Biogeochemical Cycles, and Measurement Techniques. *Life Land, Ecnycl. UNSustain. Dev. Goals*, 361–376, https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5_23-1.

Nair, P. K. R., 2012: Carbon sequestration studies in agroforestry systems: A reality-check. *Agrofor. Syst.*, 86, 243–253, <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9434-z>.

Paradelo, R., I. Virto, and C. Chenu, 2015: Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 202, 98–107.

Padovan, M., G. de Brito Salomão, Z. Valdivina Pereira, L. Flávio Carneiro, and S. Sefara Lopes Fernandes, 2017: Estoque De Carbono Na Biomassa Vegetal Em Sistemas Agroflorestais De Base Agroecológica Na Região Fronteiriça Do Brasil Com O Paraguai. 15.

Scharlemann, J. P. W., E. V. J. Tanner, R. Hiederer, and V. Kapos, 2014: Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Manag.*, 5, 81–91, <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>.

Schmitt-Harsh, M., T. P. Evans, E. Castellanos, and J. C. Randolph, 2012: Carbon stocks in coffee agroforests and mixed dry tropical forests in the western highlands of Guatemala. *Agrofor. Syst.*, 86, 141–157, <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9549-x>.

Somarriba, E., and Coauthors, 2013: Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 173, 46–57, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>.

Soto-Pinto, L., I. Perfecto, J. Castillo-Hernandez, and J. Caballero-Nieto, 2000: Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal Zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 80, 61–69.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2013: AR- TOOL14 - Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM project activities. 32.

van Noordwijk, M., S. Rahayu, K. Hairiah, Y. C. Wulan, a Farida, and B. Verbist, 2002: Carbon stock assessment for a forest-to-coffee conversion landscape in Sumber-Jaya (Lampung, Indonesia): from allometric equations to land use change analysis. *Sci. China Ser. C-Life Sci.*, 45, 75–86.

Velasco, 2009: Estimativa de sequestro de carbono em mata ciliar: projeto POMAR, São Paulo (SP) / Estimate of carbon sequestration in riparian forests: the POMAR project case, São Paulo (SP). *Ambiência*, 5, 135–141.