

Métodos de Quantificação de Fluxos e Estoques de Carbono: Revisão Sistemática, Análise Bibliométrica e Ferramentas de Apoio à Decisão no Contexto Português

Jeferson Dariva Singer

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por

João Carlos Martins de Azevedo

Andriele De Pra Carvalho

Manuel Joaquim Sabença Feliciano

**Bragança
2026**

À memória do meu pai, cuja presença ainda sinto guiando-me em cada passo da jornada; à minha mãe, cuja força e dedicação incansáveis são a minha inspiração diária; e aos professores que com paciência e sabedoria compartilharam não só o seu conhecimento, mas também a sua paixão pelo aprendizado, dedico esta dissertação. Cada um de vocês moldou a pessoa que me tornei e o trabalho que agora completo. Com gratidão e amor, celebro o legado de meu pai, a resiliência de minha mãe e a orientação valiosa dos meus mentores. Este é o fruto do amor, do sacrifício e da educação que vocês me proporcionaram.

AGRADECIMENTOS

Neste momento significativo da minha jornada acadêmica, gostaria de expressar minha profunda gratidão e reconhecimento a todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado. Um agradecimento especial ao meu pai José (em memória), que me inspirou a perseguir meus sonhos com determinação e paixão. À minha mãe Vaní, cujo incansável trabalho e amor incondicional foram a base do meu sucesso. Ao meu orientador Professor João Carlos Martins Azevedo (IPB), pela sabedoria e orientação valiosa, e aos co-orientadores Professor Manuel Joaquim Sabença Feliciano (IPB) e Professora Andriele De Prá Carvalho (UTFPR-FB), cuja expertise e *insights* foram essenciais para o meu crescimento intelectual. Aos professores que compartilharam seu conhecimento e me desafiaram a ir além. Ao Instituto Politécnico de Bragança e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão, pelo ambiente acadêmico enriquecedor e pelas oportunidades de aprendizado.

A todos vocês, meu sincero obrigado.

RESUMO

A quantificação dos fluxos e estoques de carbono é essencial para compreender o papel dos ecossistemas na mitigação climática, dado que o CO₂ antropogénico é o principal impulsionador do aquecimento global. Esta dissertação investigou técnicas de quantificação do carbono sequestrado e emitido por meio de uma revisão sistemática PRISMA e de uma análise bibliométrica, identificando métodos *bottom-up* e *top-down*, tendências científicas e lacunas de investigação. Foram analisados 131 artigos da *Web of Science*, complementados pelo uso de *Rayyan*, *VOSviewer* e *Power BI*. Os principais métodos identificados incluem Câmaras (33), Amostragem de solo (32), Detecção remota (30), Covariância de *Eddy* (20), Modelação matemática (11) e Inventário florestal (5). Propuseram-se ferramentas operacionais como Protocolo Base de Inventário de Carbono (PBIC), Modelo de Apoio a Decisão (MCAD) e uma Framework metodológica para apoiar a seleção de técnicas no contexto português. Conclui-se que nenhum método é suficiente isoladamente, sendo necessária a integração de medições diretas, detecção remota e modelação, bem como a padronização de protocolos. Os resultados reforçam a necessidade de validação híbrida, desenvolvimento de modelos regionais e expansão das redes de monitorização para fortalecer a gestão ambiental e as políticas climáticas.

Palavras-Chave: Sequestro de Carbono; Emissão de Carbono; Avaliação; Métodos

ABSTRACT

The quantification of carbon fluxes and stocks is essential for understanding the role of ecosystems in climate mitigation, given that anthropogenic CO₂ is the primary driver of global warming. This dissertation investigated techniques for quantifying sequestered and emitted carbon through a PRISMA-based systematic review and a bibliometric analysis, identifying bottom-up and top-down methods, scientific trends, and research gaps. A total of 131 articles from the Web of Science were analysed, supported by the use of Rayyan, VOSviewer and Power BI. The main methods identified include Chamber techniques (33), Soil sampling (32), Remote sensing (30), Eddy covariance (20), Mathematical modelling (11) and Forest inventory (5). Operational tools were proposed the Carbon Inventory Base Protocol (PBIC), the Decision Support Model (MCAD) and a methodological framework to assist in the selection of techniques within the Portuguese context. The findings indicate that no single method is sufficient, requiring the integration of direct measurements, remote sensing and modelling, as well as the standardisation of protocols. The results reinforce the need for hybrid validation, the development of regionally calibrated models and the expansion of monitoring networks to strengthen environmental management and climate policy.

Keywords: Carbon emission; Carbon sequestration; Assesment; Evaluation; Méthods.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vi
LISTA DE SIGLAS ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE QUADROS	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral e Específicos	3
1.2. Estrutura da Tese	3
2. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	5
2.1. Desenho do Estudo.....	5
2.2. Análise Bibliométrica e Revisão Bibliográfica	6
2.3. Protocolo de Pesquisa	7
2.3.1. <i>Ecossistema Digital de Análise e Inteligência</i>	11
2.3.2. <i>Plataforma Digital Web Of Science (WOS)</i>	11
2.3.3. <i>Software Rayyan</i>	12
2.3.4. <i>Software VOSviewer</i>	12
2.3.5. <i>Software Microsoft Power BI</i>	12
3. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO: ESTADO DA ARTE (REVISÃO SISTEMÁTICA)	14
3.1. Monitorização de Fluxos Gasosos (Interface Superfície/atmosfera).....	15
3.1.1. <i>Covariância de Vórtices (Eddy Covariance)</i>	15
3.1.2. <i>Método da Câmaras ou Método da Caixa</i>	17
3.2. Avaliação de Estoques de Carbono no Solo (COS)	20
3.2.1. <i>Métodos de Amostragem: Perfil de Solo Inteiro (ESP) vs. Seções de Controle (SCS)</i>	20
3.2.2. <i>Tecnologias Analíticas: Espectroscopia (MIRS e LIBS) e Isótopos Estáveis</i> ...	21
3.3. Quantificação de Biomassa e Carbono Florestal	23
3.3.1. <i>Inventários de Campo e Equações Alométricas</i>	23
3.3.2. <i>Tecnologias de Detecção Remota: Satélites e UAV-SFM)</i>	24
3.4. Modelação e Abordagens Integradas: Modelos Biogeoquímicos e Dinâmicos (DNDC, SWAT, Biome-BGC).....	26

3.5.	Sinergia Metodológica: Correlação <i>Bottom-Up</i> e <i>Top-down</i>	28
3.5.1.	<i>Abordagens Botton - up</i>	28
3.5.2.	<i>Abordagens Top down</i>	29
3.5.3.	<i>Comparação entre os métodos</i>	30
4.	MAPEAMENTO DA CIÊNCIA GLOBAL: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	31
4.1.	Evolução Temporal e Domínios Científicos Dominantes.....	31
4.2.	Geopolítica da Investigação em Carbono	32
4.3.	Redes de Coautoria e Influência Científica	37
4.4.	Síntese Crítica: Implicações para o Estado da Arte	41
4.4.1.	<i>Correlação Entre Clusters e Métodos</i>	41
4.4.2.	<i>Implicações para o Campo de Quantificação de Carbono</i>	42
5.	DESAFIOS E LIMITAÇÕES NA MEDIÇÃO DO CARBONO	43
6.	FERRAMENTAS DE APOIO À DECISÃO E PROTOCOLOS OPERACIONAIS	45
6.1.	Framework Operacional.....	45
6.2.	Protocolo Base de Inventário de Carbono (PBIC).....	54
6.2.1.	<i>Planejamento e Estratificação</i>	55
6.2.2.	<i>Análise e Modelação</i>	56
6.3.	Avaliação de Estoque (<i>Stock Assessment</i>).....	60
6.3.1.	<i>Foco em Biomassa (Acima do Solo)</i>	60
6.3.2.	<i>Foco em Carbono do Solo (SOC e SIC)</i>	60
6.4.	Avaliação de Fluxo (<i>Flux Assessment</i>).....	60
6.4.1.	<i>Medição Direta de Trocas Gasosas (CO₂)</i>	60
6.4.2.	<i>Modelação e Aplicações Especiais</i>	61
6.5.	Contribuição da Framework Operacional como Auxílio aos Profissionais.....	61
6.6.	Avaliação de Estoques de Carbono (<i>Carbon Stocks</i>).....	64
6.6.1.	<i>Carbono Orgânico do Solo (SOC)</i>	64
6.6.2.	<i>Biomassa Vegetal</i>	64
6.6.3.	<i>Monitoramento de Fluxos de Carbono (Carbon Fluxes)</i>	64
6.6.4.	<i>Escalonamento e Verificação Via Detecção Remota</i>	65
6.6.5.	<i>Modelação e Integração de Dados</i>	65
7.	APLICAÇÃO AO CONTEXTO DE PORTUGAL E NORDESTE TRANSMONTANO.....	67
7.1.	Reclassificação Estrutural da Floresta Portuguesa	67
7.2.	Inventário Florestal Como “Verdade de Campo” na Região Norte.....	68

7.3. Metas e Obrigações Legais de Portugal e do Nordeste Transmontano.....	71
8. DISCUSSÃO GERAL E SÍNTESE DE RECOMENDAÇÕES.....	73
8.1. Análise Comparativa dos Métodos.....	73
8.2. Recomendações para Melhoria das Práticas de Sequestro	74
8.3. Combinações mais Eficazes Identificadas nos Estudos para Otimizar a Precisão e Quantificar as Incertezas.....	77
8.4. Benefícios da Utilização da <i>Framework</i> Operacional e do Modelo de Decisão Sugeridos.....	79
9. CONCLUSÕES.....	85
BIBLIOGRAFIA	87
ANEXO I.....	91
ANEXO II.....	95
ANEXO III	102

LISTA DE SIGLAS ACRÔNIMOS E ABREVIATURAS

ACD	Aboveground Carbon Density	Densidade de carbono acima do solo
AGB	Aboveground Biomass	Biomassa acima do solo
AMDAR	Aircraft Meteorological Data Relay	Retransmissão de dados meteorológicos por aeronaves
AToMS	Airborne Taxonomic Mapping System	Sistema aerotransportado de mapeamento taxonômico
BCSA	Biomass Carbon Stock Assessment	Avaliação de estoque de carbono da biomassa
BD	Bulk Density	Densidade do solo
C	Carbon	Carbono
CAO	Carnegie Airborne Observatory	Observatório Aerotransportado Carnegie
CHM	Canopy Height Model	Modelo de altura da copa
CO	Carbon Monoxide	Monóxido de carbono
CO ₂	Carbon Dioxide	Dióxido de carbono
COS	Cartas de Ocupação do Solo	Mapas de uso e ocupação do solo
COV	Volatile Organic Compounds	Compostos orgânicos voláteis
COVB	Biogenic Volatile Organic Compounds	Compostos orgânicos voláteis biogênicos
COVNM	Non-methane Volatile Organic Compounds	Compostos orgânicos voláteis não metanos
CRDS	Cavity Ring-Down Spectroscopy	Espectroscopia de decaimento em cavidade
CS	Carbon Stock	Estoque de carbono
DBH	Diameter at Breast Height	Diâmetro à altura do peito
DCM	Digital Canopy Model	Modelo digital da copa
DN	Digital Numbers	Valores digitais de pixel
DTM	Digital Terrain Model	Modelo digital do terreno
EACD	Estimated Aboveground Carbon Density	Densidade estimada de carbono acima do solo
EC	Estoque de Carbono	Carbon Stock
ESP	Entire Soil Profile	Perfil completo do solo
FAO	Food and Agriculture Organization	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FC	Fluxo de Carbono	Carbon Flux
FLUXNET	Global Flux Network	Rede global de fluxos ecossistêmicos
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
GAMs	Generalized Additive Models	Modelos aditivos generalizados
GC-MS	Gas Chromatography– Mass Spectrometry	Cromatografia gasosa com espectrometria de massas
GCP	Ground Control Point	Ponto de controle terrestre
GHG	Greenhouse Gas	Gás de efeito estufa
GPP	Gross Primary Productivity	Produtividade primária bruta
GPS	Global Positioning System	Sistema de posicionamento global
GSD	Ground Sample Distance	Tamanho de pixel no solo
IAM	Integrated CO ₂ Absorption– Mineralisation	Processo integrado de absorção e mineralização de CO ₂
IGEO	Instituto Geográfico Português	Instituto Geográfico Português
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IRGAs	Infrared Gas Analyzers	Analisadores de gases por infravermelho
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre	Centro Internacional de Referência e Informação do Solo
LA	Los Angeles	Los Angeles
LCLUC	Land Cover/Land-Use Change	Mudança de uso e cobertura da terra
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy	Espectroscopia de plasma induzido por laser
LiDAR	Light Detection and Ranging	Deteção e medição por laser
LJO	La Jolla	La Jolla
LST	Land Surface Temperature	Temperatura da superfície terrestre
LULC	Land Use and Land Cover	Uso e cobertura da terra

MADCAL	Multivariate Alteration Detection and Calibration	Deteção e calibração multivariada de alterações
MCAD	Modelo Conceitual de Apoio à Decisão	Modelo conceitual de apoio à decisão
MIRS	Mid-Infrared Spectroscopy	Espectroscopia no infravermelho médio
MMD	Malaysian Meteorological Department	Departamento Meteorológico da Malásia
MWO	Mount Wilson	Monte Wilson
NOAA/ESRL	National Oceanic and Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory	Laboratório de Pesquisa do Sistema Terrestre da NOAA
NOX	Nitrogen Oxides	Óxidos de azoto
PAR	Photosynthetically Active Radiation	Radiação fotossinteticamente ativa
PBIC	Protocolo Base de Investigação de Carbono	Protocolo base de inventário de carbono
PBL	Planetary Boundary Layer	Camada limite planetária
PCC	Post-Combustion CO ₂ Capture	Captura de CO ₂ pós-combustão
PH	Phaeozems	Tipo de solo
PVP	Palos Verdes Peninsula	Península de Palos Verdes
PZ	Piperazine	Piperazina
RADAR	Radio Detection and Ranging	Deteção e medição por rádio
RE	Ecosystem Respiration	Respiração do ecossistema
REDD+	Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation	Redução de emissões por desmatamento e degradação florestal
RF	Random Forests	Florestas aleatórias
RMSE	Root Mean Squared Error	Erro quadrático médio
SC	Sequestro de Carbono	Carbon Sequestration
SCB	South Coast Air Basin	Bacia aérea da Costa Sul
SCI	San Clemente Island	Ilha de San Clemente
SCS	Soil Control Section	Seção de controle do solo

SFM	Structure-from-Motion	Estrutura a partir do movimento
SIO	Scripps Institution of Oceanography	Instituição de Oceanografia Scripps
SOC	Soil Organic Carbon	Carbono orgânico do solo
SOCS	Soil Organic Carbon Stocks	Estoques de carbono orgânico do solo
SOM	Soil Organic Matter	Matéria orgânica do solo
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	Missão de topografia por radar da Shuttle
SWIR	Short-Wave Infrared	Infravermelho de onda curta
SVM	Support Vector Machine	Máquina de vetores de suporte
TCH	Top of Canopy Height	Altura do topo da copa
TOR	Top of Atmosphere Radiance	Radiância no topo da atmosfera
T-SOCS	Total Soil Organic Carbon Stocks	Estoques totais de carbono orgânico do solo
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Veículo aéreo não tripulado
UHF	Ultra-High Frequency	Frequência ultra-alta
UHI	Urban Heat Island	Ilha de calor urbana
USC	University of Southern California	Universidade do Sul da Califórnia
VIC	Victorville	Victorville
WMO	World Meteorological Organization	Organização Meteorológica Mundial
WOS	Web of Science	Plataforma Web of Science
XRD	X-ray Diffraction	Difração de raios-X
XRF	X-ray Fluorescence	Fluorescência de raios-X
XXS	Excess Signal	Sinal de excesso

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do processo de identificação e seleção de artigos científicos adotado com base no método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).	5
Figura 2 - Fluxograma detalhado de exclusões de artigos.....	10
Figura 3 – Quantidade de artigos por processo, em que (EC) refere-se ao Estoque de Carbono, (SC) Sequestro de Carbono e (FC) Fluxo de Carbono.	14
Figura 4 - Métodos empregados: Quantidade de artigos encontrados para cada método de mensuração de carbono.	15
Figura 5 - Publicações por ano. Escala temporal evidenciando o aumento de publicações desta temática ao longo do tempo (1995 – 2025).	31
Figura 6 - Áreas do conhecimento que publicaram artigos sobre o tema pesquisado.....	32
Figura 7 - Gráfico em Barras. Local onde os artigos foram publicados.....	33
Figura 8 - Gráfico Global gerado através do software Power BI. Países onde se publicaram mais artigos.	33
Figura 9 - Países em que mais se realizaram estudos, coleta de dados ou utilização de bancos de dados.	34
Figura 10 - Países onde ocorreram os estudos e/ou coleta de dados. Locais onde coletaram-se dados ou onde foram foco de observações para os estudos.....	35
Figura 11 - Universidades que mais publicaram artigos referente aos métodos de quantificação de carbono.....	36
Figura 12 - Autores mais citados. Quantidade de vezes que os Autores publicaram.	37
Figura 13 - Teia de Palavras - força de atração entre os termos das publicações consideradas neste estudo, termos que se interconectam. Quanto mais espessa a linha que conecta os grupos de palavras maior o número de vezes que estas palavras aparecem no mesmo.	38
Figura 14 - Teia de Coautoria. Autores que publicaram com outros autores.	38
Figura 15 - Autores com maior força de ligação.	39
Figura 16 - Gráfico no formato Density Visualization. Palavras de maior peso.	39
Figura 17 - Força de ligação entre as subáreas distintas. Clusters com as palavras – chave principais unidas às demais por uma linha que quanto mais espessa maior é a força de atração entre as palavras, ou seja mais aparecem ao mesmo tempo nos artigos.....	40
Figura 18 ; Framework operacional.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Campos de busca da mesma pesquisa com palavras chave e conectores booleanos utilizado no WOS	8
Quadro 2 - Matriz de decisão para orientar profissionais / entidades a selecionar o melhor método para avaliação do Carbono em função das condicionalidades	46
Quadro 3 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO ₂ para Avaliação de Estoques de Carbono (Carbon Stock Assessment)	50
Quadro 4 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO ₂ para medição de Fluxos de Carbono (Carbon Flux Measurement)	51
Quadro 5 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO ₂ para Avaliação de Carbono em Escala Regional e Urbana	52
Quadro 6 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO ₂ para Avaliação de Processos de Mitigação (Fixação e Sequestro).....	53
Quadro 7 - Protocolo base de inventário de carbono (PBIC).....	55
Quadro 8 - Modelo Conceitual de Apoio à Decisão (MCAD)	59
Quadro 9 – Síntese.....	81
Quadro 10 - Dificuldade predominate em todos os métodos	102
Quadro 11 - Dificuldades / limitações na Amostragem de solo	105
Quadro 12 - Dificuldades / incertezas na modelação computacional.....	106
Quadro 13 - Dificuldades / incertezas na medição das emissões urbanas e industriais	107
Quadro 14 - Limitações e incertezas em casos específicos	107

1. INTRODUÇÃO

As emissões de carbono provenientes de atividades humanas constituem um dos principais motores das mudanças climáticas globais, dado que o dióxido de carbono (CO_2) é o gás de efeito estufa mais relevante em termos de contribuição radiativa. A redução direta das emissões associadas à queima de combustíveis fósseis, aos processos industriais, aos transportes e à agricultura permanece a estratégia mais eficaz para limitar o aumento da concentração atmosférica de CO_2 . O sequestro de carbono entendido como a remoção e armazenamento de CO_2 da atmosfera desempenha um papel complementar, essencial para compensar emissões residuais e apoiar metas de neutralidade carbônica, mas não substitui a necessidade de mitigação na fonte.

A quantificação rigorosa dos fluxos de carbono na interface superfície-atmosfera é fundamental para desenvolver estratégias de redução de emissões, ampliar a capacidade de sequestro e monitorizar o cumprimento de compromissos climáticos nacionais e internacionais. A compreensão dos processos subjacentes ao ciclo do carbono, incluindo emissões de origem antrópica e natural e mecanismos biológicos, químicos e físicos de sequestro, é central para avaliar o balanço global de carbono. O sequestro pode ocorrer em reservatórios naturais como florestas, solos, oceanos e turfeiras ou resultar de intervenções humanas, incluindo soluções baseadas na natureza e tecnologias de captura e estocagem de carbono.

Diferentes ecossistemas desempenham papéis distintos neste ciclo. Os solos, principais reservatórios terrestres de carbono orgânico (COS), são determinantes para a saúde do solo, a segurança ecológica e o ciclo de materiais, sendo o seu mapeamento e previsão essenciais (LI *et al.*, 2021). Zonas húmidas, como lagos e reservatórios, funcionam como reguladores do ciclo terrestre de carbono, podendo atuar como fontes ou sumidouros de CO_2 . Mesmo ambientes áridos, como desertos, podem sequestrar CO_2 por processos não fotossintéticos, contribuindo para a identificação de sumidouros de carbono “perdidos” e para a mitigação climática.

A avaliação da capacidade de sequestro destes ecossistemas é, portanto, de grande relevância (YANG *et al.*, 2022). A monitorização multiescala do nível molecular ao global é indispensável para compreender os mecanismos que regulam os estoques e fluxos de carbono e como estes respondem às mudanças climáticas e às atividades humanas (JIANG *et al.*, 2022). Pequenas alterações no estoque de COS podem provocar mudanças

significativas nas concentrações atmosféricas de CO₂, reforçando a necessidade de medições contínuas e metodologicamente robustas (LI *et al.*, 2021).

Dados de monitorização sustentam estratégias de gestão ambiental, permitem identificar áreas onde as concentrações atmosféricas aumentam mais rapidamente e orientam a necessidade de medições *in situ* mais detalhadas. Além disso, fornecem suporte para modelos climáticos e para a avaliação da confiabilidade de projeções futuras (FONSECA & FRANCIS, 2024). A mensuração dos fluxos de carbono possibilita avaliar o papel de ecossistemas como florestas, solos, zonas húmidas e desertos enquanto fontes ou sumidouros, contribuindo para a identificação da contribuição relativa de emissões antropogénicas e biogénicas, para a análise da degradação florestal e para a compreensão dos impactos de alterações no COS sobre a poluição atmosférica e o clima (TURNBULL *et al.*, 2018).

Sob a perspetiva ambiental, o sequestro de carbono é um processo chave na mitigação das mudanças climáticas, influenciando a distribuição de espécies, o funcionamento dos ecossistemas e a sua resiliência (YU, 2004). No âmbito social, a mensuração do sequestro contribui para a sensibilização sobre a importância da preservação e recuperação de ecossistemas, apoiando estratégias de adaptação e mitigação e orientando políticas urbanas e territoriais. A urbanização, por exemplo, reduz a cobertura vegetal, intensifica emissões e aumenta a temperatura da superfície, sendo essencial compreender estas dinâmicas para promover práticas sustentáveis (LI *et al.*, 2024).

Do ponto de vista económico, a quantificação do carbono é fundamental para orientar políticas públicas, apoiar mercados de carbono, incentivar práticas agrícolas e florestais sustentáveis e promover tecnologias de baixo carbono, como a captura e armazenamento de CO₂ (XU *et al.*, 2019). Também permite avaliar o impacto de práticas de gestão sustentável do solo e dos ecossistemas, incentivando a redução de emissões antropogénicas e o reforço da capacidade de remoção de carbono (OLIVEIRA *et al.*, 2009). Em termos científicos, a medição das trocas de carbono entre a biosfera e a atmosfera é imprescindível para compreender a dinâmica dos ecossistemas, que podem alternar entre comportamentos de fonte e sumidouro de CO₂ e outros gases de efeito estufa (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015).

Neste enquadramento, a quantificação rigorosa do carbono emerge como um pilar essencial para a ciência climática contemporânea, para a gestão ambiental e para a

formulação de políticas públicas informadas. A complexidade dos processos envolvidos exige metodologias robustas, padronizadas e multiescalares, capazes de capturar a variabilidade espacial e temporal dos fluxos e estoques de carbono e de apoiar estratégias eficazes de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

1.1. Objetivo Geral e Específicos

A presente dissertação de mestrado investiga as técnicas e processos envolvidos na quantificação do carbono sequestrado e emitido, combinando uma revisão sistemática da literatura e uma análise bibliométrica. O estudo busca não apenas entender as metodologias de medição e a definição científica do sequestro de carbono, mas também identificar lacunas de pesquisa, principais tendências e a relevância destas práticas no contexto ambiental atual.

O foco deste trabalho é realizar uma avaliação abrangente da literatura científica sobre métodos de sequestro e emissões de carbono, considerando múltiplas perspectivas: técnica, ambiental, social e econômica. Além disso, procura-se analisar a aplicabilidade de algumas metodologias, com base na sua eficácia e relevância local, oferecendo uma visão prática que conecta a ciência à tomada de decisão.

Como principais objetivos específicos, definimos os seguintes:

- a) Aplicar revisão sistemática PRISMA para identificar e classificar os principais métodos de quantificação de carbono (*bottom-up* e *top-down*) presentes na literatura recente;
- b) Analisar as aplicações práticas desses métodos em diferentes ecossistemas e avaliar sua relevância técnica, ambiental, social e econômica;
- c) Avaliar criticamente os impactos, limitações e incertezas das metodologias analisadas em múltiplas escalas geográficas;
- d) Propor ferramentas operacionais e recomendações para melhoria das práticas de avaliação e monitorização de carbono no contexto português.

1.2. Estrutura da Tese

A presente tese organiza-se em nove capítulos que estabelecem uma progressão lógica desde o enquadramento teórico e metodológico até à proposta de ferramentas

práticas e aplicação contextual. O Capítulo 1 introduz a problemática do ciclo do carbono no âmbito das alterações climáticas e os objetivos deste estudo.

O Capítulo 2 detalha a metodologia de investigação, descrevendo o desenho do estudo orientado pelo método PRISMA e o ecossistema digital de análise e inteligência.

No Capítulo 3, apresenta-se a revisão sistemática e o estado da arte, consolidando a descrição técnica dos métodos de quantificação de fluxos e estoques, como câmaras, amostragem de solo e deteção remota.

O Capítulo 4 dedica-se ao mapeamento da ciência global através de uma análise bibliométrica, identificando tendências temporais e redes de colaboração.

Os desafios inerentes à monitorização são abordados no Capítulo 5, que identifica as incertezas instrumentais e limitações nos diferentes ecossistemas

O Capítulo 6 apresenta as ferramentas de apoio à decisão, incluindo a *framework* operacional, o Protocolo Base de Inventário de Carbono (PBIC) e o Modelo Conceitual de Apoio à Decisão (MCAD)

A aplicação destes conceitos à realidade de Portugal e do Nordeste Transmontano é explorada no Capítulo 7, com foco na reclassificação estrutural e no inventário como "verdade de campo".

A discussão geral e a síntese de recomendações para a melhoria das práticas de sequestro constituem o Capítulo 8.

O trabalho encerra com o Capítulo 9, que apresenta as conclusões principais e as perspetivas futuras de investigação

2. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

2.1. Desenho do Estudo

O presente trabalho adota uma abordagem metodológica integrada, combinando uma revisão sistemática da literatura, orientada pelo método PRISMA, com uma análise bibliométrica, com o objetivo de caracterizar de forma abrangente o estado da arte relativo aos métodos de avaliação de sequestro e emissões de carbono.

A revisão sistemática foi conduzida segundo as diretrizes do método PRISMA, garantindo transparência, reprodutibilidade e rigor na identificação, seleção e elegibilidade dos estudos. Este método estrutura-se através de um fluxograma, que documenta todas as etapas do processo de revisão, desde a identificação inicial dos registos até à seleção final dos artigos incluídos, assegurando a rastreabilidade das decisões (Figura 1).

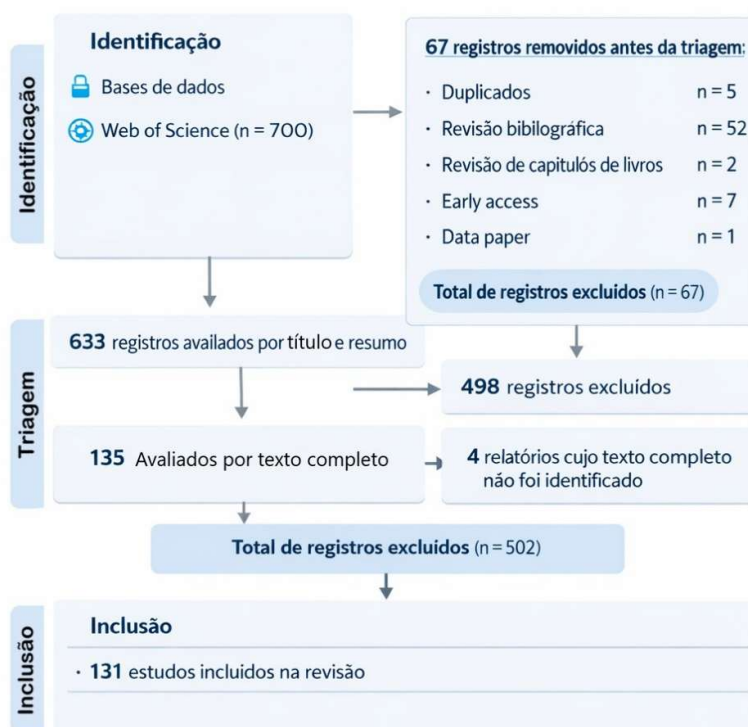


Figura 1 - Fases do processo de identificação e seleção de artigos científicos adotado com base no método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).

A aplicação do PRISMA revelou-se particularmente adequada neste trabalho, dado o caráter emergente e disperso do conhecimento sobre métodos de quantificação de

carbono, permitindo sistematizar e sintetizar informações sobre tecnologias e metodologias inovadoras.

2.2. Análise Bibliométrica e Revisão Bibliográfica

A revisão concentrou-se na identificação dos principais métodos de quantificação de emissões e sequestro de carbono, fornecendo uma base sólida para a análise comparativa e crítica do estado da arte. De forma complementar se explorou quantitativamente os padrões de publicação. Esta análise permitiu avaliar indicadores relevantes, tais como:

- Distribuição temporal das publicações;
- Áreas do conhecimento predominantes;
- Palavras-chave mais frequentes;
- Autores e instituições mais produtivos;
- Regiões geográficas com maior contribuição científica.

A bibliometria fornece uma visão estruturada da evolução do conhecimento, permitindo identificar tendências, lacunas de investigação e polos de produção científica. Além disso, evidencia a natureza cumulativa e colaborativa da ciência, permitindo compreender como novos desenvolvimentos se baseiam em estudos previamente publicados (FIDÉLIS *et al.*, 2009).

Foram selecionados 131 artigos, todos analisados na íntegra. Para cada estudo, foi elaborado um resumo estruturado e extraída informação relevante, organizada numa base de dados (Anexo I). Esta base incluiu variáveis descritivas e analíticas, utilizadas tanto na revisão sistemática quanto na análise bibliométrica.

A integração destas abordagens permitiu conjugar duas perspectivas complementares:

- Qualitativa, através da análise detalhada dos conteúdos e metodologias de cada estudo;
- Quantitativa, através da identificação de padrões de publicação, autores-chave, áreas científicas e tendências emergentes.

Esta abordagem combinada proporcionou uma compreensão mais robusta e abrangente do domínio em análise, reforçando a consistência dos resultados e oferecendo

subsídios para a definição de direções futuras de investigação, assim como para a aplicação prática de métodos de avaliação de carbono.

2.3. Protocolo de Pesquisa

Para realização da revisão sistemática seguiram-se cinco etapas que se iniciaram pela elaboração do protocolo de pesquisa. Em seguida identificaram-se os estudos mais relevantes na plataforma online de referências bibliográficas, selecionada para este estudo, a *Web of Science* (WOS). Pesquisaram-se artigos no idioma inglês e não foram incluídos artigos de revisão, capítulos de livros, enciclopédias ou editoriais. Na busca avançada selecionou-se a opção por “tópico” para encontrar artigos que contivessem em seus títulos, e /ou resumos e / ou palavras-chave pelo menos um dos seguintes termos: *Carbon emission; Carbon sequestration; Assesment; Evaluation; Méthods*. Tais termos são as palavras-chave definidas para o presente estudo.

As pesquisas com base em palavras-chave em língua inglesa se explicam devido ao fato de que as publicações são predominantemente neste idioma. Tal decisão foi importante para tornar a pesquisa mais abrangente e aumentar o seu alcance. Além disso operadores Booleanos foram utilizados para melhorar o mecanismo de busca na plataforma digital, cuja função foi combinar termos de interesse para a pesquisa. Os operadores utilizados nesta pesquisa foram: “AND” e “OR” para tornar os resultados das buscas tornando-a mais assertiva, dentro do objetivo planejado Tais operadores foram relevantes para esta pesquisa devido à grande gama de artigos que tratam da captura de carbono.

Os trabalhos em early access foram excluídos porque estes artigos não possuem versão final publicada e podem sofrer alterações antes da indexação definitiva, o que compromete a confiabilidade dos dados, a rastreabilidade das citações e a consistência metodológica da revisão sistemática. Já os artigos de revisão sistemática foram excluídos porque elas já representam sínteses secundárias da literatura, podendo introduzir duplicidade de estudos primários, vieses acumulados de seleção e análise, além de distorcer a estimativa real do corpo de evidências ao misturar níveis distintos de síntese.

As revisões de capítulos de livros não são estudos primários, mas sim sínteses narrativas, frequentemente opinativas, sem protocolo transparente, sem critérios explícitos de busca, seleção e avaliação da qualidade das evidências, por isso foram

excluídos. Também os Data papers são excluídos porque não apresentam resultados analíticos ou interpretações científicas, limitando-se à descrição de conjuntos de dados

A estratégia de busca adotada nesta dissertação fundamenta-se no uso do campo Tópico, cuja seleção amplia a sensibilidade da recuperação bibliográfica ao abranger termos presentes em títulos, resumos e palavras-chave dos autores. Essa opção reduz o risco de omissão de estudos relevantes, especialmente em áreas nas quais a terminologia é heterogênea e os conceitos podem ser descritos de formas distintas, como ocorre na literatura sobre sequestro, emissão e avaliação de carbono. Além disso, optou-se por não incluir o termo “life cycle” na string de busca, uma vez que esse descritor está fortemente associado à Análise de Ciclo de Vida (LCA), direcionada a avaliações industriais e de produtos, o que geraria ruído metodológico e ampliaria o número de resultados irrelevantes para os objetivos desta pesquisa. Assim, a combinação entre o uso do campo Tópico e a exclusão de “life cycle” assegura maior precisão e pertinência na seleção dos estudos, alinhando a busca aos propósitos científicos da dissertação e fortalecendo a consistência metodológica exigida em revisões sistemáticas.

Na plataforma WOS foi possível criar mais de um campo de busca para a mesma pesquisa. Utilizaram-se as palavras-chave com os operadores Boleanos em três campos de busca diferentes, conforme (Quadro 1).

Quadro 1 - Campos de busca da mesma pesquisa com palavras chave e conectores booleanos utilizado no WOS

Conector Boleano	Tema da busca	Palavra chave	Conector Boleano	Palavra chave
-	Tópico	<i>Carbon sequestration</i>	<i>OR</i>	<i>Carbon emission</i>
<i>AND</i>	Tópico	<i>Assesment</i>	<i>OR</i>	<i>Evaluation</i>
<i>AND</i>	Tópico	<i>Méthods</i>	-	-
<i>NOT</i>	Tópico	<i>Life cycle</i>	-	-

1. No primeiro campo, selecionou-se como tema de busca “tópico” e utilizou-se no buscador a combinação das palavras-chave com o conector: “*carbon sequestration OR carbon emissions*”.
2. No segundo utilizou-se o conector *AND* e como tema “tópico” e a combinação: “*assessment OR evaluation*”.
3. No terceiro utilizou-se o conector *AND* como tema da busca “tópico” e como palavra de busca “*methods*”.

4. No último utilizou-se o conector NOT como tema de busca “Tópico e como palavra de busca “life Cycle”.

Na terceira etapa exportou-se um arquivo de metadados no formato RIS contendo os resultados da busca. Na quarta etapa carregou-se o arquivo RIS para o *software Rayyan* e no painel *screening* selecionaram-se aqueles artigos que seriam incluídos na pesquisa. Este *software* foi utilizado para fazer a seleção dos artigos que eram de interesse através das funções “incluir”, “excluir” ou “talvez”, realizando-se uma triagem inicial. Para aqueles artigos de interesse usou-se a opção incluir e os demais foram excluídos como pode ser visto no Fluxograma da (Figura 2).

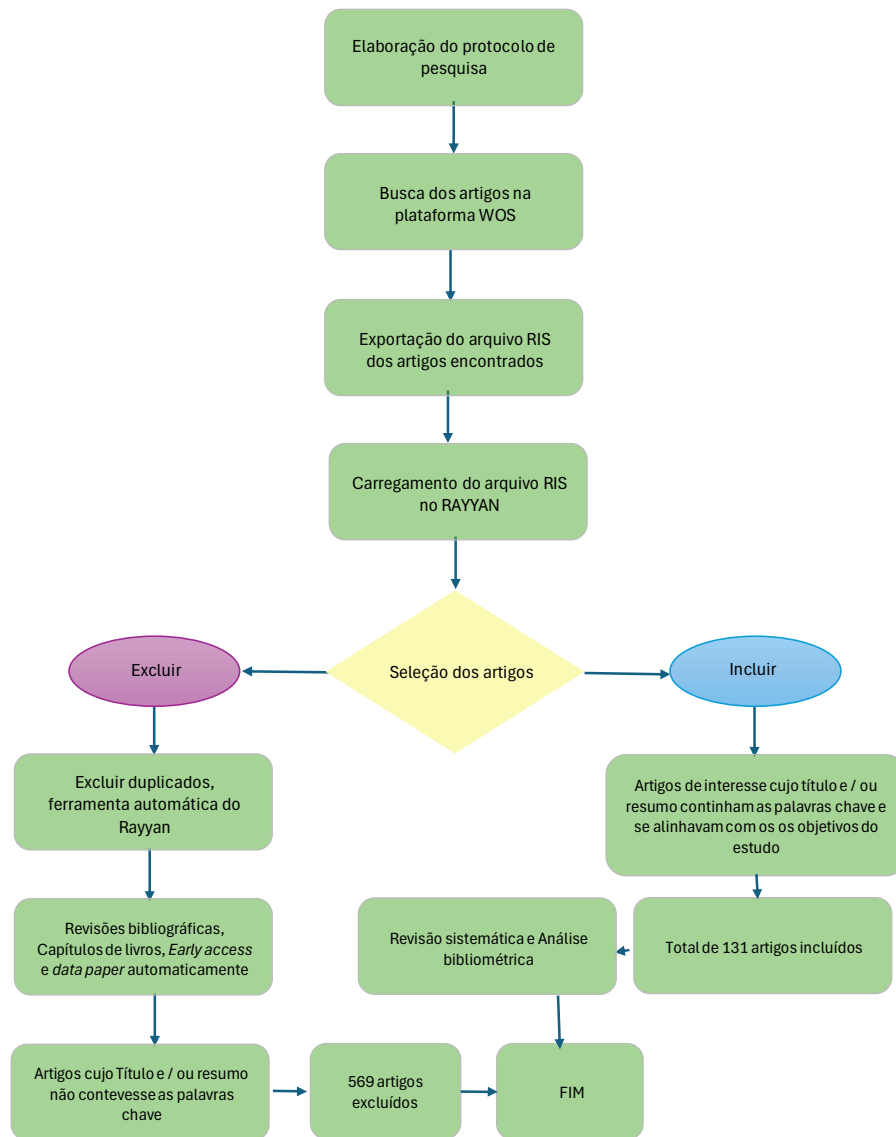


Figura 2 - Fluxograma detalhado de exclusões de artigos.

A busca no portal de periódicos *Web Of Science* (WOS) resultou em 700 artigos correspondentes aos termos pesquisados com operadores booleanos. O arquivo RIS foi gerado e carregado no *software Rayyan*, tendo numa primeira etapa identificado automaticamente 5 artigos repetidos que foram excluídos. Posteriormente e dentro da metodologia PRISMA excluíram-se mais 52 por se tratar de artigos de revisão bibliográfica, 2 capítulos de livros, 7 publicações antecipadas (*early access*), 1 artigo de dados (*data paper*) em um total de 67 exclusões.

Em uma segunda etapa foram lidos os títulos e os resumos dos 633 artigos restantes e foram excluídos mais 498 artigos. A exclusão destes se deve ao fato de seus títulos e / ou resumos não se alinharem com o objetivo deste trabalho. Como resultado da

revisão exaustiva obtém-se apenas os artigos de alta relevância que somaram uma quantidade de 135. Os artigos incluídos para a revisão foram lidos na íntegra e após esta etapa mais quatro foram excluídos, perfazendo um total de 131 artigos úteis.

2.3.1. Ecossistema Digital de Análise e Inteligência

A utilização de *softwares* e ferramentas digitais tornou-se um pilar fundamental e indispensável em revisões sistemáticas e análises bibliométricas. A crescente complexidade destes processos, devida principalmente à grande quantidade de publicações científicas, exige que os pesquisadores façam uso das tecnologias para otimizar o tempo e reduzir a carga de trabalho, sendo a principal vantagem a triagem inicial por títulos e resumos e a análise de interações entre autores, instituições e áreas científicas. Essas ferramentas permitem uma análise mais consistente com a realidade estudada, seja em abordagens quantitativas ou qualitativas (PEIXE & PINTO, 2022).

2.3.2. Plataforma Digital Web Of Science (WOS)

Com o advento da internet e a informatização das bases de dados, através de qualquer dispositivo informático, mesmo que portátil, conectado à internet de qualquer lugar é possível ascender produções acadêmicas nas plataformas digitais tais como *Web of Science* (WOS) (SOARES *et al.*, 2016). Além disso, *softwares* são eficientes na detecção e remoção de registros duplicados logo no início do processo, o que otimiza o fluxo de trabalho (REIS *et al.*, 2023). Aumentam a precisão, transparência e reprodutibilidade. *softwares* como o *Rayyan* e o *VOSviewer* contribuem para o melhoramento do processo de divulgação e transparência das informações, reduzindo o tempo de análise e controle de dados (PEIXE & PINTO, 2022).

WOS é uma plataforma online que possibilita a interação com uma base de dados de registros bibliográficos, onde rapidamente se localizam documentos como artigos, sobre determinado assunto que são fundamentais para embasar trabalhos acadêmicos. Digitando as palavras-chave no campo de busca é possível encontrar as referências teóricas e os locais onde acessar os textos completos. Permite também baixar arquivos de metadados em formatos “standardizados” como o formato RIS que podem ser utilizados em outros *softwares* para se fazer a triagem inicial e gerir uma grande quantidade de dados gerando elementos gráficos e visuais (SOARES *et al.*, 2016).

2.3.3. Software Rayyan

Rayyan é uma aplicação *web* e móvel gratuita, desenvolvida pelo *Qatar Computing Research Institute* (QCRI) que acelera a triagem inicial de resumos e títulos para a revisões sistemáticas. Esta ferramenta é responsiva e intuitiva, reduz a carga de trabalho da revisão. De forma mais automatizada este *software* permite selecionar e analisar os títulos e resumos mais rapidamente, através da rejeição ou seleção de artigos. Outra funcionalidade importante é a identificação de documentos duplicados, sendo possível eliminá-los já de início (OUZZANI *et al.*, 2016).

Permite também a importação de ficheiros de citação de diversas bases de dados, tais como *Web of Science*, em formatos padrão (*RefMan (RIS)* e *EndNote*). Após o carregamento, a aplicação extrai metadados como título, autores e palavras-chave e o idioma do artigo, que podem ser usados para explorar e filtrar os estudos. Oferece ainda uma interface intuitiva com opções "Incluir/Excluir/Talvez", listas de palavras-chave predefinidas e a capacidade de criar ou modificar razões de exclusão, facilitando o processo de decisão e o registo destas (REIS *et al.*, 2023).

2.3.4. Software VOSviewer

O *software* gratuito *VOSviewer* foi empregado, na revisão bibliométrica, devido à sua funcionalidade de transformar grandes volumes de dados científicos em representações visuais. Utiliza a tecnologia VOS (Visualização de Similaridades) que permite associar e organizar informações de trabalhos científicos e gerar produtos tais como gráficos de rede e mapas bibliométricos (KARIMI, SAYYADI, & SHAHABALDINI, 2021). Foi de fundamental importância para este estudo pois possibilitou a análise e interpretação de tendências, conexões e padrões.

2.3.5. Software Microsoft Power BI

O *Microsoft Power BI* é uma plataforma de análise de dados desenvolvida para transformar informações brutas em relatórios e *dashboards* interativos e visuais. Ele permite conectar-se a uma variedade de fontes de dados como bases SQL, planilhas Excel, serviços na nuvem e APIs e oferece ferramentas poderosas de modelação, limpeza e visualização (SANTOS, 2020). Neste trabalho foi empregada na geração de gráficos

como os gráficos globais, por exemplo, onde as informações constantes em uma planilha foram plotadas sobre o mapa global para fornecer a visualização de quantidade de locais de estudo e de publicações.

3. MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO: ESTADO DA ARTE (REVISÃO SISTEMÁTICA)

Os processos mais abordados pela literatura são: Fluxo de Carbono; Sequestro de Carbono e Estoque de Carbono. Buscou-se analisar as tecnologias para mensuração das trocas de carbono dos artigos e as principais foram: Covariância de *Eddy*; Método das Câmaras; Amostragem de solo; Detecção remota; Modelos de crescimento da vegetação; Inventário e Modelo dinâmico.

Foram encontrados artigos que exploram os processos individualmente e alguns que traçam um comparativo entre eles (Figura 3). Desta maneira observa-se que o maior número de artigos aborda o processo de Fluxo de Carbono para a Atmosfera (FC), ou seja, quando há liberação de carbono do meio para a atmosfera, ou emissões positivas, perfazendo um total de 71 artigos. Já o Sequestro de Carbono (SC) ou seja, quando há absorção de carbono da atmosfera, ou emissões negativas, perfazem um total de 24 artigos e o processo de Estoque (EC) totaliza 20 artigos das publicações. Observa-se também que alguns artigos abordaram mais de um processo simultaneamente desta forma (FC, SC) representam 8 enquanto (EC, SC e EC, FC, SC) representam 4 cada.

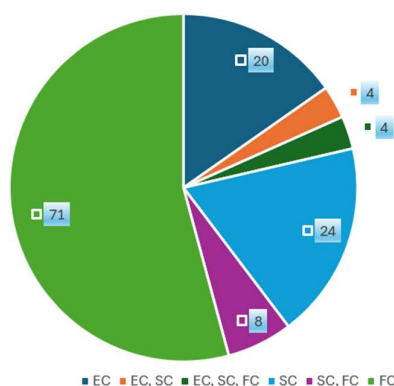


Figura 3 – Quantidade de artigos por processo, em que (EC) refere-se ao Estoque de Carbono, (SC) Sequestro de Carbono e (FC) Fluxo de Carbono.

Com relação aos métodos empregados para mensuração das trocas de carbono (Figura 4) em primeiro lugar com 33 artigos está o método da Câmara, em segundo lugar o método de Amostragem de solo com 32 artigos, em terceiro lugar com 30 artigos o método Detecção remota, em quarto lugar o método de Covariância de *Eddy* com 20

artigos, em quinto com 11 artigos os Modelos matemáticos e em sexto lugar o Inventário com 5 artigos.

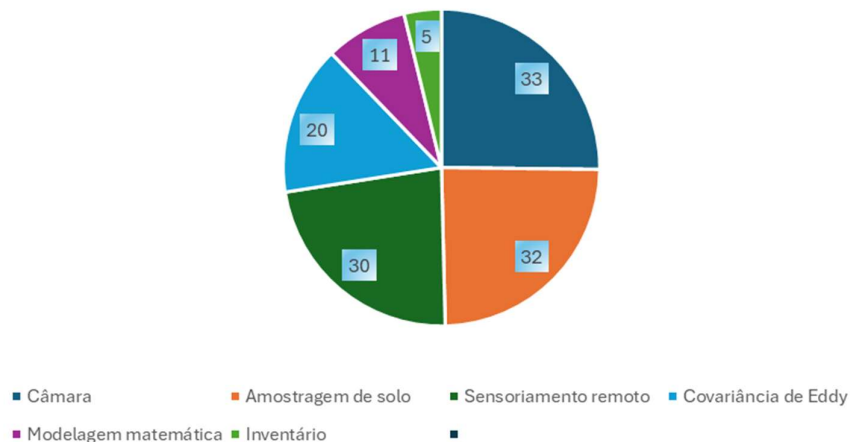


Figura 4 - Métodos empregados: Quantidade de artigos encontrados para cada método de mensuração de carbono.

As trocas de CO_2 podem ser mensuradas utilizando-se diversas tecnologias, métodos e equipamentos, dependendo do ambiente e da escala de interesse. As principais abordagens encontradas incluem medições em solo, ecossistemas terrestres e na atmosfera urbana. É importante notar que a escolha da tecnologia e do método depende dos objetivos da pesquisa, da escala de interesse e das condições ambientais. Cada método possui suas próprias fontes potenciais de erro e vieses que precisam ser cuidadosamente considerados e minimizados através de procedimentos apropriados de *design* e implantação.

3.1. Monitorização de Fluxos Gasosos (Interface Superfície/atmosfera)

3.1.1. Covariância de Vórtices (*Eddy Covariance*)

A técnica de covariância de vórtices (*Eddy Covariance EC*) é amplamente reconhecida como o método mais robusto para quantificar trocas gasosa entre ecossistemas e a atmosfera (YANG *et al.*, 2022). Sua principal vantagem reside na capacidade de realizar medições contínuas, de longo prazo e em rede, capturando todos os componentes turbulentos que contribuem para os fluxos de CO_2 e vapor d'água (PAN *et al.*, 2023). Essa característica torna a EC essencial para estudos em larga escala, incluindo redes globais como *AmeriFlux*, *ChinaFlux*, *AsiaFlux* e *FLUXNET*, que

dependem desses dados para monitorar o ciclo do carbono em diferentes biomas (GAO *et al.*, 2024).

Entretanto, a aplicação da EC é limitada por requisitos espaciais rigorosos. O método demanda áreas extensas, homogêneas e com condições aerodinâmicas estáveis, o que restringe sua utilização em experimentos de pequena escala ou em ambientes com forte heterogeneidade espacial (PAN *et al.*, 2023). Em ambientes aquáticos, por exemplo, sistemas podem ser instalados em plataformas elevadas, como torres posicionadas a 10 m de altura e a 1,5 km da margem, com área de amostragem de aproximadamente 1 km ao redor (LI *et al.*, 2023). Apesar disso, a técnica ainda enfrenta desafios quando aplicada a interfaces específicas, como a zona sedimento-água (SWI), onde limitações de sensores impedem medições diretas de fluxo de CO₂ (GAO *et al.*, 2024).

A EC permite estimar fluxos verticais de vapor d'água (FET) e CO₂ (Fc) a partir da covariância entre a velocidade vertical do vento e as concentrações de gases (LI *et al.*, 2023). Essa abordagem possibilita medições *in situ* sem perturbar o ambiente, garantindo elevada fidelidade às condições naturais. No entanto, a precisão das medições depende fortemente do desempenho dos sensores, especialmente dos analisadores de gás infravermelho (IRGA).

Nos sistemas de caminho aberto, a precisão pode ser comprometida por separação espacial entre sensores, assincronia temporal e efeitos de autoaquecimento, mesmo em configurações integradas como o IRGASON (YANG *et al.*, 2022). Já os sistemas de caminho fechado enfrentam perdas de sinal de alta frequência e atrasos entre a amostragem do gás e a detecção pelo anemômetro sônico. Em ambientes extremos, como o deserto de *Taklimakan*, poeira intensa pode comprometer o funcionamento de bombas de ar, resultando em fluxos anômalos, como valores fortemente negativos de CO₂ que superestimam o sequestro de carbono (YANG *et al.*, 2022).

Além disso, comparações com métodos alternativos como câmaras flutuantes e técnicas de camada limite fina revelam que a EC pode apresentar desvios significativos na estimativa de fluxos difusivos ar-água (BERNARDO *et al.*, 2017). Em ecossistemas urbanos, a técnica também não permite particionar adequadamente as fontes e sumidouros de CO₂, dificultando a interpretação de emissões (YIN *et al.*, 2014). Aspectos fisiológicos, como a inibição aparente da respiração diurna, podem ainda introduzir vieses nas estimativas de GPP (Produtividade Primária Bruta) e respiração, exigindo cautela na interpretação dos dados (KEENAN *et al.*, 2019).

A implementação de sistemas de covariância de vórtices envolve custos elevados, tanto na aquisição de equipamentos quanto na manutenção e calibração contínua. O conjunto típico inclui anemômetro ultrassônico tridimensional, IRGA de caminho aberto ou fechado, sensores ambientais e infraestrutura de suporte (LI *et al.*, 2023). Esses requisitos tornam a técnica economicamente inviável para monitoramento generalizado, especialmente em regiões remotas ou em experimentos de pequena escala (PAN *et al.*, 2023).

Além do investimento inicial, a operação em ambientes adversos pode demandar substituição frequente de componentes, aumentando ainda mais os custos. Em desertos, por exemplo, a degradação acelerada de bombas de ar e sensores ópticos compromete a durabilidade dos sistemas (YANG *et al.*, 2022). Assim, embora a EC seja altamente precisa e abrangente, seu custo limita a adoção em larga escala, incentivando o desenvolvimento de métodos complementares de menor custo, como a incubadora virtual para estimativas indiretas de fluxos em ambientes aquáticos (GAO *et al.*, 2024).

A EC é amplamente utilizada em ecossistemas terrestres e aquáticos, permitindo quantificar trocas gasosas sem interferência direta no ambiente (YANG *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2023). Em ambientes lênticos e lóticos, a técnica fornece informações valiosas sobre evapotranspiração e fluxos de CO₂, embora adaptações metodológicas sejam necessárias para lidar com limitações de sensores e variabilidade hidrodinâmica (GAO *et al.*, 2024). Por exemplo, a combinação EC + incubadora virtual pode melhorar estimativas em ambientes lóticos, enquanto em reservatórios estratificados no inverno pode ocorrer subestimação do quociente respiratório (RQ).

Apesar das limitações, a EC permanece fundamental para pesquisas sobre o ciclo global do carbono, fornecendo dados essenciais para compreender a dinâmica de fluxos entre vegetação, água e atmosfera (GAO *et al.*, 2024). A técnica continua sendo a única capaz de medir diretamente a troca de CO₂ entre comunidades biológicas e a atmosfera, reforçando sua relevância para estudos ecológicos e climáticos em múltiplos ecossistemas.

3.1.2. Método da Câmaras ou Método da Caixa

A utilização de câmaras para medir fluxos de CO₂ constitui um método amplamente difundido em estudos de pequena escala, sobretudo em solos e superfícies com baixa heterogeneidade estrutural. As câmaras estáticas e dinâmicas permitem

quantificar fluxos em áreas reduzidas, oferecendo elevada resolução espacial, embora dependam de um número adequado de réplicas para representar a variabilidade local. DAVIDSON *et al.*, (2002). Demonstraram que, em florestas tropicais e pastagens, cerca de oito medições aleatórias com câmaras de 300 cm² foram suficientes para obter valores dentro de 25% da média populacional em 98% dos casos, evidenciando a necessidade de amostragem intensiva para capturar a heterogeneidade espacial.

Em contraste, a técnica de covariância de vórtices (*Eddy covariance*) opera em escalas ecossistêmicas, medindo trocas líquidas de carbono entre a superfície e a atmosfera em intervalos sub-horários (KEENAN *et al.*, 2019). Essa abordagem permite integrar fluxos sobre áreas extensas, sendo particularmente útil para estudos de longo prazo e para a compreensão de padrões sazonais e interanuais. No entanto, a sua aplicação em ambientes aquáticos enfrenta limitações, especialmente em sistemas lênticos estratificados, onde a estratificação térmica regula fortemente os fluxos na interface sedimento-água (GÃO *et al.*, 2024). Assim, a combinação entre covariância de vórtices aquática e métodos complementares, como a incubadora virtual, tem sido recomendada para ambientes lóticos.

A precisão das medições por câmaras depende fortemente do tipo de sistema e do instrumento de detecção utilizado. Os analisadores de gás por infravermelho (IRGA) quantificam CO₂ com base na absorção de radiação infravermelha, permitindo medições contínuas e sensíveis (PASTORE; TOBIN & NIEUWENHUIS, 2019). Sistemas de câmara dinâmica, operando em fluxo contínuo, reduzem a acumulação de gases e mantêm condições próximas do estado estacionário, aumentando a precisão das estimativas (PAN *et al.*, 2023). Alternativamente, analisadores fotoacústicos (PAS) e cromatografia gasosa (GC) oferecem medições discretas, adequadas para protocolos de amostragem temporalmente definidos (WANG *et al.*, 2023).

Apesar da robustez dos métodos, desafios persistem. Diferenças de pressão entre a câmara e o ambiente podem introduzir artefactos, exigindo calibração e verificação prévias (DAVIDSON *et al.*, 2002). Além disso, discrepâncias entre estimativas obtidas por câmaras e por torres de covariância de vórtices nem sempre são explicadas por erros conhecidos, sugerindo limitações inerentes a cada abordagem.

No caso da covariância de vórtices, avanços recentes revelaram a ocorrência de inibição aparente da respiração diurna, um fenómeno biológico que afeta diretamente a precisão dos métodos de particionamento de fluxos. Demonstrou-se que essa inibição

pode representar entre 3.5% e 30% da respiração diurna, variando entre ecossistemas, e que métodos tradicionais que ignoram esse efeito tendem a superestimar a respiração e subestimar a fotossíntese anual (KEENAN *et al.*, 2019).

Os sistemas de câmaras apresentam custos relativamente acessíveis quando comparados a torres de covariância de vórtices, especialmente quando operados manualmente. A simplicidade estrutural das câmaras estáticas e a possibilidade de utilizar analisadores portáteis tornam o método economicamente viável para estudos de pequena escala. Contudo, sistemas automatizados com múltiplas câmaras, utilizados para medições contínuas da respiração do solo, podem elevar significativamente os custos operacionais (LUGATO *et al.*, 2010).

Por outro lado, a técnica de covariância de vórtices requer infraestrutura complexa, sensores de alta frequência e manutenção contínua, resultando em custos substancialmente superiores. Em ambientes aquáticos, a necessidade de integrar sensores adicionais, como eco-sondagem para estimar estoques de carbono em sedimentos, aumenta ainda mais o investimento necessário. Embora a eco-sondagem ofereça elevada precisão, a previsão de fatores de correção em modelos de regressão ainda apresenta incertezas (WANG *et al.*, 2023), o que pode demandar calibrações adicionais e, consequentemente, custos mais elevados.

A escolha do método de medição de fluxos de CO₂ depende fortemente das características do ecossistema estudado. Em ecossistemas terrestres, câmaras estáticas e dinâmicas são amplamente utilizadas para quantificar a respiração do solo, sendo consideradas métodos fiáveis quando bem instaladas e calibradas (DAVIDSON *et al.*, 2002). Em sistemas agrícolas, câmaras de fluxo contínuo têm sido aplicadas com sucesso para estimar o *Net Ecosystem Carbon Exchange* (NEE), como demonstrado em estudos com milho utilizando absorção por solução alcalina (PAN *et al.*, 2023).

Em ecossistemas aquáticos, a medição direta do fluxo na interface sedimento-água é limitada pela capacidade dos sensores, exigindo abordagens indiretas, como a combinação entre incubadoras virtuais e covariância de vórtices aquática (GÃO *et al.*, 2024). A estratificação térmica em reservatórios pode levar à subestimação do quociente respiratório (RQ), reforçando a necessidade de métodos adaptados às condições hidrodinâmicas.

No âmbito global, a covariância de vórtices permanece essencial para compreender trocas de carbono em larga escala, permitindo identificar padrões

fisiológicos, como a inibição da respiração diurna, que afetam diretamente as estimativas de GPP e respiração do ecossistema (KEENAN *et al.*, 2019). Esses resultados evidenciam que modelos globais baseados em pressupostos simplificados podem apresentar vieses significativos, reforçando a importância de incorporar mecanismos fisiológicos realistas nas avaliações do ciclo do carbono.

3.2. Avaliação de Estoques de Carbono no Solo (COS)

3.2.1. Métodos de Amostragem: Perfil de Solo Inteiro (ESP) vs. Seções de Controle (SCS)

O solo constitui o maior reservatório terrestre de carbono, armazenando carbono orgânico global e retendo-o por milhares de anos sob condições adequadas (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015). Pequenas alterações nos Estoques de Carbono Orgânico do Solo (ECOS) podem influenciar significativamente as concentrações atmosféricas de CO₂ e, conseqüentemente, a dinâmica dos gases de efeito estufa.

A variabilidade dos ECOS está fortemente associada ao fator escala, com estudos que variam desde parcelas experimentais até avaliações regionais, nacionais e globais. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de protocolos padronizados de amostragem, uma vez que diferentes abordagens como amostragem por incrementos de profundidade (SCS) ou por horizontes genéticos (PCS) podem gerar estimativas divergentes (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015).

A quantificação do Carbono Orgânico do Solo (COS) pode ser realizada por meio de amostragem do perfil completo (*Entire Soil Profile* ESP), por horizontes pedogenéticos ou por seções de controle do solo (*Soil Control Sections* SCS), utilizando incrementos de profundidade específicos, como 0 a 25 cm e 25 a 50 cm. O método de *Walkley e Black* é amplamente empregado para determinar o teor de carbono orgânico, enquanto a densidade aparente (*Bulk density* BD) é utilizada para calcular os estoques (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015).

A escolha da metodologia de amostragem exerce influência direta sobre a precisão das estimativas, sendo o ESP considerado mais robusto por refletir as propriedades naturais do solo, ao passo que o SCS pode misturar horizontes pedogenéticos e superestimar os valores de COS (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015). Em estudo conduzido no Parque Natural *Despeñaperros*, verificou-se que o método SCS

superestimou o estoque total de COS em 28,2% em relação ao ESP, chegando a quase 60% na camada superficial, evidenciando a sensibilidade das estimativas à técnica utilizada (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015).

A determinação dos ECOS envolve custos associados à coleta, processamento e análise laboratorial das amostras, bem como à necessidade de mão de obra especializada para descrição de perfis e identificação de horizontes pedogenéticos. Métodos mais detalhados, como o ESP, demandam maior esforço de campo e laboratório, tornando-se mais dispendiosos quando comparados a abordagens simplificadas como o SCS. Apesar disso, o investimento em metodologias mais precisas é fundamental para evitar erros sistemáticos que podem comprometer avaliações de longo prazo sobre o papel do solo no ciclo global do carbono (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015). Assim, o custo operacional deve ser ponderado em relação à necessidade de precisão, especialmente em estudos destinados a subsidiar políticas de mitigação climática.

A avaliação dos ECOS é particularmente relevante em ecossistemas naturais, onde fatores como clima, topografia, material de origem e cobertura vegetal influenciam diretamente a formação e a estabilidade da MOS. No Parque Natural *Despeñaperros*, caracterizado por clima semiárido temperado, relevo montanhoso e solos predominantemente *Phaeozems*, *Cambisols*, *Regosols* e *Leptosols*, a comparação entre métodos de amostragem evidenciou como características ambientais e pedológicas condicionam a distribuição vertical do carbono (PARRAS-ALCÁNTARA *et al.*, 2015).

A presença de florestas mediterrâneas bem preservadas e matagal contribui para a manutenção de elevados estoques superficiais de MOS, reforçando a importância de metodologias adequadas para captar a variabilidade natural desses ecossistemas. A padronização de técnicas de amostragem é, portanto, essencial para compreender com maior precisão o papel do solo como componente crítico do ciclo biogeoquímico do carbono.

3.2.2. Tecnologias Analíticas: Espectroscopia (MIRS e LIBS) e Isótopos Estáveis

A avaliação dos estoques de carbono orgânico do solo (SOC) em diferentes escalas espaciais exige métodos capazes de capturar variações decorrentes de mudanças no uso da terra, práticas de manejo e processos pedogenéticos. O método da Massa de Solo Equivalente (*Equivalent Soil Mass* ESM) destaca-se nesse contexto por quantificar o

carbono com base em coordenadas de massa acumulada, em vez de profundidades fixas, ajustando diferenças na densidade do solo e permitindo comparações mais consistentes entre áreas e ao longo do tempo (CROW *et al.*, 2016). Em escalas maiores, técnicas de detecção remota têm sido amplamente utilizadas para mapear a distribuição espacial do SOC, especialmente por meio de imagens Sentinel-1A/2A/3A combinadas com algoritmos de aprendizado de máquina, como *Random Forest*, possibilitando estimativas em múltiplas resoluções espaciais (FONSECA & FRANCIS, 2024).

A precisão das estimativas de SOC depende diretamente da metodologia analítica empregada. A espectroscopia de infravermelho médio (MIRS) constitui uma técnica promissora, baseada na análise do espectro refletido por amostras finamente moídas, cujos dados espectrais são correlacionados com valores laboratoriais obtidos por combustão a seco, utilizando modelos de regressão como PLSR (TAKOUTSING & MARTIN, 2025). A análise isotópica estável do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) também contribui para maior precisão ao rastrear a origem e a dinâmica do carbono no solo, especialmente em transições entre vegetação C_4 e C_3 , permitindo identificar a renovação do carbono orgânico e inorgânico (JI *et al.*, 2025). Em contrapartida, o método tradicional da densidade aparente, embora amplamente utilizado, apresenta limitações quando há variações significativas na compactação ou estrutura do solo, podendo introduzir vieses nas estimativas de estoque (SONG *et al.*, 2024).

Os custos associados à quantificação do SOC variam substancialmente entre métodos. Técnicas laboratoriais convencionais, como combustão a seco e determinação da densidade aparente, apresentam custos relativamente baixos, mas demandam tempo e mão de obra especializada. Métodos avançados, como MIRS e LIBS, embora mais rápidos e capazes de gerar grandes volumes de dados, exigem equipamentos de maior custo e calibração rigorosa. A espectroscopia de ruptura induzida por laser (LIBS), por exemplo, utiliza pulsos de alta energia para gerar plasma e medir emissões espectrais específicas, permitindo análises rápidas e portáteis, porém com investimento inicial elevado (DWIVEDI *et al.*, 2023). Assim, a escolha metodológica deve equilibrar custo, precisão e aplicabilidade ao objetivo do estudo.

A dinâmica do carbono no solo é fortemente influenciada pelas características ecológicas e pedológicas de cada ambiente, o que demanda métodos capazes de captar essa variabilidade. A análise isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) é particularmente útil em ecossistemas agrícolas ou em áreas em transição de uso, permitindo rastrear a contribuição de resíduos

culturais e da vegetação original para o SOC (JI *et al.*, 2025). Em ecossistemas naturais ou heterogêneos, técnicas como MIRS e LIBS possibilitam avaliar rapidamente a distribuição espacial do carbono, enquanto o ESM corrige diferenças estruturais entre solos, garantindo comparabilidade entre áreas com diferentes históricos de manejo (CROW *et al.*, 2016). Em escalas regionais, a detecção remota complementa essas abordagens ao fornecer uma visão integrada da distribuição do SOC, contribuindo para o monitoramento de ecossistemas e para políticas de mitigação climática (FONSECA & FRANCIS, 2024).

3.3. Quantificação de Biomassa e Carbono Florestal

3.3.1. Inventários de Campo e Equações Alométricas

As equações alométricas constituem ferramentas fundamentais para estimar o estoque de carbono biológico em diferentes escalas espaciais, permitindo quantificar tanto a biomassa acima do solo (AGC) quanto a biomassa de raízes abaixo do solo (BRC). Essas equações utilizam variáveis mensuráveis em campo, como o diâmetro à altura do peito (DAP/DBH) e a altura das árvores, aplicando modelos de regressão previamente calibrados para estimar a biomassa total, posteriormente convertida em carbono por meio de fatores fixos (SONG *et al.*, 2024). Em escalas temporais amplas, modelos matemáticos de crescimento florestal como *Gompertz*, *Logistic*, *Richards*, *Korf* e *Mitscherlich* permitem projetar o acúmulo de biomassa e carbono ao longo de décadas, sendo capazes de simular o estoque por unidade de área em períodos superiores a 100 anos (ZHAO; HU & WANG, 2022). Dessa forma, equações alométricas e modelos de crescimento complementam-se ao fornecer estimativas robustas em múltiplas escalas espaciais e temporais.

A precisão das estimativas de carbono depende diretamente da adequação das equações alométricas ao tipo de vegetação analisada. Equações específicas por espécie tendem a apresentar maior rigor, uma vez que incorporam diferenças na arquitetura das árvores e na densidade da madeira (MA *et al.*, 2023). A inclusão de variáveis como altura total e densidade da madeira aumenta significativamente o desempenho preditivo dos modelos. Para a biomassa subterrânea, recomenda-se a medição direta do peso seco das raízes (ODW root), multiplicado por fatores de conversão específicos, a fim de reduzir incertezas associadas à estimativa indireta (SONG *et al.*, 2024). Assim, embora as

equações alométricas sejam amplamente utilizadas, sua precisão depende da calibração adequada, da representatividade das espécies e da qualidade das medições de campo.

As equações alométricas apresentam a vantagem de serem métodos predominantemente não destrutivos e de baixo custo operacional, uma vez que dependem de medições simples em campo, como DAP e altura. Em comparação com métodos destrutivos de colheita total, que demandam grande esforço logístico e financeiro, as equações alométricas reduzem significativamente os custos de inventário florestal (SONG *et al.*, 2024). Modelos de crescimento florestal também apresentam boa relação custo-benefício, pois utilizam dados já disponíveis em inventários periódicos. No entanto, o desenvolvimento de equações específicas por espécie ou região pode exigir campanhas de campo extensas e destrutivas para calibração, elevando temporariamente os custos de implementação. Ainda assim, uma vez calibradas, essas equações tornam-se ferramentas econômicas e eficientes para monitoramento contínuo do carbono florestal.

A aplicação de equações alométricas e modelos de crescimento deve considerar as particularidades ecológicas de cada ambiente, incluindo estrutura da vegetação, densidade da madeira, regime de distúrbios e condições edafoclimáticas. Em florestas tropicais, por exemplo, a elevada diversidade de espécies exige equações específicas para garantir estimativas confiáveis, enquanto em florestas temperadas modelos generalistas podem ser suficientes (MA *et al.*, 2023). O uso do fator de expansão da biomassa (BEF) é um fator de conversão que permite estimar componentes adicionais incorporados ao solo tais como matéria morta e produtos florestais, ampliando a compreensão do ciclo de carbono em ecossistemas florestais manejados (ZHAO; HU & WANG, 2022). Assim, a escolha do modelo deve refletir as características ecológicas do sistema, garantindo que as estimativas de carbono representem adequadamente a dinâmica biológica e estrutural da vegetação.

3.3.2. Tecnologias de Detecção Remota: Satélites e UAV-SFM)

O monitoramento do ciclo do carbono em escalas regionais e globais tem sido amplamente impulsionado pelo uso de satélites capazes de estimar concentrações atmosféricas de CO₂ e mapear a dinâmica da biomassa e da produtividade dos ecossistemas. Satélites como OCO-2, OCO-3 e GOSAT inferem a fração molar de CO₂ na coluna atmosférica (XCO₂) a partir da luz solar refletida no infravermelho de ondas curtas, permitindo análises em larga escala, inclusive em regiões com escassez de

medições *in situ*, como partes da África e do Oriente Médio (LI *et al.*, 2021; JIANG *et al.*, 2022).

Em paralelo, séries temporais de média resolução, como Landsat, SPOT e IRS LISS, possibilitam reconstruir trajetórias históricas de biomassa acima do solo (AGB), como demonstrado no declínio de 15% da biomassa de coníferas nos Cárpatos Ocidentais entre 1985 e 2010 (MESSINGER; ASNER & SILMAN, 2016). Em escalas intermediárias, tecnologias como UAV-SFM ampliam a capacidade de monitoramento em áreas de 100 a 100.000 ha, oferecendo resolução espacial fina para avaliar degradação, distúrbios e mudanças no uso da terra. Assim, a combinação de plataformas orbitais e aéreas permite integrar múltiplas escalas espaciais e temporais, fortalecendo a compreensão global do ciclo do carbono.

A precisão das estimativas de carbono derivadas de detecção remota depende da qualidade das observações atmosféricas, da modelação do transporte e da disponibilidade de dados de validação. Nos trópicos, fatores como cobertura de nuvens, aerossóis e limitações nos modelos de transporte contribuem para discrepâncias significativas entre satélites e medições *in situ* (CROWELL *et al.*, 2019). A integração de dados VIIRS com GEDI-LiDAR melhora a acurácia na estimativa da estrutura florestal e das emissões associadas (RISHMAWI *et al.*, 2022).

No monitoramento de queimadas, produtos como Fire_cci e GFED4 apresentam diferenças regionais expressivas, com tendência de subestimação média de 35% e discrepâncias maiores em regiões dominadas por incêndios agrícolas (CHUVIECO *et al.*, 2016). Além disso, a precisão do XCO₂ derivado de satélite é inferior à de medições *in situ*, com erros típicos de aproximadamente 1 ppm, reforçando a necessidade de validação terrestre contínua (JIANG *et al.*, 2022).

A detecção remota apresenta vantagens econômicas ao permitir cobertura global contínua sem a necessidade de redes densas de estações terrestres. Satélites como *Landsat* e *Sentinel* disponibilizam dados gratuitos e de longo histórico, reduzindo custos de monitoramento em larga escala. Tecnologias emergentes, como UAV-SFM, constituem alternativas de menor custo ao LiDAR aerotransportado, possibilitando a geração de modelos tridimensionais de alta resolução com equipamentos acessíveis (MESSINGER; ASNER; SILMAN, 2016).

A implementação de modelos de inversão atmosférica e a integração de múltiplas fontes de dados exigem infraestrutura computacional robusta e mão de obra especializada,

elevando os custos operacionais. Produtos de queimadas, como Fire_cci, também demandam processamento complexo, incluindo normalização radiométrica, modelação espectral e validação multitemporal (CHUVIECO *et al.*, 2016). Assim, embora a detecção remota reduza custos de coleta em campo, sua aplicação plena requer investimentos tecnológicos e analíticos significativos.

A aplicação de detecção remota ao estudo do ciclo do carbono varia conforme o tipo de ecossistema e suas dinâmicas específicas. Em florestas tropicais e temperadas, dados de satélite permitem estimar a biomassa acima do solo (AGB), índice de área foliar (LAI) e mudanças estruturais associadas a distúrbios, desmatamento e degradação, sendo fundamentais para contabilizar emissões e perdas de sequestro (MAIN-KNORN *et al.*, 2013; RAHAMAN *et al.*, 2022). Em regiões áridas e semiáridas, sensores como Sentinel-1/2/3 têm sido utilizados para mapear carbono orgânico do solo (SOC) em bacias hidrográficas (FONSECA; FRANCIS, 2024).

Já em áreas mineradas, reduções na Produtividade Primária Líquida (NPP) podem ser quantificadas, revelando perdas líquidas de carbono, como a liberação de 3,34 gG de carbono em oito anos associada a uma queda de 1,43 gC/m²/dia (SHOME *et al.*, 2024). No contexto de queimadas, produtos Fire_cci e GFED4 permitem caracterizar padrões de área queimada, emissões de carbono e métricas de forma e tamanho de manchas, essenciais para modelação climática (CHUVIECO *et al.*, 2016). Dessa forma, a detecção remota adapta-se às particularidades de cada ecossistema, oferecendo ferramentas robustas para compreender fluxos, emissões e estoques de carbono.

3.4. Modelação e Abordagens Integradas: Modelos Biogeoquímicos e Dinâmicos (DNDC, SWAT, Biome-BGC)

Os modelos biogeoquímicos e dinâmicos constituem ferramentas essenciais para simular processos ambientais em múltiplas escalas espaciais e temporais. Modelos como o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) operam de forma contínua e semidistribuída, permitindo avaliar impactos hidrológicos e de qualidade da água em bacias hidrográficas sob diferentes condições climáticas e concentrações atmosféricas de CO₂ (JUNG; KIM, 2018).

Em escalas regionais e globais, modelos de vegetação dinâmica (DGVM) e modelos da biosfera terrestre (TBM) simulam trocas de carbono entre a superfície e a atmosfera, utilizando variáveis como a Produção Primária Bruta (GPP), Respiração do

Ecossistema (Re) e Produção Líquida da Biome (NBP) (KING *et al.*, 2015). Em escalas urbanas, modelos como o *Patch-Generating Land Use Simulation* permitem projetar mudanças no uso da terra e suas implicações nas emissões de carbono, integrando fatores socioeconômicos, topográficos e climáticos (LI *et al.*, 2024). Assim, a modelação dinâmica abrange desde parcelas agrícolas até sistemas urbanos e globais, oferecendo suporte para análises multiescalares do ciclo do carbono.

A precisão dos modelos depende da qualidade dos dados de entrada, da representação dos processos ecológicos e da capacidade de integrar múltiplas fontes de informação. O SWAT, por exemplo, foi modificado para representar respostas fisiológicas da vegetação a elevadas concentrações de CO₂, como redução da condutância estomática e aumento da área foliar, aprimorando a representação dos fluxos hidrológicos (JUNG; KIM, 2018).

Modelos de aprendizado de máquina, como *Random Forest*, GLM, *Krigagem Ordinária* e BRT, aumentam a acurácia na estimativa do carbono orgânico do solo ao integrar variáveis ambientais e dados de detecção remota (DENG *et al.*, 2018). Modelos DNDC simulam emissões de gases de efeito estufa em alta resolução espacial, considerando clima, solo, vegetação e manejo agrícola (LUGATO *et al.*, 2010). Entretanto, limitações persistem: incertezas nos parâmetros, escassez de dados de CO₂ em algumas regiões e ausência de representação de certos ecossistemas podem comprometer a precisão das simulações (XU *et al.*, 2019; JIANG *et al.*, 2022).

Os modelos dinâmicos apresentam custos variáveis conforme sua complexidade e demanda de dados. Modelos baseados em detecção remota, como PROSAIL, exigem imagens multiespectrais e parâmetros biofísicos detalhados, mas reduzem custos de campo ao permitir estimativas indiretas de LAI e estrutura do dossel (LI *et al.*, 2017).

Modelos de crescimento florestal e equações alométricas, embora dependam de medições de campo como diâmetro e altura, são relativamente econômicos e amplamente utilizados para estimar biomassa e carbono (SONG *et al.*, 2024; ZHAO; HU; WANG, 2022). Em contrapartida, modelos urbanos de uso da terra e modelos atmosféricos de inversão exigem infraestrutura computacional robusta e grandes volumes de dados, elevando os custos operacionais (LI *et al.*, 2024; JIANG *et al.*, 2022). Assim, o custo de aplicação varia conforme a escala, a resolução desejada e a disponibilidade de dados.

A modelação dinâmica do carbono deve considerar as especificidades de cada ecossistema. Em florestas, modelos como Biome-BGC simulam processos de ciclagem

de carbono, nitrogênio e água, fornecendo estimativas de GPP, NPP e NEP, cuja precisão varia conforme as características regionais por exemplo, maior acurácia em florestas do norte da China (FANG *et al.*, 2024).

Em ecossistemas agrícolas, modelos DNDC estimam emissões de CO₂ sob diferentes práticas de manejo, permitindo avaliar cenários de cultivo convencional e reduzido (LUGATO *et al.*, 2010). Em ambientes urbanos, análises integradas de LULC, NDVI, LST e UHI demonstram como a urbanização intensifica emissões de carbono e aumenta a temperatura da superfície, como observado em *Penang City* entre 1996 e 2021 (RAHAMAN *et al.*, 2022). Em ecossistemas geológicos, modelos de fluxo em nível de poro, como DNS e *Pore-Network*, simulam o comportamento do CO₂ em rochas para avaliar o sequestro geológico (KOHANPUR; CHEN; VALOCCHI, 2022). Dessa forma, a modelação dinâmica deve ser adaptada às características ecológicas e físicas de cada ambiente, para permitir compreender fluxos, emissões e estoques de carbono de maneira integrada.

3.5. Sinergia Metodológica: Correlação *Bottom-Up* e *Top-down*

A quantificação rigorosa das emissões urbanas de dióxido de carbono de origem fóssil (CO₂) depende de duas abordagens metodológicas amplamente consolidadas na literatura: os métodos bottom-up, baseados na contabilização detalhada das atividades emissoras, e os métodos top-down, fundamentados em observações atmosféricas independentes. A integração entre essas abordagens é considerada essencial para reduzir incertezas, avaliar o desempenho relativo dos métodos e produzir estimativas rastreáveis e consistentes para subsidiar políticas de mitigação (VERHULST *et al.*, 2017).

3.5.1. Abordagens *Bottom - up*

Nos inventários de emissões os métodos *bottom-up* partem da quantificação direta das atividades antrópicas que geram emissões, utilizando dados como consumo de combustíveis, estatísticas de tráfego, relatórios industriais e informações sociodemográficas. Um exemplo emblemático é o inventário Hestia, que integra múltiplas fontes de dados para estimar emissões urbanas de CO₂ com elevada resolução espacial e temporal. Essa abordagem permite desagregar emissões por setores transporte,

indústria, utilidades e residencial oferecendo um panorama detalhado da distribuição das fontes emissoras. Apesar da precisão espacial, tais inventários ainda apresentam incertezas difíceis de quantificar, especialmente devido à heterogeneidade das fontes de dados e à variabilidade dos fatores de emissão (TURNBULL *et al.*, 2018).

Os métodos de medição direta em pequena escala em ecossistemas naturais nas abordagens, por sua vez, incluem métodos de câmara que quantificam fluxos de CO₂ em pequena escala. Embora úteis para estudos localizados, esses métodos apresentam limitações relacionadas à representatividade espacial e à necessidade de múltiplas medições para capturar a variabilidade do ecossistema.

3.5.2. Abordagens Top down

No contexto das medições atmosféricas, destaca-se o método da torre baseado na técnica de covariância de vórtices, que estima o fluxo total de carbono de um ecossistema. Essa técnica calcula a covariância entre a velocidade vertical do vento e a concentração de CO₂ e vapor d'água em alta frequência (10 Hz), abrangendo toda a área de influência da torre, denominada footprint. Diferentemente dos métodos de câmara, a abordagem da torre é considerada uma das mais robustas para compreender as trocas de matéria e energia entre vegetação, solo e atmosfera, embora exija terreno uniforme e apresente custos operacionais elevados (DAVIDSON *et al.*, 2002).

A técnica de inversão atmosférica utiliza medições de CO₂ provenientes de torres combinadas a modelos de transporte atmosférico para ajustar inventários *bottom-up*. Essa abordagem permite gerar mapas de fluxo posteriores, oferecendo uma estimativa integrada dos fluxos urbanos de carbono.

O método de balanço de massa aéreo estima emissões urbanas a partir de aeronaves que medem frações molares de CO₂ e CO a favor do vento, utilizando a velocidade do vento e um valor de fundo atmosférico. Para isolar o CO₂ de origem fóssil, emprega-se a análise de radiocarbono (¹⁴C), que permite derivar relações empíricas entre o excesso de CO₂ e sua origem (TURNBULL *et al.*, 2018).

Sistemas como UAV-SFM constituem uma alternativa top-down emergente, produzindo modelos tridimensionais de alta resolução para estimar a densidade de carbono acima do solo (ACD) em florestas tropicais, com desempenho comparável ao LiDAR (MESSINGER; ASNER; SILMAN, 2016).

3.5.3. Comparação entre os métodos

A harmonização entre métodos bottom-up e *top-down* tem demonstrado elevada consistência. Ajustes relacionados à consideração de fluxos biogênicos e à definição do fundo atmosférico resultaram em concordância notável entre quatro estimativas independentes de CO₂, com desvio-padrão de apenas 7%. Essa incerteza inferior a 10% é particularmente relevante para avaliar políticas de mitigação que visam reduções anuais da ordem de 2% (TURNBULL et al., 2018).

Enquanto os métodos bottom-up oferecem alta resolução espacial e detalhamento das fontes emissoras, os métodos *top-down* fornecem verificação independente baseada em medições atmosféricas, capturando fluxos integrados que incluem componentes antrópicos e biogênicos. Assim, as forças de uma abordagem compensam as limitações da outra, tornando a integração metodológica a estratégia mais robusta para quantificar fluxos urbanos de carbono.

4. MAPEAMENTO DA CIÊNCIA GLOBAL: ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

4.1. Evolução Temporal e Domínios Científicos Dominantes

A análise bibliométrica permitiu contabilizar a quantidade de publicações ao longo do tempo. Através da análise da Figura 5 é possível observar que em geral se verificou um aumento das publicações ao longo do tempo, sobretudo a partir de 2013. O ano em que ocorreram mais publicações neste assunto foi 2024 com 26 publicações e entre 1995 e 2012 registou-se uma variação entre 1 a 2 publicações por ano. A partir de 2015 houve um aumento de publicações referentes aos Métodos de Avaliação do Sequestro e Emissões de Carbono.

As áreas do conhecimento que mais publicaram foram: *Ecology e Environmental Sciences* são as áreas mais frequentes (73 artigos) seguidas de *Geology e Agriculture* (21 artigos) e *Atmospheric Sciences e Meteorology* (19 artigos cada). O aumento de publicações a partir de 2013, com pico em 2024, reflete o amadurecimento e a diversificação dos métodos descritos neste trabalho, com ênfase na Covariância de Vórtices e a Detecção remota.

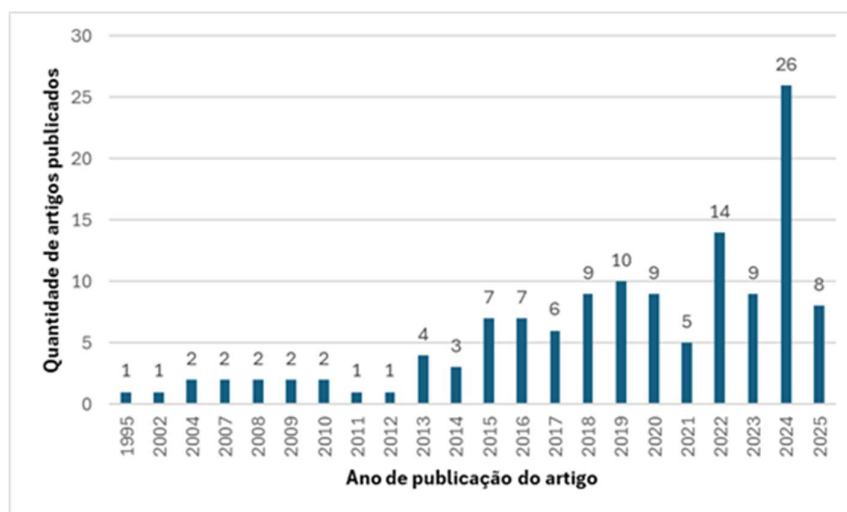


Figura 5 - Publicações por ano. Escala temporal evidenciando o aumento de publicações desta temática ao longo do tempo (1995 – 2025).

Outra informação importante extraída refere-se as áreas do conhecimento em que foram publicados artigos desta temática, (Figura 6). Na maioria dos casos os artigos estão classificados em mais de uma área o que não impede que sejam visíveis padrões de

frequência. O gráfico mostra que as áreas de *Ecology* e *Environmental Sciences* lideram a produção (73 artigos cada). Isso explica porque a revisão da literatura foca intensamente em ecossistemas terrestres, solos e biomassa vegetal, fundamentais para essas disciplinas.

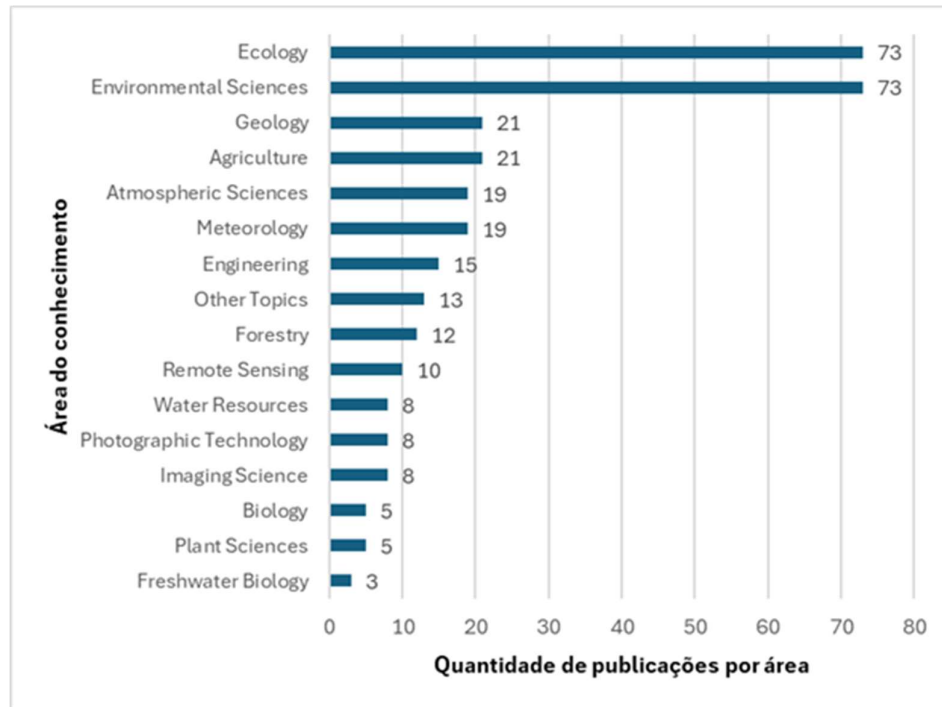


Figura 6 - Áreas do conhecimento que publicaram artigos sobre o tema pesquisado.

4.2. Geopolítica da Investigação em Carbono

No que se refere à distribuição das publicações por país, a Figura 7 mostra o panorama geral. Amsterdão nos Países Baixos é a cidade com maior destaque com 32 publicações, seguida de *Basiléia* na Suíça com 25 e *Gottingen* na Alemanha com 14 publicações. Na China tem o menor número de publicações entre as dez melhores posições com apenas três artigos.

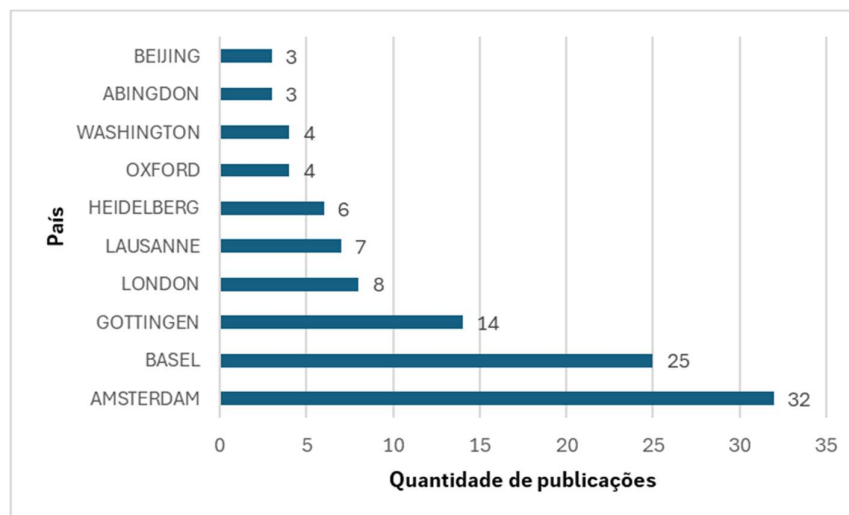


Figura 7 - Gráfico em Barras. Local onde os artigos foram publicados.

Utilizando o *Software Power BI* da *Microsoft*, que é uma ferramenta de *business intelligence*, foi possível criar um Gráfico Global que permitiu uma análise de dados de uma maneira interativa (Figura 8). O tratamento dos dados através da ferramenta gráfica permitiu a criação de um pontilhado sobre o mapa global tornando mais visível os países que publicaram artigos cuja temática enriquece esta pesquisa. É possível verificar que a maior parte das publicações incide sobre a Europa. Nos Estados Unidos e Canadá também se publicaram muitos artigos, comparados com a Austrália que tem apenas uma publicação, entre os artigos selecionados para este trabalho. Para América do Sul e África não há publicações para o conjunto de palavras-chave utilizadas na pesquisa, e para Rússia aparecem dois títulos publicados.



Figura 8 - Gráfico Global gerado através do software Power BI. Países onde se publicaram mais artigos.

Como se mostra na (Figura 9), as análises e coletas de dados ocorreram principalmente na China que lidera este *ranking* aparecendo com 43 estudos, seguido dos Estados Unidos com 13 estudos, Índia com 8 e Brasil com 5 estudos. Sibéria e Itália com 3 estudos cada e Finlândia, Espanha, Alemanha e continente Africano, com dois estudos cada, fecham esta lista.

Existe uma distinção entre onde se publica (predominantemente na Europa, como Amsterdã e Basileia) e onde os dados são coletados (liderança da China com 43 estudos e EUA com 13). Essa concentração de dados na China e nos EUA correlaciona-se com a menção na revisão bibliográfica das redes globais *ChinaFlux* e *AmeriFlux*, que utilizam a técnica de Covariância de Vórtices (EC) como padrão robusto para monitorar o ciclo do carbono.

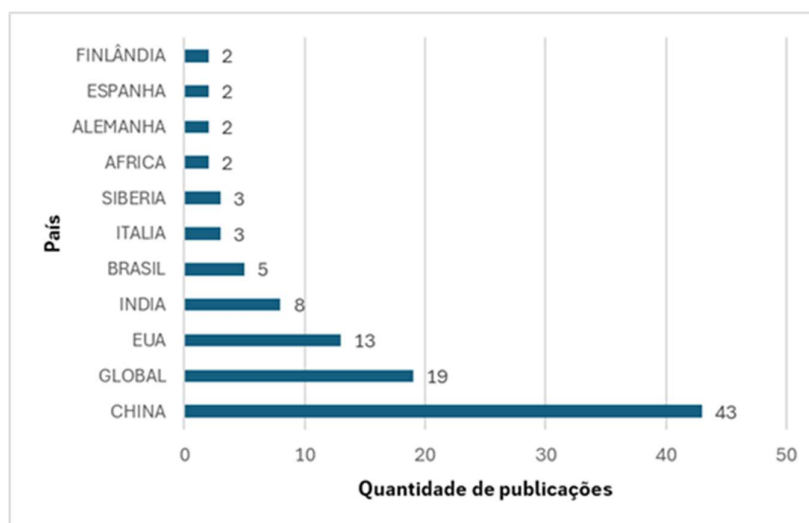


Figura 9 - Países em que mais se realizaram estudos, coleta de dados ou utilização de bancos de dados.

Gerou-se um gráfico global através do *Software power BI* para mostrarmos os locais onde se obtiveram dados para os estudos publicados, ou seja, os locais que foram objeto de estudo, ou muitas vezes apenas locais de onde se buscaram bancos de dados para os estudos (Figura 10). Pode-se observar que o número de marcadores aparentemente aumenta, porém não quer dizer que há mais trabalhos, mas apenas que alguns trabalhos estudaram mais do que uma realidade. Observou-se assim uma distribuição geográfica mais uniforme. Um exemplo, é o estudo intitulado “*Rapid Assessments of Amazon Forest Structure and Biomass Using Small Unmanned Aerial Systems*” que foi publicado em Basel, Suíça, mas que utilizou dados na Amazônia Brasileira.



Figura 10 - Países onde ocorreram os estudos e/ou coleta de dados. Locais onde coletaram-se dados ou onde foram foco de observações para os estudos.

O estudo, citado acima, que publica dados sobre a Amazônia brasileira publicado em Basileia, exemplifica a dinâmica mencionada na revisão bibliográfica sobre a importância de dados *in situ* para validar modelos globais em regiões tropicais.

As instituições (Universidades) que mais publicaram foram: primeiro lugar com 15 artigos está a *Chinese Academy of Sciences* em segundo lugar está *Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement*, CEA CNRS UVSQ, Gif-sur-Yvette 91191, France com 10 trabalhos, em terceiro lugar *United States Department of Agriculture* (USDA) e *United States Forest Services* empatam com 8 trabalhos cada. Uma vez que os Serviços Florestais são parte do USDA, o somatório dos trabalhos (16) faz com que esta seja a instituição com mais publicações na área, como pode ser visto no Gráfico da (Figura 11).

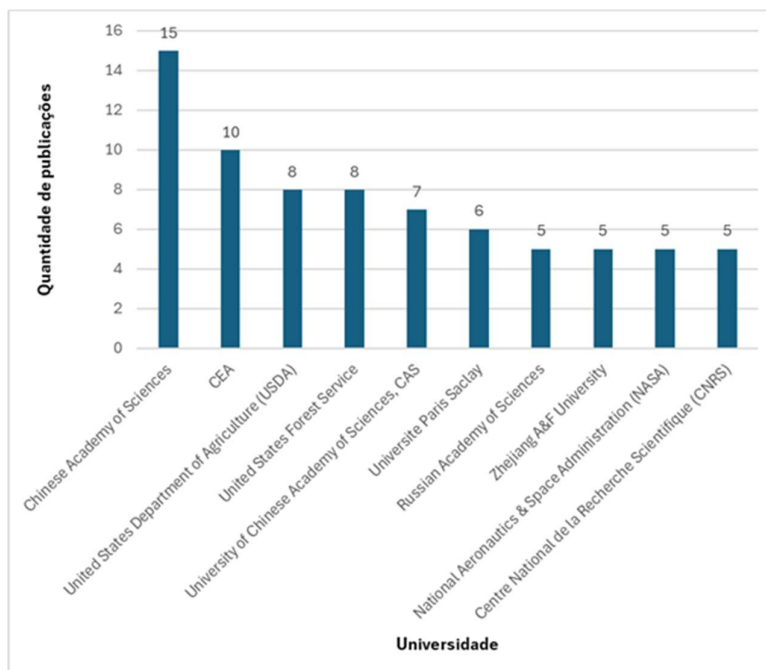


Figura 11 - Universidades que mais publicaram artigos referente aos métodos de quantificação de carbono.

Modelos Biogeoquímicos é um estudo publicado pela *Chinese Academy of Sciences* aparece como a instituição líder em publicações no gráfico da (Figura 11). Essa liderança institucional conecta-se ao texto do estado da arte, que destaca a alta acurácia do modelo *Biome-BGC* especificamente em florestas do norte da China, evidenciando o desenvolvimento tecnológico regional.

Em termos de autoria, a análise bibliométrica evidenciou que *Wang J.* se destaca como o autor mais recorrente, figurando como autor ou coautor em sete publicações. Seguem-se *Zhang L.* e *Zhang Y.*, cada um com participação em quatro trabalhos. Por outro lado, *Bermoux M.* apresenta a menor frequência de ocorrência enquanto autor ou coautor no conjunto analisado.

A representação gráfica destes resultados é apresentada na Figura 12, sob a forma de gráfico de barras, com o objetivo de facilitar a interpretação da distribuição da frequência de autoria. Importa salientar que estes autores correspondem aos nomes mais recorrentes no universo dos 131 artigos considerados neste estudo.

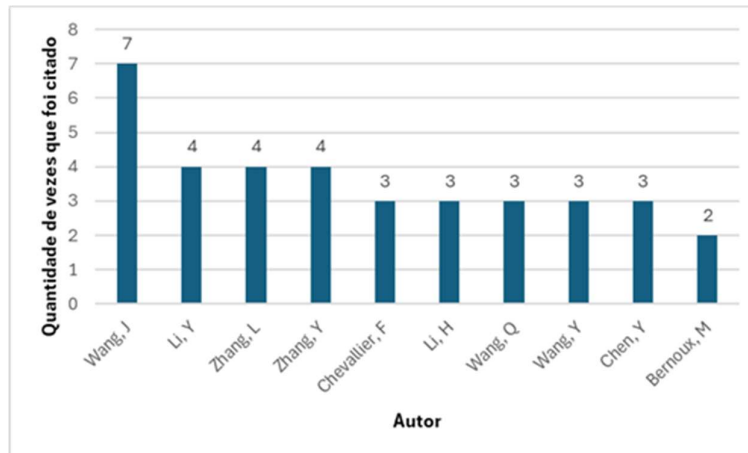


Figura 12 - Autores mais citados. Quantidade de vezes que os Autores publicaram.

4.3. Redes de Coautoria e Influência Científica

A força de ligação entre os termos (Figura 13) indicado pela espessura do traçado da linha que conecta os grupos de palavras, aponta para que palavras-chave como: “*Carbon storage*”, “*Soil deph*”, “*Variability*”, “*Respiration*”, “*Close chamber method*” e “*Gase*” nos artigos onde se descreve o método de medição de troca de CO₂ utilizando-se uma Câmara fechada aparecem fortemente ligada o período em que ocorreu o estudo, seja dia ou seja noite, porque de acordo com os autores como Davidson, *EA*, (2002) o horário de coleta é um fator importante a ser determinado dependendo do objetivo do estudo. Logo em verde está “*Combustion factor*” ligado a “*day*” e conectam-se ainda com “*respiration*” e “*variability*” que se interconecta com “*Chamber*” que é o método empregado para se medir a respiração do solo que pode ocorrer em períodos diurnos ou noturnos.

O estado da arte identifica o método da Câmara como o mais utilizado (33 artigos), seguido pela Amostragem de Solo (32). Isso se reflete na Teia de Palavras (Figura 13) e na Densidade de Palavras-Chave (Figura 13), onde os termos “*Chamber*”, “*Soil*”, “*Respiration*” e “*Carbon*” aparecem com forte ligação e densidade, indicando serem os pilares centrais da literatura analisada.

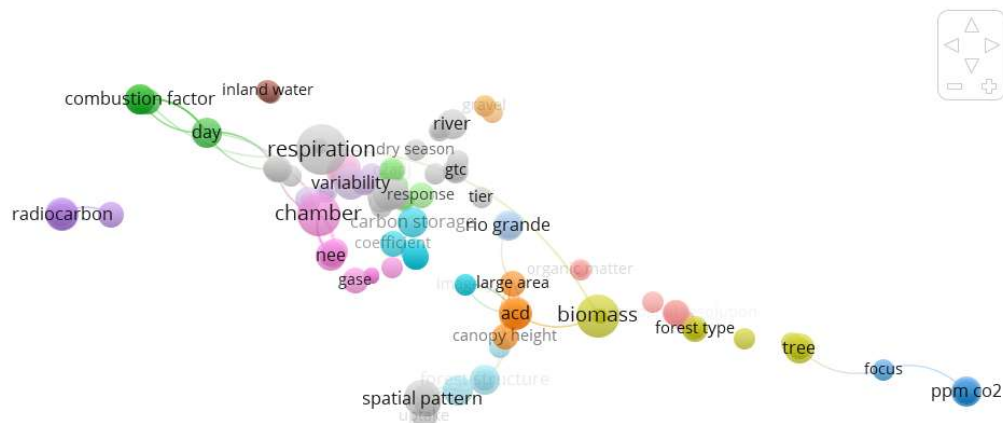


Figura 13 - Teia de Palavras - força de atração entre os termos das publicações consideradas neste estudo, termos que se interconectam. Quanto mais espessa a linha que conecta os grupos de palavras maior o número de vezes que estas palavras aparecem no mesmo.

Encontraram-se 54 relações de coautoria divididos em quatro grupos de autores, ligados a mesma teia com 476 links (Figura 14). É possível observar também que autores como *Karion, A; Sweeney, C; McKain, K; Oda, T*, são autores que unem os clusters, por terem trabalhado com outros autores que se ligam a outras redes de coautorias. Dois autores possuem ligação mais forte (maior força e atração) que todos os outros, devido à sua abrangência e quantidade de vezes que são citados, e esta informação torna-se visual de acordo com a espessura da linha que une os clusters. Os autores *Sweeney, C; McKain, K* são os mais fortes pois suas teias de coautoria unem todos os clusters (Figura 15).

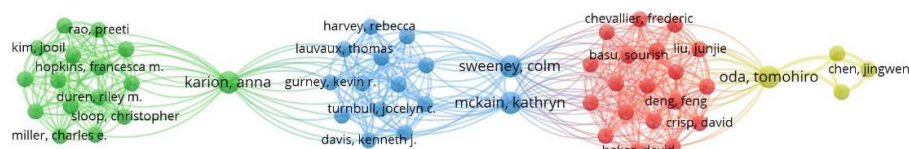


Figura 14 - Teia de Coautoria. Autores que publicaram com outros autores.

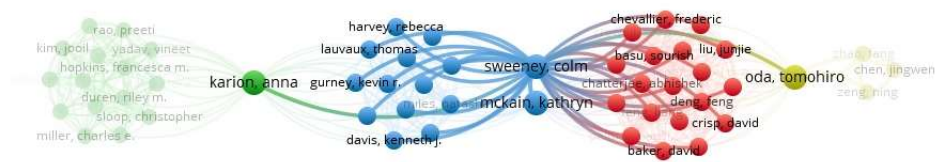


Figura 15 - Autores com maior força de ligação.

Analisando as palavras chave detectou-se que apareceram 4437 vezes nos artigos em 238 *links* (Figura 16). No gráfico de rede de Co-ocorrência, no estilo *Density Visualization*, de palavras-chave pode-se observar quais palavras-chave que possuem maior número de ocorrência e maior força de ligação, ou seja, as palavras de maior peso aparecem na área de cor mais densa: *Carbon*, *Carbon dioxide*, *Fluxes*, *Climate change*, *Cycle*, *CO₂*, *Energy*, *Emission*, *Sequestration*.

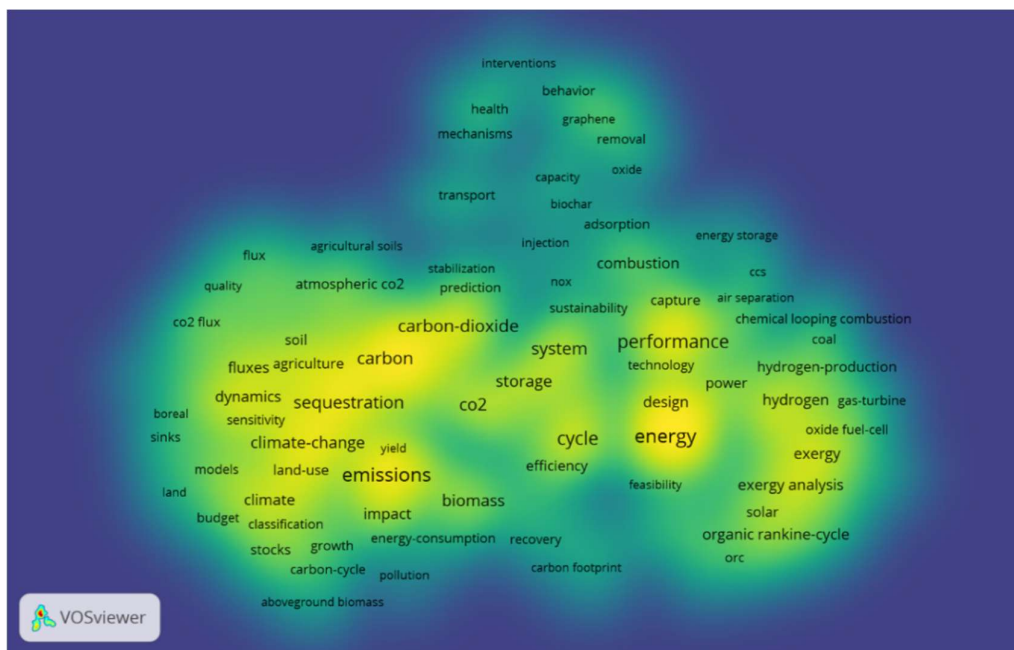


Figura 16 - Gráfico no formato Density Visualization. Palavras de maior peso.

As cores distintas indicam agrupamentos temáticos, sugerindo diferentes áreas de foco ou *clusters* de pesquisa interconectados. Por exemplo, um grupo parece centrar-se em mudanças climáticas, emissões e sequestro de carbono, enquanto outro aborda energia, ciclos energéticos e desempenho de sistemas. Há também um agrupamento que toca em intervenções, transporte e mecanismos, e outro focado em armazenamento e

captura. O gráfico ilustra as relações e a proximidade entre termos, indicando que são frequentemente discutidos em conjunto nos mesmos contextos.

De fato as palavras que mais apareceram foram: “*Carbon dioxide; Emissions; Sequestration e Cycle*”. Pode ser mais bem visualizada na (Figura 17 (a), (b), (c) e (d), onde os clusters possuem uma esfera central com a palavra principal, que se conecta as demais por linhas, quantas mais vezes elas aparecem juntas mais espessa é a linha que as une. Mesmo na Figura (16) já se observa que *Carbon dioxide; Emissions, e Cycle* ocupam o ranking das primeiras posições entre as mais citadas. *Sequestration* também está na zona mais densa do gráfico, como seria de esperar uma vez que a seleção foi efetuada com base neste termo.

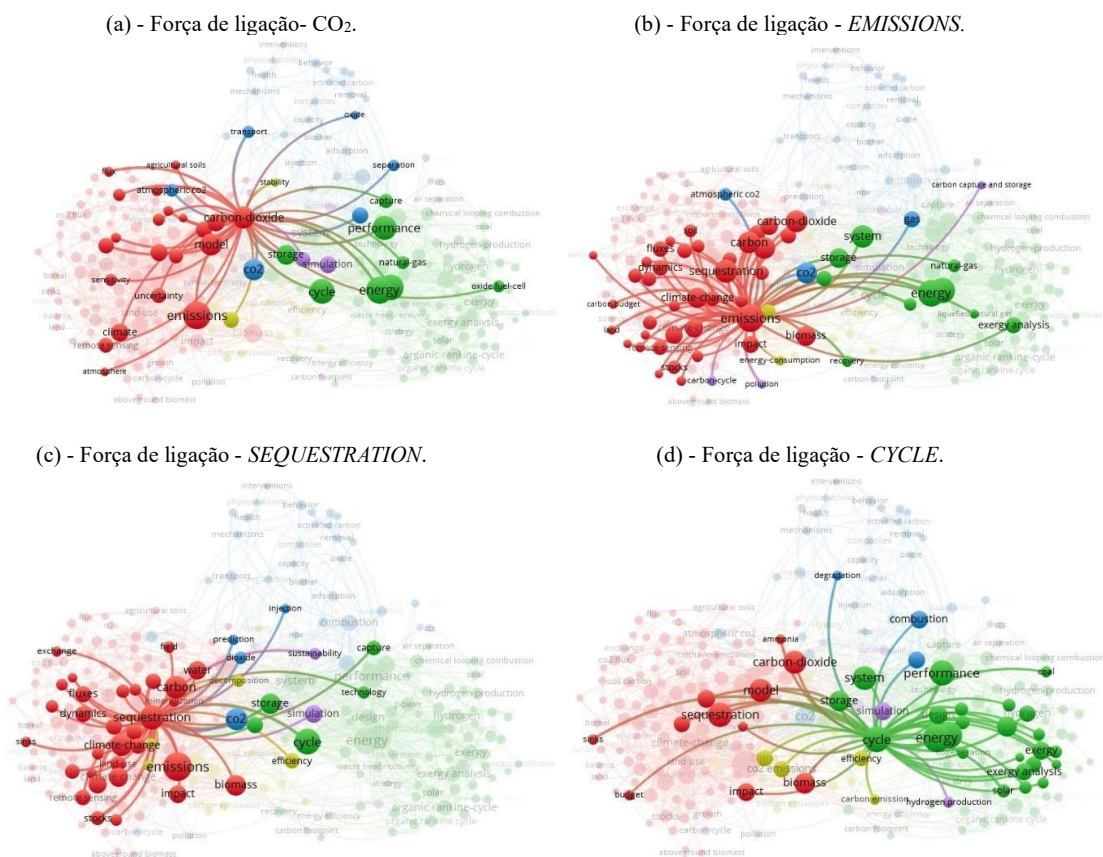


Figura 17 - Força de ligação entre as subáreas distintas. Clusters com as palavras – chave principais unidas às demais por uma linha que quanto mais espessa maior é a força de atração entre as palavras, ou seja mais aparecem ao mesmo tempo nos artigos.

Em resumo, os gráficos oferecem uma visão panorâmica do cenário de pesquisa (ou do domínio de conhecimento) representado pelas palavras-chave. Ele mostra os temas centrais, como carbono, CO₂, energia, emissões e mudanças climáticas, e como eles se agrupam em subáreas distintas (representadas pelas cores) que estão

interconectadas. A forte ligação entre os clusters vermelho (carbono/clima) e verde (energia) através de termos como "*emissions*", "*CO₂*" e "*system*" destaca a interdisciplinaridade e a importância da relação entre energia e meio ambiente/clima neste campo de estudo.

O Gráfico da (Figura 13) do tópico “Redes de Colaboração e Influência Científica” deste trabalho, corrobora as discussões do tópico da Revisão sistemática. Os clusters de palavras-chave como "*Emissions*", "*Sequestration*" e "*Cycle*" mapeiam exatamente os processos abordados na revisão: Fluxo de Carbono com 71 artigos, e Sequestro de Carbono, com 24 artigos. A forte conexão entre esses clusters reforça a "Sinergia Metodológica" defendida na Revisão sistemática, que prega a integração de abordagens *bottom-up* (medições locais como câmaras) e *top-down* (satélites e torres) para reduzir incertezas no balanço de carbono.

4.4. Síntese Crítica: Implicações para o Estado da Arte

4.4.1. Correlação Entre Clusters e Métodos

A análise bibliométrica identifica agrupamentos temáticos que se alinham diretamente às tecnologias descritas na revisão sistemática tais como:

A respiração do solo através do cluster de respiração e fluxos locais onde as palavras-chave "*Respiration*", "*Soil depth*", "*Variability*" e "*Gase*" possuem forte atração pelo termo "*Close chamber method*". Isso se correlaciona com o fato de o método da câmara ser o mais frequente na literatura (33 artigos), sendo a técnica fundamental para investigar processos biológicos em microescala, como a respiração do solo e da serapilheira.

O sequestro de carbono através do *cluster* de sequestro, solo e dinâmica com termos como "*Sequestration*", "*Soil*", "*Dynamics*" e "*Land-use*" formam um núcleo denso que correlacionam-se com a amostragem de solo (32 artigos), focada na medição dos estoques de carbono orgânico do solo (ECOS) e na comparação de protocolos como o perfil de solo inteiro (ESP) e seções de controle (SCS).

As emissões através do *cluster* de emissões, ciclo e clima evidencia as palavras "*Carbon dioxide*", "*Emissions*" e "*Cycle*" são as mais citadas e centrais. Elas ligam-se ao método de covariância de vórtices (*Eddy Covariance*) e a detecção remota, que são essenciais para monitorar o ciclo global e fluxos ecossistêmicos de CO₂ em larga escala.

Já o *cluster* de Energia, desempenho e sistemas, este grupo conecta "*Energy*", "*Efficiency*" e "*System*". Correlaciona-se com a Modelação Biogeoquímica e Dinâmica (SWAT, Biome-BGC), que simula a eficiência das trocas de energia e matéria em bacias hidrográficas e sistemas urbanos sob diferentes cenários climáticos.

A modelação de biomassa baseada em séries temporais, como *LandTrendr* combinada a *Random Forests*, permite reconstruir o histórico de distúrbios florestais e estimar biomassa ao longo de décadas. Essa abordagem apresenta alta acurácia e capacidade de integrar múltiplos sensores, embora ainda enfrente desafios na identificação precisa das causas dos distúrbios.

4.4.2. Implicações para o Campo de Quantificação de Carbono

A integração desses dados traz implicações críticas para a prática e a pesquisa na área, tais como: Necessidade de sinergia metodológica que demonstra que a forte ligação entre *clusters* através de termos como "*Model*" e "*Uncertainty*" reforça que nenhuma técnica isolada é suficiente. Revelou-se que a principal tendência é a integração *bottom-up* (medições locais como câmaras e inventários) com abordagens *top-down* (torres de fluxo e satélites) para validar estimativas e reduzir incertezas, especialmente em ambientes urbanos e florestais complexos.

Ainda percebe-se que a correção de vieses de protocolo torna-se fundamental pois a literatura alerta que o uso de métodos simplificados de amostragem de solo (SCS) pode superestimar os estoques de carbono. Além disso, ignorar a inibição da respiração diurna pode levar a erros nas estimativas de fotossíntese e respiração anual.

Desta forma evidencia-se a importância da geopolítica e lacunas de dados, pois embora a maioria das publicações venha da Europa (Amsterdã, Basileia), a maior parte dos dados e estudos ocorre na China (43 estudos) e nos EUA. Isso implica que o conhecimento técnico é produzido em centros globais de publicação, mas a validação empírica depende fortemente de redes de monitoramento específicas como (*ChinaFlux* e *AmeriFlux*).

E por fim o deve-se ter forte consideração para o foco no Fluxo de Carbono, pois dominância de estudos sobre Fluxo de Carbono (71 artigos) em relação a Sequestro (24) e Estoque (20) sugere que o campo ainda está mais focado em quantificar a liberação de CO₂ e as fontes poluidoras do que em monitorar a eficácia a longo prazo de sumidouros de carbono.

5. DESAFIOS E LIMITAÇÕES NA MEDIÇÃO DO CARBONO

De acordo com a literatura técnica e científica, os profissionais e entidades que avaliam o carbono enfrentam desafios complexos que variam desde a escala instrumental até a incerteza de modelos globais. Essas dificuldades podem ser agrupadas em categorias fundamentais, seguidas pelas soluções propostas pelos autores pesquisados.

Ultrapassar as dificuldades, limitações e lacunas associadas à medição de fluxos de carbono revela desafios inerentes à heterogeneidade espacial e temporal dos ecossistemas, à complexidade dos processos biogeoquímicos e às restrições técnicas dos instrumentos e modelos utilizados. Desta maneira criou-se uma descrição técnica e científica, das limitações encontradas e das lacunas que necessitam de melhorias nos principais métodos abordados pela literatura, que se encontram no Anexo II, de onde se pode tirar as conclusões que seguem:

Os desafios instrumentais decorrem das limitações físicas e operacionais dos equipamentos utilizados para medir fluxos e estoques de carbono. No caso das câmaras de respiração, câmaras não estacionárias podem alterar gradientes naturais de difusão e gerar variações de pressão interna, resultando em subestimações dos fluxos.

Sistemas de fluxo contínuo também são sensíveis à turbulência gerada pela introdução de ar, prolongando o tempo necessário para atingir o equilíbrio e reduzindo a precisão das medições. A técnica de covariância de vórtices apresenta limitações adicionais: sensores de caminho aberto registram fluxos negativos anômalos em ambientes áridos, e a baixa sensibilidade dos sensores restringe medições na interface sedimento-água. Na detecção remota, sensores ópticos sofrem saturação em florestas densas, produtos como MODIS-LAI apresentam ruído elevado, e UAVs dependem de GPS de baixa precisão, exigindo correções manuais intensivas. Modelos biogeoquímicos, como o Biome-BGC, enfrentam limitações estruturais decorrentes do uso de parâmetros ecofisiológicos estáticos, que não capturam a variabilidade temporal dos ecossistemas.

A dimensão amostral envolve dificuldades relacionadas à representatividade e à integridade das amostras coletadas. A amostragem por Seções de Controle do Solo (SCS), baseada em profundidades fixas, mistura horizontes pedogenéticos e pode superestimar o estoque total de carbono orgânico do solo, como observado na revisão da literatura.

Parâmetros como densidade aparente e teor de cascalho introduzem incertezas adicionais, sobretudo quando o uso da terra altera a compactação do solo.

Em análises isotópicas, a presença de carbono inorgânico interfere nos valores de $\delta^{13}\text{C}$, dificultando a estimativa da taxa de renovação do carbono orgânico. No mapeamento digital do solo, modelos de aprendizado de máquina exigem grandes bases de treinamento, e bancos de dados legados apresentam vieses espaciais que comprometem estimativas regionais. Esses desafios reforçam a necessidade de padronização de protocolos e integração entre métodos de campo, detecção remota e modelação.

Os desafios contextuais derivam das características ambientais, operacionais e socioespaciais que influenciam a aplicação dos métodos. A covariância de vórtices requer áreas extensas e homogêneas, o que limita sua aplicação em paisagens agrícolas fragmentadas. Em florestas, a atividade do sub-bosque dificulta a separação entre respiração do solo e respiração do ecossistema. Em ambientes urbanos, o principal obstáculo é a definição do sinal de fundo atmosférico, que não pode ser medido diretamente e representa a maior fonte de incerteza em inversões atmosféricas.

Devido a estes fatores como a complexidade da circulação de mesoescala, como brisas marítimas, aumentam a incerteza no transporte atmosférico. Em regiões com pouca infraestrutura de monitoramento, como Oriente Médio e África, a ausência de dados de base impede a avaliação da variabilidade regional. Processos industriais, como mineralização de CO_2 , também apresentam limitações energéticas e químicas, exigindo CO_2 puro e pressurizado e etapas adicionais de purificação.

Conclui-se neste tópico que a análise integrada dessas três dimensões revela que nenhum método é isento de limitações, e que as incertezas observadas são resultado da interação entre restrições instrumentais, lacunas amostrais e condicionantes ambientais. Por isso, a literatura converge para a necessidade de padronização de protocolos, integração de métodos e combinação de abordagens *bottom-up* e *top-down*. A complementaridade entre técnicas permite que as fragilidades de um método sejam compensadas pela robustez de outro, fortalecendo a confiabilidade das estimativas e a interpretação dos fluxos de carbono em diferentes ecossistemas e contextos urbanos.

6. FERRAMENTAS DE APOIO À DECISÃO E PROTOCOLOS OPERACIONAIS

6.1. Framework Operacional

Uma *Framework* operacional é uma ferramenta que auxilia profissionais na seleção de metodologias ao fornecer um guia técnico estruturado que correlaciona o objetivo da medição (fluxo vs. estoque), a escala espacial e o ecossistema alvo com o rigor científico necessário para mitigar incertezas. A *Framework* funciona como um mapa de navegação científica pois ela não apenas mostra os caminhos disponíveis (métodos), mas aponta onde estão os "buracos" (vieses) e qual veículo (tecnologia) é mais eficiente para o terreno (ecossistema) e a distância (escala) que o profissional precisa percorrer.

O levantamento das limitações e lacunas metodológicas demonstra a complexidade inerente à mensuração de carbono, resultante da variabilidade dos ecossistemas, dos processos biogeoquímicos e das restrições instrumentais. A partir disso, elaborou-se uma síntese técnico-científica (Quadro 2) que sistematiza tais limitações e identifica oportunidades de melhoria nos principais métodos discutidos pela literatura.

Quadro 2 - Matriz de decisão para orientar profissionais / entidades a selecionar o melhor método para avaliação do Carbono em função das condicionalidades

Objetivo / Variável-Alvo	Método Sugerido	Contexto (Localidade, Clima, Geografia)	Vantagens Chave (Por que escolher)	Limitações e Considerações Críticas
I. ESTOQUES DE CARBONO (<i>STOCK ASSESSMENT</i>)				
AGB (Biomassa Acima do Solo) e Estoque Total da Floresta	Inventário Florestal + BEF (Fator de Expansão de Biomassa)	Florestas e Silvicultura (Tier 2/3), onde a idade e espécie são cruciais para a contabilidade. Requer alta precisão para a compensação de C.	Modelo fundamental e preciso. Permite determinar o estoque de C total da floresta, incluindo madeira e outros produtos.	Alto custo e carga de trabalho. Requer o uso de modelos de crescimento específicos por espécie (Gompertz, Richards) para projeções futuras.
ACD (Densidade de C Acima do Solo) e Estrutura do Dossel	UAVs (Drones) + SFM/Fotogrametria	Escalas intermediárias (100 a 100.000 ha). Florestas tropicais ou áreas de monitoramento rápido e frequente.	Avaliação rápida e frequente. Boa correlação com LiDAR em grãos de geq 0,5 ha. Sensível a pequenas perturbações.	A precisão da georreferenciação é um gargalo, exigindo mão de obra intensiva.
SOCS (Estoque de C Orgânico do Solo) para Avaliação de Baseline	Amostragem por Perfil de Solo Inteiro (ESP)	Solos complexos e heterogêneos, como áreas mediterrânicas ou florestas, onde a precisão e comparabilidade são máximas.	Método Superior: Baseia-se em horizontes pedogenéticos. Evita a superestimação do T-SOCS em até 28,2% que ocorre com o método de seção de controle (SCS).	Mais laborioso e exige conhecimento especializado em pedogenia.
SOCS (Estoque de C Orgânico do Solo) Rápido e Espacial	Espectroscopia LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)	Monitoramento temporal e espacial frequente <i>in-situ</i> (em campo). Necessidade de reduzir o tempo de laboratório e armazenamento.	Simples, rápido (1 min/amostra) e permite monitoramento on-site. Calibração com pequeno número de amostras.	Incerteza global de aproximadamente 10%. A sensibilidade pode diminuir em amostras com alto teor de C devido à auto-absorção.

(continua)

Objetivo / Variável-Alvo	Método Sugerido	Contexto (Localidade, Clima, Geografia)	Vantagens Chave (Por que escolher)	Limitações e Considerações Críticas
II. FLUXOS DE CARBONO (CO₂)				
NEE (Balanço de C Ecossistêmico) em Larga Escala	Covariância de Vórtices (EC)	Ecossistemas extensos e uniformes (Florestas, Pastagens, Agroecossistemas de grande área).	Captura integral do fluxo entre dossel e atmosfera. Único método para determinar diretamente a troca de CO ₂ da comunidade.	Inadequado para áreas pequenas/desiguais. O método de caminho aberto pode gerar sinal negativo anormal (bias) em desertos e ecossistemas de baixa produtividade.
Re (Respiração do Solo) Pontual/Heterogêneo	Câmaras Estacionárias Não Steady-State Chambers)	Medições pontuais em campo com alta heterogeneidade espacial e temporal.	Permite caracterizar um local (relativamente) homogêneo com \approx 6-8 medições em uma hora, dependendo da precisão desejada.	Gera um viés de subestimação (negligenciável a 15%) se as câmaras forem baixas. A ordem de medição deve ser randomizada para evitar confusão com a variação diária.
NEE em Culturas Específicas (Plot Scale)	Câmaras de Fluxo Contínuo (Flow-through Chambers)	Agroecossistemas em escala de talhão (<i>plot scale</i>), como milho (Maize), onde o EC é inviável devido à escala.	Mais viável, precisa e menos dispendiosa que o EC para áreas pequenas. Otimizações (defletores) aumentam a precisão.	Requer validação contra métodos de linha de base (absorção de solução alcalina).
III. MODELAÇÃO E ESCALAÇÃO REGIONAL				
NPP\textGPP (Produtividade Primária) Regional/Global	Modelo CASA (Baseado em LUE) ou PPI	Simulação regional ou global. Áreas com necessidade de mapeamento de longo prazo (monitoramento de minas, grandes bacias). Ecossistemas semiáridos (para PPI).	Adequado para expressar características espaciais e temporais. Modelos baseados em LUE (Eficiência de Uso da Luz). O PPI superou o MOD17 em ecossistemas semiáridos africanos ($R^2=0,77$ vs $R^2=0,49$).	Requer dados de satélite e input climático. A precisão de modelos LUE (como o MOD17) pode ser baixa em ecossistemas semiáridos devido à classificação imprecisa de PFT.

(continua)

Objetivo / Variável-Alvo	Método Sugerido	Contexto (Localidade, Clima, Geografia)	Vantagens Chave (Por que escolher)	Limitações e Considerações Críticas
GPP/textNEP (Produtividade de Ecossistema) a Longo Prazo	Modelo Biome-BGC	Ecossistemas Florestais (especialmente no Norte da China) ou Pastagens (especialmente no Sul da China).	Simulação de processos, precisão alta para florestas de alta latitude e pastagens de baixa latitude. A precisão é melhorada.	Requer Análise de Sensibilidade (EFAST) e Otimização de Parâmetros (PEST) para novos locais/variáveis, a acurácia varia com o tipo de vegetação.
Mapeamento Espacial de SOC em Alta Resolução	Mapeamento Digital de Solo (DSM) com Random Forest (RF)	Regiões com atividade humana intensiva ou solos heterogêneos, onde dados legados são imprecisos. Zonas áridas (combinação Sentinel-1A/2A/3A).	O modelo RF geralmente oferece desempenho preditivo superior ($R^2=0,76$ em um estudo comparado) em comparação com modelos lineares (GLM) e <i>Kriging</i> .	Requer extensa coleta de dados de campo para treinamento e validação. A precisão é afetada por variáveis preditoras (derivados DEM são os mais importantes).
IV. CONDIÇÕES ESPECIAIS & APLICAÇÕES				
Emissões Urbanas (CO ₂)	Múltiplos Métodos Integrados (Inventário + Inversão Atmosférica)	Megacidades ou áreas metropolitanas complexas, onde se busca o balanço de GEE com alta confiança (projetos INFLUX).	Integra (bottom-up e <i>top-down</i>), atingindo consistência de $\pm 7\%$. Permite a avaliação de mudanças nas emissões ao longo do tempo.	Requer infraestrutura de medição contínua e de longo prazo (sensores CRDS/torres). O maior desafio é a incerteza na determinação do sinal de fundo (<i>background</i>).
Gestão e Mitigação de GEE Agrícolas (Resíduos Orgânicos)	Modelação Integrada de Avaliação (IAM) - MAELIA-OWM	Avaliação regional de cenários como o uso de resíduos orgânicos em práticas agrícolas.	Combina modelos solo-cultura, baseados em agentes (ABM).	Os impactos no balanço de GEE dependem criticamente do método de alocação de emissões.

(fim do quadro)

Pode-se também verificar as melhores alternativas encontradas na literatura para diminuir as incertezas. Nos (Quadros 3, 4, 5 e 6) é oferecido o melhor método para cada situação, bem como a forma de implementação. O caso de Bragança no Nordeste Transmontano é um exemplo de como este capítulo é relevante para que um profissional selecione a melhor metodologia devido às condições adversas da localidade, que neste caso são formadas por um mosaico urbano, emissões difusas e necessidade de monitorização contínua. Desta forma é sugerida detecção remota + câmaras pontuais pois a matriz recomenda métodos de larga escala para ambientes urbanos; a literatura destaca a relevância de urban *heat island* e LULC. A validação demonstra que a matriz responde adequadamente a diferentes contextos, mantendo coerência com a revisão sistemática e com os padrões bibliométricos.

Quadro 3 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO₂ para Avaliação de Estoques de Carbono (Carbon Stock Assessment)

Situação	Método	Implementação
Florestas e Manguezais (Biomassa)	Inventário e Equações Alométricas	O Estoque de Carbono da Biomassa Acima do Solo (AGC) e o Estoque de Carbono da Raiz Subterrânea (BRC) podem ser estimados utilizando equações alométricas. Para manguezais, é preciso incluir no estudo o Estoque de Carbono da Biomassa Acima e Abaixo do Solo e o Carbono do Solo até 1 m de profundidade, idealmente através de amostragem de campo para aumentar a precisão.
Florestas (Inventário)	Fator de Expansão de Biomassa (BEF)	Para calcular as reservas de carbono de toda a floresta e seus produtos (incluindo biomassa arbórea, arbustiva, serapilheira morta e produtos de madeira), pode-se utilizar o método BEF. A precisão é aprimorada ao se utilizar fatores de conversão ajustados por região provincial e grupo etário.
Solo (Em geral)	Amostragem de Campo e Análise Laboratorial	O Estoque de Carbono Orgânico do Solo (SOCS) pode ser calculado a partir da concentração de SOC, densidade aparente (BD), espessura da camada e percentagem de cascalho. Duas abordagens de amostragem podem ser usadas: <u>Perfil de Solo Inteiro (ESP)</u> por horizontes pedogenéticos ou <u>Seções de Controle do Solo (SCS)</u> por incrementos fixos de profundidade (0–25 cm). Recomendação: O método ESP é superior, pois se baseia nas propriedades naturais do solo e evita a superestimação do SOCS causada pela mistura de horizontes, o que ocorre no SCS.
Solo (Detecção de Mudança de Uso da Terra)	Método da Massa Equivalente de Solo	Ao avaliar mudanças de uso da terra (ex: pastagem para floresta) onde as propriedades do solo, como a densidade aparente (BD), são alteradas, o método da Massa Equivalente de Solo é um método menos comum, mas mais preciso, para detectar mudanças significativas no SOCS, em comparação com o método tradicional baseado em BD.
Solo (Dinâmica C Orgânico e Inorgânico)	Técnica de Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$)	Utilizada para rastrear a fonte, migração e processo de transformação do Carbono Orgânico do Solo (SOC) após mudanças de uso da terra (conversão de C4 para C3). Recomendação: Para estimar a estabilidade de renovação (turnover) do SOC, a interferência do Carbono Inorgânico do Solo (SIC) deve ser excluída na medição do C.
Avaliação de Estoques de Carbono (<i>Carbon Stock Assessment</i>)		
Mapeamento Solo	Mapeamento Digital do Solo (DSM)	Uso de técnicas de <i>machine learning</i> como <i>Random Forest</i> (RF) e <i>Cubist</i> para prever a distribuição espacial do SOCS. Variáveis preditoras incluem propriedades do solo, clima, topografia e dados de detecção remota (Sentinel-1A/2A/3A, DEM).

Quadro 4 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO₂ para medição de Fluxos de Carbono (Carbon Flux Measurement)

Situação	Método	Implementação
Respiração do Solo (Re)	Câmaras (<i>Chamber-based</i>)	Utiliza-se câmaras e <i>Infrared Gas Analyzers</i> (IRGAs). Implementar o método no modo não-equilíbrio (medindo a taxa de aumento de CO ₂ em volume conhecido) ou equilíbrio (medindo a diferença de CO ₂ entre entrada/saída de ar). Usar períodos breves de medição (câmaras de 10–20 cm de altura) minimiza o viés de subestimação causado pela perturbação dos gradientes de difusão.
NEE em Agroecossistemas (Plantas Altas)	Câmaras de Fluxo Contínuo (<i>Flow-through Chamber</i>)	Implementar design de câmara <i>flow-through</i> para medir o NEE no nível do talhão (<i>plot scale</i>). O fluxo é calculado a partir da diferença de concentração CO ₂ entre a saída (<i>C_{out}</i>) e a entrada (<i>C_{in}</i>), multiplicada pela taxa de fluxo (Q) e dividida pela área (A). Melhoria: Incorporar defletores na câmara para reduzir a turbulência e acelerar o tempo para o estado de equilíbrio, aumentando a precisão e a frequência de medição.
Fluxos de Ecossistemas (NEE, GPP)	Covariância de Vórtices (<i>Eddy Covariance - EC</i>)	Usado para obter fluxos turbulentos e avaliar a intensidade de fonte-sumidouro de carbono do ecossistema. É o único método para determinar diretamente a troca de CO ₂ da comunidade com a atmosfera e exige terreno extenso e uniforme.
Fluxos em Ambientes Extremos (Desertos)	EC de Caminho Aberto vs Caminho Fechado	O sistema de EC deve ser escolhido cuidadosamente. O EC de caminho fechado (<i>closed-path</i>) mostrou resultados mais razoáveis e consistentes com medições de respiração do solo em desertos, em comparação com o sistema de caminho aberto (IRGASON). É necessário um ajuste, uma correção para o fluxo de CO ₂ negativo anormal e irracional (que superestima a capacidade de sequestro) frequentemente observado em ecossistemas de baixa produtividade com instrumentos de caminho aberto.
Fluxos na Interface Água-Sedimento/Ar	Covariância de Vórtices Aquática (<i>Aquatic EC</i>)	Aplicável para medir fluxos de oxigênio dissolvido (DO) na interface sedimento-água em ambientes aquáticos (rios, lagos, reservatórios). Assume-se que não há fonte ou sumidouro de DO entre o ponto de medição e o sedimento.

Quadro 5 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO₂ para Avaliação de Carbono em Escala Regional e Urbana

Situação	Método	Implementação
Produtividade Primária (GPP/NPP)	Modelos Baseados em Detecção remota	Utilização de modelos baseados em eficiência de uso da luz (LUE), como o modelo CASA (<i>Carnegie-Ames-Stanford-Approach</i>), adequado para NPP/GPP em escala regional ou global. Alternativamente, o índice de fenologia de plantas (PPI) pode ser usado para estimar GPP em ecossistemas semiáridos, incorporando o estresse hídrico do dossel.
Modelação de Ecossistemas Florestais	Modelos Biogeoquímicos (<i>Biome-BGC</i>)	O uso de modelos de processo de ecossistema como o <i>Biome-BGC</i> para simular produtividade (GPP e NEP) deve ser precedido por uma análise de sensibilidade de parâmetros (método EFAST) e otimização de parâmetros (método PEST). Isso melhora a precisão, especialmente onde a aplicabilidade do modelo varia espacialmente (decrecendo de norte para sul em ecossistemas florestais na China).
Emissões de GEE Agrícolas	Modelos Biogeoquímicos de Alta Resolução (DNDC)	Para melhorar o inventário nacional de GEE (<i>Tier 3</i>) em áreas agrícolas, o modelo DNDC pode ser integrado em uma plataforma GIS com grade de alta resolução (1 km x 1 km). Isso permite a avaliação dos efeitos potenciais de práticas alternativas de manejo (AMP) no sequestro de C.
Estimativa de Carbono Acima do Solo (ACD) em Escala Intermediária	UAVs e <i>Structure-from-Motion</i> (SFM)	Uso de sistemas aéreos não tripulados (UAVs) para coletar imagens e criar modelos 3D do dossel via SFM. O SFM permite a estimativa rápida e frequente de Densidade de Carbono Acima do Solo (ACD) em escalas intermediárias (100–100.000 ha), sendo sensível a pequenas perturbações.
Emissões Urbanas (CO ₂)	Múltiplos Métodos Integrados (INFLUX)	Para quantificar emissões urbanas, utiliza-se a comparação e integração de três abordagens: Inventário <i>Bottom-up</i> (dados de alta resolução), Inversão Atmosférica (combinação de observações <i>in situ</i> e modelação de transporte atmosférico) e Balanço de Massa (observações por aeronave).
Monitoramento Contínuo Urbano	Redes de Sensores CRDS e Determinação de Fundo	Implantação de redes de estações de monitoramento contínuo <i>in situ</i> (<i>Cavity Ring-Down Spectroscopy</i> - CRDS) para CO ₂ . É essencial estabelecer critérios rigorosos para a seleção do sinal de CO ₂ de "fundo" (<i>background</i>) usando sites extra-urbanos para calcular o aumento local (CO ₂) e suas incertezas.

Quadro 6 - Diretrizes para evitar / corrigir erros conhecidos na Avaliação do CO₂ para Avaliação de Processos de Mitigação (Fixação e Sequestro)

Situação	Método	Implementação
Processos Químicos Industriais (Mineralização de CO ₂)	Reação de Carbonatação em Câmara e Simulação de Processo	Realizar a reação de carbonatação em uma câmara, introduzindo CO ₂ puro e pressurizado para reagir com amostras hidrolisadas (Mg(OH) ₂). A taxa de carbonatação é medida ao longo do tempo (2, 4, 6, 8 e 10 horas) e comparada com dados de referência. Uma simulação de processo é desenvolvida para avaliar a eficiência térmica e a economia de energia do ciclo integrado de fixação de CO ₂ .
Gestão de Resíduos Orgânicos em Agricultura	Modelação e Avaliação Integrada (IAM) - MAELIA-OWM	Utilização de uma plataforma que integra modelos solo-cultura (para dinâmica de SOC e lixiviação de NO ₃), Modelos Baseados em Agentes (ABM) (para estratégias de agricultores e restrições) e análise multi-critérios. Essa abordagem avalia os múltiplos <i>trade-offs</i> e sinergias do uso de resíduos orgânicos como fertilizantes (incluindo o armazenamento de C no solo e o balanço de GEE) em nível regional.
Reservatórios Hidrelétricos (Mudança de Uso da Terra)	Método do Estoque de Carbono (<i>Carbon Stock Method</i>)	Consiste em medir a massa total de carbono (em sedimento, solo, vegetação e água) no estado pré-represamento (usando dados de literatura/áreas circundantes) e no estado pós-represamento (medido em campo). Para o sedimento, pode-se usar a tecnologia de ecossondagem (<i>echo sounding</i>) para determinar a espessura e volume, e combinar com o teor de OC e densidade para calcular o estoque. Este método é alternativo e complementar ao método de fluxo.

Pode-se dizer que a *Framework* serve como instrumento que orienta o profissional para o método mais robusto conforme o objetivo da medição. Para estoques em reservatórios, destaca a superioridade do método de massa total face ao monitoramento contínuo de fluxos, cuja variabilidade e custo são elevados. No caso dos solos, recomenda o Perfil de Solo Inteiro (ESP), que preserva a estratigrafia pedogenética e evita a superestimação típica das seções de controle (SCS).

Ao explicitar limitações conhecidas, a *Framework* permite implementar correções antes da coleta de dados, como o uso de períodos curtos de medição em câmaras para reduzir perturbações no gradiente de CO₂, a substituição de sistemas de covariância de vórtices de caminho aberto em ambientes áridos devido ao sinal negativo anormal, e a remoção prévia do Carbono Inorgânico do Solo (SIC) em análises isotópicas para garantir estimativas precisas de *turnover*.

A *Framework* também auxilia na seleção tecnológica em função da escala. Para áreas >100.000 ha, recomenda modelos baseados em satélite integrados a inversões atmosféricas; para escalas intermédias, UAVs com fotogrametria SFM, que oferecem precisão comparável ao LiDAR com menor custo; e, para medições pontuais, tecnologias rápidas *in situ* como LIBS, reduzindo a dependência de laboratórios.

Ao padronizar procedimentos, a *Framework* facilita a conformidade com diretrizes internacionais, como as do IPCC, aspecto essencial para inventários destinados à geração de créditos de carbono ou à mitigação urbana, onde a determinação rigorosa do sinal de fundo atmosférico é crítica. Para modelos biogeoquímicos, reforça a necessidade de análises de sensibilidade (EFAST) e otimização de parâmetros (PEST), dada a variação espacial da aplicabilidade dos modelos.

A incerteza permanece um desafio transversal, influenciada pela qualidade dos dados, pela heterogeneidade espacial e temporal e pela escala de variação. Emissões urbanas podem apresentar incertezas, enquanto câmaras de respiração do solo podem subestimar fluxos em até 15%. Assim a *Framework* operacional, através da (Tabela 3), oferece estratégias explícitas de avaliação e mitigação dessas incertezas.

6.2. Protocolo Base de Inventário de Carbono (PBIC)

Os artigos enfatizam consistentemente que a padronização de protocolos de medição e amostragem é fundamental para reduzir vieses e incertezas, aumentando assim a rigor e a confiabilidade dos inventários de carbono. Com base nos pontos fracos

identificados, a seguir, é proposto um Protocolo Base de Inventário de Carbono (PBIC) para entidades e um Modelo Conceitual de Apoio à Decisão (MCAD) para a seleção de métodos.

O PBIC deve focar em mitigar os principais vieses metodológicos, especialmente aqueles relacionados à amostragem de solo e medição de fluxos gasosos. Um roteiro mais detalhado encontra-se no (Quadro 7), dividida em três colunas componente, protocolo padronizado e justificativa técnica, para auxiliar profissionais / entidades na tomada de decisão.

6.2.1. Planejamento e Estratificação

Deve iniciar pela definição do domínio e escopo, ou seja, definir claramente os limites geográficos e os compartimentos de carbono a serem medidos (biomassa acima/abaixo do solo, Carbono Orgânico do Solo – SOC, CO₂ fluxos). Em seguida fazer a estratificação do sítio dividindo a área de estudo (florestas, agroecossistemas, etc.) com base em fatores ambientais (clima, topografia) e propriedades de solo (pH, textura) para garantir a representatividade da amostragem.

Quadro 7 - Protocolo base de inventário de carbono (PBIC)

Fase de Medição de Estoques (Inventário)		
Componente	Protocolo Padronizado	Justificativa Técnica
Carbono Orgânico do Solo (SOC)	Amostragem por Perfil de Solo Inteiro (ESP): Amostrar estritamente por horizontes pedogenéticos até 1 m ou profundidade de rocha-mãe.	Evita a superestimação do T-SOCS (Estoque Total de Carbono do Solo) em até 28.2% que ocorre com seções de controle fixas (SCS).
Propriedades Físicas do Solo	Medição rigorosa da Densidade Aparente (BD) e do teor de cascalho/Fração Grosseira (CF) em laboratório para cada horizonte.	BD e CF são parâmetros de entrada fundamentais que introduzem altas incertezas nas estimativas de SOCS.
Carbono da Biomassa (AGC/BGC)	Uso do Fator de Expansão de Biomassa (BEF) combinado com inventário florestal detalhado.	Aprimorar a precisão utilizando fatores de conversão ajustados por região e grupo etário/espécie local.

(continua)

Fase de Monitoramento de Fluxos (CO ₂)		
Componente	Protocolo Padronizado	Justificativa Técnica
Respiração do Solo (Re)	Câmaras Não-Estacionárias (<i>Non-Steady-State</i>): Utilizar períodos de medição breves (< 5 min) após a eliminação do ruído inicial e garantir que a câmara seja apropriadamente ventilada.	Minimiza a subestimação de fluxo causada pela alteração do gradiente de difusão de CO ₂ na câmara, um artefato que pode ser de até 15%. A ventilação evita artefatos de pressão e grandes erros.
NEE (Agroecossistemas)	Câmaras de Fluxo Contínuo (<i>Flow-through</i>) Modificadas: Implementar defletores ou arquitetura otimizada para laminar o fluxo e acelerar o estado de equilíbrio (<i>steady-state</i>).	Reduz a turbulência e o tempo para atingir o equilíbrio, aumentando a frequência e precisão das medições em culturas altas (milho).
Monitoramento Atmosférico Urbano	Estratégia de Calibração Dupla: Implementar a calibração com dois pontos (nível ambiente e alta concentração) em vez de ponto único, e estabelecer uma rede de sensores para determinar o sinal de CO ₂ de "fundo" (background).	A calibração de ponto único é a maior componente de incerteza (U_{extrap}) em medições com grandes aprimoramentos de CO ₂ urbano.

(fim do quadro)

6.2.2. Análise e Modelação

A escolha de métodos para medição, modelação e monitorização do carbono em diferentes contextos ambientais exige uma lógica decisória estruturada, baseada na relação entre critérios científicos, recursos tecnológicos disponíveis e incertezas inerentes aos sistemas ecológicos e climáticos. As decisões apresentadas refletem a necessidade de seleccionar abordagens que minimizem vieses, aumentem a precisão das estimativas e garantam a adequação metodológica às características específicas de cada ambiente.

Em primeiro lugar, observa-se que a definição dos critérios científicos é central para orientar a seleção dos métodos. Entre esses critérios destacam-se a precisão das estimativas, a representatividade espacial e temporal das medições, a validade estrutural

dos modelos e a capacidade de corrigir vieses instrumentais. Esses elementos são particularmente relevantes em sistemas onde a variabilidade climática, a heterogeneidade do solo ou a baixa produtividade biológica podem comprometer a confiabilidade dos resultados.

Além dos critérios científicos, fatores operacionais desempenham papel determinante na escolha metodológica. O custo financeiro das tecnologias, a intensidade de mão de obra necessária, a disponibilidade de dados históricos e as condições ambientais locais influenciam diretamente a viabilidade de cada abordagem. Tecnologias como LiDAR aéreo, embora altamente precisas, apresentam custos elevados, enquanto alternativas como UAVs combinados com Structure-from-Motion (SFM) oferecem equilíbrio entre precisão, frequência de aquisição e acessibilidade financeira, especialmente em inventários locais ou propriedades privadas.

A análise comparativa entre métodos evidencia diferenças estruturais importantes. Métodos de campo, como inventários tradicionais ou amostragem de solo, fornecem elevado detalhamento local, mas apresentam limitações quanto à cobertura espacial e à capacidade de capturar mudanças rápidas. Em contraste, técnicas de detecção remota multitemporal, como LandTrendr, VIIRS ou GEDI, permitem monitorar distúrbios abruptos e processos de recuperação em escalas amplas, oferecendo maior consistência temporal. De forma semelhante, a comparação entre sistemas de covariância de vórtices de caminho aberto e fechado demonstra que a escolha do instrumento deve considerar as condições ambientais: em ecossistemas quentes e áridos, o caminho aberto tende a apresentar vieses espectrais, enquanto o caminho fechado oferece maior robustez para fluxos baixos.

No âmbito da modelação, a distinção entre modelos regionais não calibrados e modelos ajustados por técnicas como EFAST e PEST revela a importância da calibração local para garantir validade estrutural e adequação à heterogeneidade climática. A incorporação de parâmetros ecofisiológicos dinâmicos permite que os modelos representem de forma mais realista a produtividade primária bruta (GPP) e o balanço líquido de carbono (NEP) ao longo do tempo.

A lógica de decisão que permeia todas essas escolhas segue um padrão consistente. Inicialmente, identifica-se o contexto ambiental ou climático em que o estudo será conduzido. Em seguida, avaliam-se os fatores de dúvida ou limitações associadas a cada método, como vieses de amostragem, custos elevados ou baixa exatidão. A partir

dessa avaliação, seleciona-se a abordagem que melhor reduz incertezas e maximiza a precisão, equilibrando custo, frequência de medição e robustez científica. Por fim, assegura-se que o método escolhido seja coerente com o objetivo do estudo, seja ele inventário nacional, monitoramento de distúrbios, modelação de longo prazo ou avaliação de sequestro geológico.

Em síntese, as decisões metodológicas relacionadas à medição e modelação de carbono são guiadas por uma lógica que integra contexto ambiental, incertezas, recursos disponíveis e objetivos científicos. Essa lógica assegura que cada técnica seja aplicada de forma estratégica, maximizando a confiabilidade das estimativas e contribuindo para uma compreensão mais precisa dos processos ecológicos e climáticos.

O Modelo Conceitual de Apoio à Decisão (MCAD) (Quadro 8) visa auxiliar técnicos e gestores ambientais em Portugal na seleção da metodologia mais robusta em cenários de incerteza, integrando as aplicações e limitações identificadas.

Quadro 8 - Modelo Conceitual de Apoio à Decisão (MCAD)

Decisão Chave	Situação/Clima/Aplicação	Fatores de Dúvida	Opção Teórica/Prática Recomendada	Foco Principal
Medição de Estoque de Solo	Solos Mediterrânicos, Inventário Nacional	Amostragem SCS é mais rápida, mas qual é o viés de SOCS?	Adotar ESP (Perfil de Solo Inteiro). Se usar SCS, compensar a superestimação e justificar o desvio.	Minimizar o viés de amostragem e a incerteza de BD.
Quantificação de Biomassa	Monitoramento de Distúrbios (Fogos Florestais)	O inventário de campo é pontual; as mudanças rápidas (<i>clear-cuts</i> , pragas) são perdidas.	Utilizar Detecção remota de Séries Temporais (ex: <i>LandTrendr</i> com dados <i>Landsat</i> /VIIRS/GEDI) para capturar dinâmicas abruptas/graduais.	Capturar a dinâmica temporal (perda e recuperação) e escalonar espacialmente.
Estoque de Carbono Florestal (Rápido/Intermediário)	Gestão de Propriedades, Inventário Local	Alto custo e intensidade de mão de obra do LiDAR aéreo.	Usar UAVs + Structure-from-Motion (SFM). A SFM produz estimativas de Densidade de Carbono Acima do Solo (ACD) comparáveis ao LiDAR em escalas de 100 a 100.000 ha.	Equilíbrio entre custo, frequência e precisão.
Modelação de Produtividade (GPP/textNEP)	Simulação Regional de Longo Prazo	A exatidão do modelo é baixa e varia espacialmente (ex: sul vs. norte de Portugal).	Exigir Análise de Sensibilidade (EFAST) e Otimização de Parâmetros (PEST) para calibrar o modelo localmente. Usar parâmetros ecofisiológicos que variam no tempo.	Garantir a validade estrutural do modelo e adaptar à heterogeneidade climática.
Medição de Fluxo em Desertos ou Baixa Produtividade	Ecossistemas de Dunas, Semi-áridos (baixo NEE)	O EC de caminho aberto (IRGASON) mostra captação de CO ₂ anormal/irrazoável.	Preferir EC de caminho fechado (EC155). Se usar IRGASON, aplicar correções específicas para efeitos espectroscópicos induzidos por temperatura/radiação.	Superar o viés de absorção do CO ₂ e obter fluxos reais.
Sequestro de Carbono Geológico (CCS) / Mineralização	Estudo de Viabilidade / Eficiência Energética	A medição de CO ₂ no subsolo (rochas) é difícil.	Utilizar Simulação Numérica Direta (DNS) ou Modelação de Rede de Poros (PN) para estimar o aprisionamento residual de CO ₂ e obter curvas de permeabilidade relativa.	Otimizar a previsão de aprisionamento residual (armazenamento de longo prazo).

6.3. Avaliação de Estoque (*Stock Assessment*)

6.3.1. Foco em Biomassa (*Acima do Solo*)

Para avaliações de grande escala, como inventários nacionais ou programas de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação, o método recomendado é o Fator de Expansão de Biomassa (BEF) combinado com inventário florestal.

Para monitoramento frequente ou avaliações em áreas menores (100–100.000 ha), o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs) com *Structure-from-Motion* (SFM) para criar Modelos de Altura do Dossel (CHM) é eficaz e sensível a pequenas perturbações.

6.3.2. Foco em Carbono do Solo (*SOC e SIC*)

Amostragem de Perfil: Para garantir o rigor e evitar a superestimação (bias) do estoque total de carbono do solo (T-SOCS), deve-se priorizar o Método do Perfil de Solo Inteiro (ESP) (por horizontes pedogenéticos) em detrimento das Seções de Controle do Solo (SCS) de incrementos fixos. O uso de SCS pode superestimar o T-SOCS em até 28.2%.

Rastreamento de *Turnover*: Para rastrear a dinâmica de carbono (C) após mudanças de uso da terra, deve-se usar a Técnica de Isótopos Estáveis ($\delta^{13}\text{C}$). Para excluir a interferência do Carbono Inorgânico do Solo (SIC) nas medições de ($\delta^{13}\text{C}$) (TC) para obter resultados precisos sobre a estabilidade do SOC.

Mapeamento em Larga Escala (DSM): Em regiões áridas ou semiáridas, a integração de Mapeamento Digital do Solo (DSM) com algoritmos de *machine learning* (*Random Forest* e *Cubist*) e dados de detecção remota (*Sentinel*) permite prever a distribuição espacial do SOC.

6.4. Avaliação de Fluxo (*Flux Assessment*)

6.4.1. Medição Direta de Trocas Gasosas (CO_2)

Respiração do Solo (Re): Utilizar câmaras não estacionárias com períodos de medição breves (≤ 5 minutos) para minimizar o artefato de subestimação (bias) causado pela alteração do gradiente de difusão de CO_2 .

NEE em Plantas Altas (Vegetação herbácea): Para evitar a turbulência e acelerar o tempo até o estado de equilíbrio, utilizar Câmaras de Fluxo Contínuo com defletores. A medição de alta frequência é essencial para manter a precisão.

NEE em Ecossistemas: O método de Covariância de Vórtices (EC) é o único que determina diretamente a troca de CO₂ da comunidade com a atmosfera. Em ecossistemas de baixa produtividade como áridos, deve-se preferir sistemas de EC de caminho fechado (*closed-path*, EC155), pois sistemas de caminho aberto (*open-path*, IRGASON) frequentemente apresentam sinal de CO₂ negativo anormal e irrazoável.

6.4.2. Modelação e Aplicações Especiais

Monitoramento Urbano (CO₂): O método mais confiável integra múltiplas abordagens, como Inventário *Bottom-up* e Inversão Atmosférica *Top-down*. A incerteza do resultado é significativamente influenciada pela definição precisa do sinal de CO₂ de "fundo" (*background*).

Modelação de Processo (GPP/NEP): Modelos biogeoquímicos como o *Biome-BGC* apresentam alta variação em termos de rigor dependendo da localização (latitudinal), do tipo de vegetação e da variável simulada (GPP ou NEP). É altamente recomendada a Análise de Sensibilidade (EFAST) e Otimização de Parâmetros (PEST) para calibrar parâmetros ecofisiológicos e melhorar a precisão em novas áreas de estudo.

A aplicação deste modelo decisório permite aos profissionais e gestores ambientais selecionar o caminho metodológico que oferece a melhor precisão e confiabilidade para o seu contexto específico, considerando as limitações e incertezas técnicas conhecidas nas fontes.

6.5. Contribuição da Framework Operacional como Auxílio aos Profissionais

A *Framework* operacional constitui um guia técnico que relaciona o objetivo da medição, a escala e o ecossistema, orientando a seleção metodológica mais adequada e reduzindo incertezas. No âmbito dos estoques, direciona para métodos consistentes com o compartimento avaliado.

Ao identificar limitações recorrentes, a *Framework* permite antecipar correções procedimentais, como a utilização de períodos curtos de medição em câmaras para minimizar perturbações no gradiente de CO₂, a substituição de sistemas de covariância de vórtices de caminho aberto em ambientes áridos devido ao sinal negativo anormal, e a remoção prévia do Carbono Inorgânico do Solo (SIC) em análises isotópicas para garantir estimativas fiáveis de turnover.

A seleção tecnológica é igualmente otimizada pela correspondência entre método e escala. Para áreas extensas, recomenda modelos baseados em satélite integrados a inversões atmosféricas; para escalas intermédias, UAVs com fotogrametria SFM, que conciliam precisão e custo; e, para medições pontuais, técnicas rápidas in situ como LIBS, reduzindo a dependência de laboratórios especializados.

A padronização promovida pela *Framework* reforça a verificabilidade dos inventários e a conformidade com diretrizes internacionais, como as do IPCC, aspecto essencial para iniciativas de créditos de carbono e para a mitigação urbana, onde a determinação rigorosa do sinal de fundo atmosférico é determinante para a credibilidade dos resultados.

Por fim apoia a modelação biogeoquímica ao reconhecer a variabilidade espacial da aplicabilidade dos modelos, estabelecendo a necessidade de análises de sensibilidade e otimização de parâmetros (EFAST e PEST) para assegurar que modelos como Biome-BGC ou DNDC sejam calibrados às condições locais e representem adequadamente os processos de sequestro e respiração do carbono.

No Tópico 3 são descritos os métodos mais usuais na mensuração da troca de carbono entre ecossistemas e atmosfera. O Tópico 5 aborda as principais limitações e dificuldades e incertezas encontradas pelos profissionais, que são relacionadas aos métodos escolhidos e também ao ambiente e procedimentos adotados. Neste Tópico 6 foram elencadas as melhores alternativas para sanar e / ou diminuir as dificuldades e incertezas citadas. Desta forma criou-se as (Tabelas 2, 3 e 4). Ainda foi possível criar uma *Framework* operacional que é um Fluxograma (Figura 18) para que profissionais tenham pelo menos um ponto de partida para tomada de decisão.

O referido Fluxograma trata-se de um roteiro robusto para a avaliação de carbono em qualquer região deve integrar métodos de medição direta, detecção remota e modelação, adaptando-os às características específicas do ecossistema e à escala de análise. Desta maneira de forma sucinta se transcreve abaixo conforme o fluxograma um roteiro para aplicações gerais. Com base nele pode-se refinar para aplicações específicas levando-se em consideração as legislações de cada país, as características geográficas, os custos e a capacidade técnica.

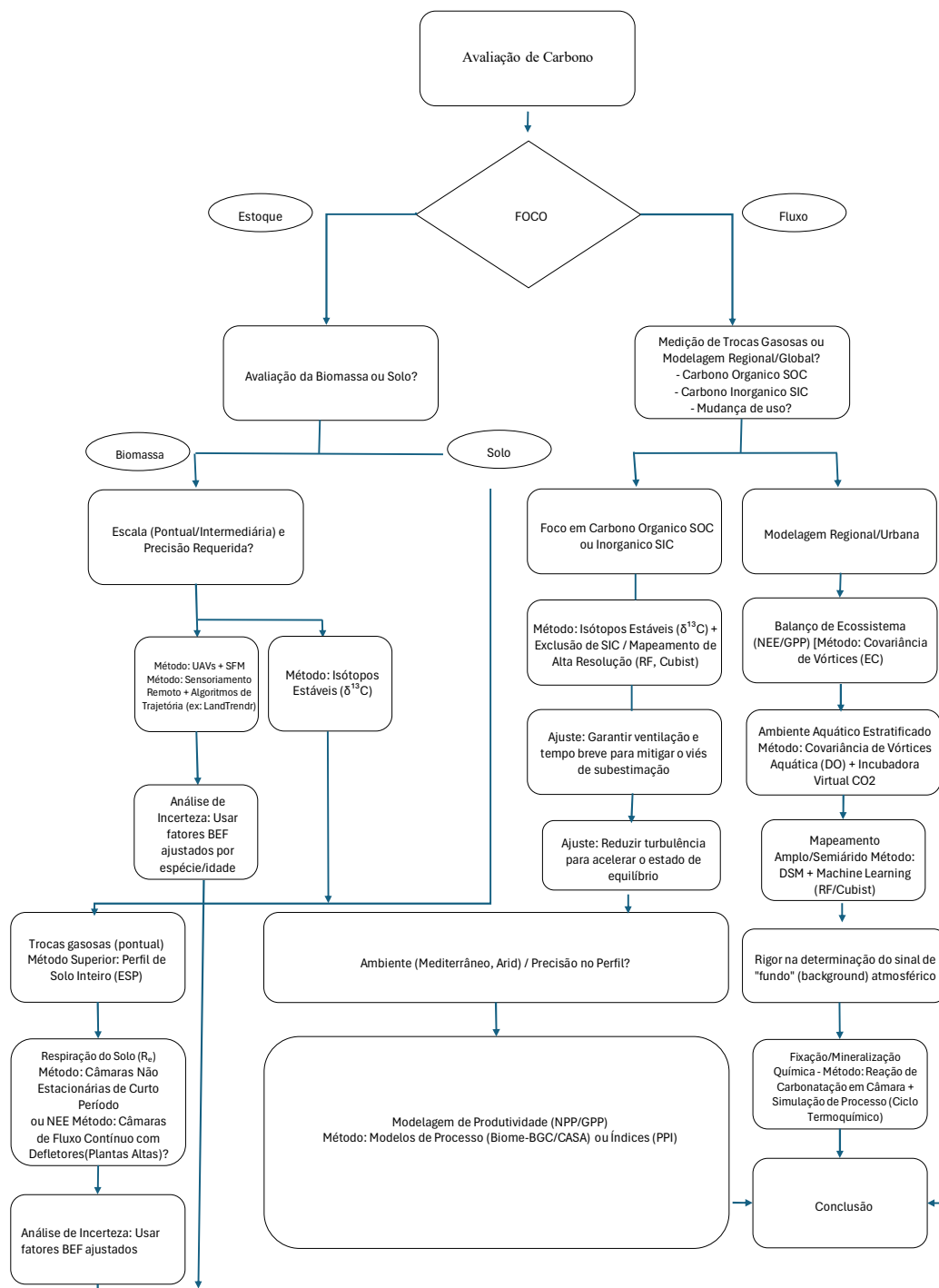


Figura 18 ; Framework operacional.

No planeamento e estratificação do sítio o primeiro passo é definir o escopo (estoque ou fluxo) e estratificar a área.

- Deve-se fazer a identificação de variabilidade dividindo a paisagem por classes de drenagem do solo, tipos de vegetação e topografia para reduzir incertezas em medições pontuais.

- Fazer o zoneamento climático e considerar variáveis meteorológicas (temperatura, precipitação e vento) que regulam as trocas de CO₂.

- Definição de fronteiras, pois no caso de áreas urbanas ou agrícolas, estabelecer "zonas de função sumidouro" e "zonas de alta emissão".

6.6. Avaliação de Estoques de Carbono (*Carbon Stocks*)

6.6.1. Carbono Orgânico do Solo (*SOC*)

- No protocolo de amostragem priorizar o método de Perfil de Solo Inteiro (ESP) por horizontes pedogenéticos em vez de seções de profundidade fixa, evitando uma superestimação do estoque total.

- Fazer a correção de massa em áreas de mudança de uso da terra, utilizar o método da massa equivalente de solo (ESM) para anular o viés causado pela compactação ou erosão do solo.

- Implementar a tecnologia LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) para determinação rápida *in-situ* da variação espacial do carbono, reduzindo custos laboratoriais.

6.6.2. Biomassa Vegetal

- Utilizar o fator de expansão de biomassa para converter o volume de madeira inventariado em biomassa total (incluindo raízes e folhas), ajustando os fatores por espécie e idade.

- Incluir medições diretas de carbono radicular subterrâneo (BRC) para aumentar a confiabilidade em ecossistemas de carbono azul em áreas de manguezais.

6.6.3. Monitoramento de Fluxos de Carbono (*Carbon Fluxes*)

- O método de Covariância de Vórtices (*Eddy Covariance* - EC) é o padrão para determinar diretamente o Intercâmbio Líquido do Ecossistema (NEE).

- Em ambientes áridos, corrigir sinais anômalos de captação de CO₂ em sistemas de caminho aberto causados por efeitos espectroscópicos induzidos pelo calor.
- Otimizar as câmaras para medições em talhões agrícolas (ex: milho), usar câmaras de fluxo contínuo com defletores para reduzir a turbulência e acelerar o estado de equilíbrio.

6.6.4. Escalonamento e Verificação Via Detecção Remota

- Escala Intermediária (100–100.000 ha): Utilizar UAVs (Drones) com fotogrametria *Structure-from-Motion* (SFM) para estimar a densidade de carbono acima do solo (ACD) com precisão comparável ao LiDAR.
- Dinâmicas históricas aplicando algoritmos baseados em trajetórias (ex: *LandTrendr*) em séries temporais *Landsat* para reconstruir o histórico de perturbações e recuperação da biomassa ao longo de décadas.
- Integrar dados de satélite de alta resolução como *Sentinel-1A* (radar) e *Sentinel-2A/3A* (multiespectral) com *machine learning* (*Random Forest* ou *Cubist*) para mapeamento digital de carbono em larga escala.

6.6.5. Modelação e Integração de Dados

Proceder a calibração de modelos e preceder a simulação em modelos como *Biome-BGC* ou *DNDC* com análises de sensibilidade (EFAST) e otimização de parâmetros (PEST) para adaptar o modelo à realidade local.

Abordagem integrada *urban/regional* combinando inventários detalhados (*bottom-up*) com inversões atmosféricas (*top-down*) para reduzir incertezas nas emissões fósseis para níveis inferiores a 10%.

Avaliação econômica incorporando o modelo de valor econômico total (TEV) para considerar o valor de mercado de produtos madeireiros, créditos de emissão e serviços de habitat.

A seleção metodológica deve ser orientada pelas características do cenário de avaliação e pelos principais fatores de incerteza associados. Em reservatórios hidrelétricos, o método de estoque por massa total mostra-se mais robusto por evitar a elevada variabilidade temporal inerente aos fluxos contínuos. Em contextos de mudança de uso da terra, o método *Equivalent Soil Mass* (ESM) corrige distorções provocadas pela compactação do solo, garantindo estimativas comparáveis entre estados contrastantes. Para florestas de alta densidade, a

combinação LiDAR/GEDI com dados VIIRS supera a saturação de sensores ópticos e permite caracterizar a estrutura vertical do dossel com maior precisão. Já em agroecossistemas específicos, o uso de câmaras de fluxo com defletores assegura medições fiáveis em culturas altas, onde o *Eddy Covariance* é limitado pela escala de aplicação.

7. APLICAÇÃO AO CONTEXTO DE PORTUGAL E NORDESTE TRANSMONTANO

7.1. Reclassificação Estrutural da Floresta Portuguesa

Portugal e particularmente o Nordeste Transmontano já dispõe de um conjunto robusto de dados florestais, pedológicos e climáticos que, quando articulados com os métodos descritos na *Framework* Operacional, permitem construir um sistema regional de monitorização de carbono alinhado às metas europeias de neutralidade climática. O cruzamento entre dados existentes, métodos adequados e obrigações legais revela condições ideais para a implementação de um projeto-piloto regional, capaz de servir como modelo replicável para outras regiões do país.

De acordo com o 6º Inventário Florestal Nacional a floresta é agrupada em dez grandes tipos principais (como Carvalho negral, Sobreiral, Pinhal bravo, Eucaliptal, entre outros), que se subdividem em 22 tipos florestais específicos de acordo com a sua densidade e altura. Detectou-se que cerca de 30% da área que o Inventário Florestal Nacional tradicionalmente classificava como sobreiro, azinheira ou pinheiro-bravo corresponde, na realidade, a formações de matagal mediterrânico com estruturas baixas e muito fechadas.

Primeiramente existem os grandes grupos divididos entre a floresta diversa que é o maior grupo identificado com (33,2%), subdividindo-se em estruturas abertas (25,3%) e fechadas (7,9%). Inclui uma grande mistura de espécies como azinheira, sobreiro, pinheiro-bravo e eucalipto. O Pinhal Bravo (*Pinus pinaster*) tem uma percentagem de 27,3% e representa uma fatia significativa, sendo que a estrutura "fechada e baixa" é a mais comum, ocupando isoladamente 15,2% da área total.

Por sua vez o Eucaliptal (*Eucalyptus spp*) ocupa uma percentagem de 16,2% e divide-se quase equitativamente entre estruturas abertas (3,7%) e fechadas (12,5%). O Sobreiral (*Quercus suber*), 9,9% é composto por povoamentos abertos (1,9%) e fechados (8,0%). Os Matagais Mediterrânicos que o estudo revelou que áreas anteriormente classificadas apenas por árvores são dominadas por arbustos, como o Esteval (7,5%), o Giestal (4,3%) e o Medronhal (0,5%). Os Carvalhais de Folha Caduca que incluem a Floresta de carvalho negral (*Quercus pyrenaica*) com 0,4% e outros carvalhos com 0,1%. E por último o Acacial (*Acacia spp*) com 0,6% sendo identificado

pela primeira vez como um tipo dominante onde esta espécie invasora se sobrepõe a pinheiros e eucaliptos.

As espécies arbóreas e arbustivas identificadas correspondem além das espécies dominantes anteriormente referidas, os estratos são classificados em árvores frequentes com Pinheiro-manso, azinheira, castanheiro, carvalho-*roble*, pinheiro-silvestre, choupos e salgueiros. Arbustos e subarbustos como esteva (*Cistus ladanifer*), giestas, tojos, urzes, medronheiro, rosmaninhos, sargaço, silvas, carqueja, carrasco e zimbros.

A reclassificação de 30% da área florestal de Portugal Continental como matagal mediterrânico deve-se, fundamentalmente, a uma mudança na metodologia de análise, que passou de uma visão bidimensional (focada apenas na espécie dominante) para uma perspectiva tridimensional. Entre os principais motivos está a análise da estrutura vertical pois tradicionalmente a floresta era classificada apenas pela espécie de árvore que dominava a cobertura. Um modelo de diversidade estrutural da vegetação (MDEV), que avalia a vegetação em sete classes de altura, permitindo identificar o que existe abaixo das copas das árvores foi utilizado. Detectou-se a dominância do estrato arbustivo com a aplicação do índice de dominância do estrato arbóreo (IDEA) que revelou que, em cerca de um terço das áreas, os arbustos têm mais "peso" ou cobertura do que as próprias árvores.

Foram ainda identificadas vastas áreas de sobreiro, azinheira e pinheiro-bravo classificadas como estruturas baixas e fechadas, ou seja, estruturas verticais muito baixas e densas, características de formações arbustivas e não de povoamentos arbóreos consolidados. Ocorreu a substituição por tipologias específicas, as áreas antes mapeadas como florestas de sobreiro ou azinheira foram identificadas como esteval (dominado por estevas) ou medronhal. Da mesma forma, partes dos pinhais-bravos foram reclassificadas como giestal, uma vez que as giestas constituem a vegetação que mais contribui para a caracterização do local, sendo o estrato arbóreo muito esparso.

7.2. Inventário Florestal Como “Verdade de Campo” na Região Norte

O Inventário Florestal Nacional (IFN), foi a metodologia que melhor representou a estrutura vegetal porque permitiu superar a visão tradicional e bidimensional da floresta, que se focava apenas na espécie de árvore dominante. A visão tridimensional possibilitou "olhar" para a floresta em três dimensões, integrando a composição florística com a

estrutura vertical da vegetação. com a avaliação por estratos em cada parcela de amostragem, avaliou-se a percentagem de cobertura de espécies em sete classes de altura distintas (desde menos de 0,5m até mais de 16m), o que permitiu quantificar o sub-bosque e os estratos arbustivos que antes eram ignorados.

Os índices de precisão foram desenvolvidos e aplicados, tais como os índices científicos como o índice de cobertura (IC), índice de altura (IA) e índice de dominância do estrato arbóreo (IDEA) que, em conjunto, formam o modelo de diversidade estrutural da vegetação (MDEV). Com uso de análise estatística avançada e através da aplicação do método estatístico *K-means* à base de dados do inventário, foi possível segregar grupos de vegetação com base na sua realidade física e biológica, revelando tipos florestais que não eram identificados pelas legendas tradicionais. O uso de uma lista de espécies facilmente identificáveis pelas equipas de campo conferiu um conhecimento mais objetivo e coerente da biodiversidade associada à floresta portuguesa.

Esta riqueza de dados permitiu descobrir, por exemplo, que áreas anteriormente classificadas apenas por árvores eram, na verdade, dominadas por matagais. Identificaram-se pela primeira vez áreas dominadas por espécies invasoras como as acácias. Essa caracterização detalhada é fundamental para entender a sequestração de CO₂, a biodiversidade e a ecologia do fogo (carga combustível e propagação).

Em contrapartida a metodologia do Inventário através de deteção remota tradicional teria dificuldade em replicar este nível de detalhe porque este método tende a captar o que é visível do topo. No entanto a visão "a duas dimensões" provou ser insuficiente, pois as áreas que parecem ser de sobreiro ou pinheiro-bravo do alto são, na realidade, dominadas por estruturas arbustivas baixas e fechadas (como esteval ou giestal) que só a análise estrutural vertical (MDEV) consegue classificar corretamente.

A metodologia incluiu a "verificação e validação dos dados no terreno", garantindo que a tipologia mapeada correspondesse fielmente à realidade biológica e fisionómica da parcela, algo que modelos puramente baseados em sensores podem estimar, mas não confirmar com o mesmo rigor. Desta maneira o inventário seria a metodologia que validaria as informações obtidas pela deteção remota, sendo então apesar do tempo e custos envolvidos, mais rica em detalhes principalmente pela abrangência das diferentes alturas da cobertura vegetal.

O Inventário Florestal Nacional (IFN) através da sua metodologia provou ser a ferramenta mais eficaz para quantificar o CO₂ na região Transmontana devido à sua

capacidade de realizar uma medição tridimensional e estratificada da biomassa. O IFN6 permitiu a quantificação de múltiplos reservatórios pois ao contrário de estimativas simples, permitiu estimar o carbono armazenado não apenas nas árvores vivas, mas também em reservatórios frequentemente ignorados como o subcoberto suobcoberto (matos), a madeira morta (em pé e no chão), a folhada (manta morta) e o solo.

Na região Transmontana, onde abundam formações como o giestal e o carvalhal, a extratificação em sete alturas permitiu distinguir a biomassa de um matagal denso da de um povoamento arbóreo esperso, o que altera drasticamente o valor final de CO₂ sequestrado. Esta ação proporcionou a correção da tipologia regional revelando que áreas do interior norte, anteriormente classificadas apenas como pinhal-bravo ou "outras folhosas", são na realidade dominadas por giestais (4,3% da área nacional, concentrados no Norte). Como os arbustos e as árvores têm taxas de sequestro e densidades de biomassa distintas, o inventário de campo evita erros de sobrestimação ou subestimação.

O uso do Modelo de Diversidade Estrutural da Vegetação (MDEV) ofereceu precisão científica e modelação que foram uma base de trabalho valiosa para quantificar o carbono retido e prever as emissões em caso de incêndio, correlacionando a carga combustível com o risco de libertação de CO₂.

No contexto urbano como no município de Bragança reforçam que a medição direta em áreas de relvado e espaços verdes urbanos, seguindo protocolos de amostragem do solo e da vegetação, é essencial para quantificar o balanço líquido de carbono em zonas de forte atividade humana. Em suma, o inventário é a melhor ferramenta porque substitui "estimativas de topo" por dados reais de campo, permitindo pesar cada "camada" da floresta transmontana separadamente.

Inclusão de fluxos laterais e produtos de madeira os métodos de inventário permitem contabilizar o carbono em produtos de madeira colhida (HWP), acompanhando o seu destino mesmo após saírem do ecossistema florestal. Esta capacidade de rastrear o carbono em produtos e o seu tempo de retenção em aterros ou edifícios é uma vantagem exclusiva que métodos atmosféricos não conseguem distinguir.

7.3. Metas e Obrigações Legais de Portugal e do Nordeste Transmontano

À semelhança do que acontece noutros países da União Europeia (EU) e de outras realidades geográficas mundiais, Portugal está sujeito a legislações diversas incluindo as de natureza ambiental. Desta forma os desafios obrigações e metas de Portugal e da região do Nordeste Transmontano relativos ao CO₂ e às alterações climáticas estão relacionadas com a geografia, incêndios, propriedades privadas e a problemáticas do solo.

A Vulnerabilidade geográfica ocorre porque Portugal situa-se na região mediterrânica e no sul da Europa, identificadas como das zonas mais vulneráveis do mundo, com previsões de redução das disponibilidades hídricas e aumento da frequência de ondas de calor. Os Incêndios florestais são uma ameaça estrutural que compromete a sustentabilidade e provoca quebras severas no sequestro líquido de carbono, como observado nos anos críticos de 2003 e 2005. Cerca de 89% da floresta é privada e a fragmentação excessiva da propriedade dificulta uma gestão ativa, resultando em áreas com gestão incipiente que são menos resilientes a riscos climáticos. E a desertificação onde aproximadamente 58% do território continental é suscetível à desertificação, o que afeta a capacidade do solo de armazenar carbono devido à perda de matéria orgânica.

A constituição da república delega ao estado a tarefa fundamental de defender a natureza e o ambiente, preservando os recursos naturais, com a floresta sendo mencionada expressamente como prioridade de desenvolvimento desde 1997. Ao nível nacional, destaca-se a Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015, que aprovou a Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas 2020 (ENAAAC 2020), reforçando a necessidade de identificar, planejar e implementar medidas de adaptação setoriais e transversais, bem como de promover a articulação entre diferentes níveis de governação. Paralelamente, a estratégia introduziu mecanismos de coordenação interinstitucional e instrumentos de monitorização contínua, assegurando maior alinhamento entre políticas públicas, ciência climática e gestão territorial., Portugal encontra-se vinculado à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas e a diversos acordos internacionais, que exigem a monitorização das emissões e a adoção de medidas de mitigação dos impactos das alterações climáticas.

No contexto das políticas climáticas europeias e nacionais, Portugal passou a alinhar os seus objetivos com o quadro regulatório definido pela Lei Europeia do Clima (Regulamento UE 2021/1119), que estabelece a meta vinculativa de neutralidade

carbónica até 2050 e a redução de pelo menos 55% das emissões de gases com efeito de estufa até 2030, relativamente aos níveis de 1990. Em consonância, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) e o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) definem metas nacionais reforçadas, incluindo a redução de 45% a 55% das emissões até 2030, a incorporação de 47% de energia renovável no consumo final bruto de energia e 80% de renováveis na produção de eletricidade até 2030. No domínio da qualidade do ar, Portugal segue as orientações da Diretiva (UE) 2016/2284 relativa à redução das emissões nacionais de certos poluentes atmosféricos (NEC), que estabelece limites progressivamente mais rigorosos para 2030, alinhados com os valores-guia da Organização Mundial da Saúde (OMS). Este conjunto de instrumentos legislativos atualizados substitui os objetivos anteriormente definidos para 2020, consolidando uma estratégia climática mais ambiciosa e coerente com os compromissos europeus de mitigação e adaptação. No contexto do nordeste transmontano e região norte ocorre o agravamento térmico e projeta-se que o aumento da temperatura média no interior norte até ao final do século. Ainda há o agravamento do risco de incêndio pois a região de Trás-os-Montes apresenta um dos maiores aumentos absolutos previstos para o risco de incêndio meteorológico (índice FWI) nos meses de verão. O sequestro urbano (Bragança) onde estudos locais na região visam quantificar fluxos de CO₂ em relvados urbanos para avaliar como a gestão de espaços verdes pode aumentar o sequestro de carbono e mitigar emissões urbanas. Expansão de espécies florestais é também de considerar pois a região é vista como uma oportunidade para aumento de habitats de carvalhais, que têm aumentado via regeneração natural, contribuindo para a diversificação da floresta e resiliência climática.

8. DISCUSSÃO GERAL E SÍNTESE DE RECOMENDAÇÕES

8.1. Análise Comparativa dos Métodos

A análise integrada dos estudos demonstra que os métodos de quantificação de carbono apresentam desempenhos distintos conforme o ecossistema, a escala de aplicação e o tipo de processo avaliado. As câmaras de respiração constituem a abordagem mais direta para medir fluxos provenientes do solo, permitindo captar a variabilidade espacial fina e a contribuição das camadas superficiais e da manta morta. Contudo, sua sensibilidade a artefactos como perturbação dos gradientes de difusão e diferenças de pressão exige protocolos rigorosos de instalação e operação, sob pena de subestimar os fluxos. Assim, embora robustas para estudos localizados, as câmaras não representam adequadamente processos ecossistêmicos integrados.

A técnica de Covariância de Vórtices (*Eddy Covariance*) complementa essa lacuna ao quantificar o intercâmbio líquido de carbono em escala de ecossistema, capturando padrões diários e sazonais. A sua capacidade de medir fluxos turbulentos em alta frequência torna-a indispensável para estudos de longo prazo. No entanto, limitações estruturais como a necessidade de áreas homogêneas e a ocorrência de fenômenos fisiológicos, como a inibição aparente da respiração diurna introduzem incertezas que requerem modelação adicional. A integração de métodos de partição, como modelos aditivos generalizados, tem-se mostrado eficaz para corrigir esses vieses, mas ainda depende de pressupostos que variam entre ecossistemas.

Em escalas regionais e globais, a detecção remota amplia significativamente a capacidade de monitorização, permitindo avaliar mudanças no uso da terra, dinâmica da biomassa e padrões atmosféricos de CO₂. Satélites como OCO-2, GOSAT e MODIS fornecem dados essenciais para inversões atmosféricas e estimativas de emissões. Apesar disso, a presença de nuvens, aerossóis e limitações dos modelos de transporte atmosférico introduzem discrepâncias, sobretudo em regiões tropicais. A validação com redes *in situ*, como a TCCON, é fundamental para reduzir esses desvios, embora a cobertura espacial limitada dessas redes impeça a correção completa das incertezas.

A quantificação de biomassa florestal apresenta forte dependência da integração entre inventários de campo, LiDAR e UAV-SFM. Inventários fornecem a “verdade de campo” necessária para calibrar modelos, mas são dispendiosos e espacialmente restritos.

O LiDAR oferece elevada precisão estrutural, embora com custos elevados, enquanto UAV-SFM surge como alternativa economicamente viável para escalas intermédias, permitindo monitorização frequente e deteção de distúrbios. Ainda assim, limitações de georreferenciação e dependência de modelos digitais de terreno precisos podem comprometer a exatidão em áreas complexas.

No que se refere ao carbono do solo, a comparação entre métodos evidencia que a escolha do protocolo de amostragem é determinante para a precisão dos estoques. O Perfil de Solo Inteiro (ESP) evita a mistura de horizontes e reduz a superestimação observada nas Seções de Controle (SCS), que podem inflacionar os valores em mais de 28%. Tecnologias analíticas como MIRS, LIBS e isótopos estáveis ampliam a capacidade de caracterização, mas exigem calibração rigorosa e conhecimento especializado para interpretação dos resultados.

Por fim, abordagens integradas *bottom-up* e *top-down*, como as utilizadas em megacidades, demonstram que a combinação de inventários detalhados com medições atmosféricas contínuas é a estratégia mais eficaz para reduzir incertezas. Projetos como o *LA Megacity Carbon Project* evidenciam que a determinação do sinal de fundo atmosférico permanece o principal desafio, sendo responsável pela maior parcela da incerteza total.

Em síntese, nenhum método é universalmente superior. A robustez das estimativas depende da combinação estratégica de técnicas complementares, da padronização dos protocolos e da integração entre medições diretas, deteção remota e modelação. Essa abordagem híbrida é essencial para capturar a complexidade dos fluxos e estoques de carbono em diferentes ecossistemas e escalas.

8.2. Recomendações para Melhoria das Práticas de Sequestro

A melhoria das práticas de sequestro e redução de emissões de carbono requerem uma abordagem multifacetada que englobe inovação tecnológica na captura industrial, otimização da gestão dos sumidouros naturais (solos e florestas) e aprimoramento dos métodos de monitoramento e contabilização.

A inovação tecnológica em captura e utilização de carbono pode acontecer através do investimento e a implementação de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) que minimizem o consumo energético e capital. Também da adoção da mineralização integrada (IAM) priorizando o processo de

absorção-mineralização integrada (IAM) para a captura de carbono em indústrias, substituindo a regeneração térmica tradicional por métodos químicos. Este processo proporciona uma grande redução na penalidade energética e elimina a necessidade de compressão e transporte de carbono para armazenamento geológico.

Otimização da gestão terrestre e florestal para aumentar o sequestro de carbono nos ecossistemas naturais e reduzir perdas, devem ser implementadas as seguintes práticas de gestão:

- Gestão de solos para sequestro de carbono com a implementação de práticas de melhoria da gestão do solo, como o plantio direto/reduzido (reduced tillage) e o uso de fertilização adequada, para reverter as perdas de carbono orgânico do Solo (SOC) causadas pela oxidação e erosão. É essencial reconhecer que a erosão hídrica acelera significativamente a remoção de SOC.
- Restauração e silvicultura resiliente nas áreas florestais, priorizar a criação de florestas estáveis e próximas da natureza, utilizando espécies para aumentar a resistência a distúrbios e promover a acumulação gradual de biomassa. Favorecer o uso de procedências locais que demonstrem adaptação genética e sobrevivência sob estresse, como a procedência Istebna para o abeto-da-noruega.
- Contenção da erosão no uso da terra e desenvolver modelos que incorporem explicitamente a ligação entre a erosão do solo e a dinâmica do carbono para restringir melhor os fluxos de carbono terra-atmosfera e terra-oceano, reconhecendo que a alteração do uso da terra é o principal motor da erosão acelerada.

Aprimoramento da medição, monitoramento e contabilização a precisão e a rastreabilidade dos dados são fundamentais para a eficácia das políticas de mitigação. Harmonizar e padronizar as técnicas de amostragem de carbono orgânico do solo (SOCS) globalmente. Recomenda-se o uso do método de amostragem por horizonte pedogênico (ESP) em detrimento das seções de controle de solo (SCS), pois o último pode levar à mistura de materiais e à sobre-estimação do SOCS.

Estabelecimento de redes de monitoramento de gases de efeito estufa (GEE) robustas e contínuas em áreas urbanas, utilizando abordagens *top-down* (observações atmosféricas) e *bottom-up* (inventários), para quantificar fluxos, verificar inventários de

emissões e detectar eventos episódicos (como vazamentos de gás e incêndios). Adicionalmente, as redes de monitoramento devem transicionar para uma estratégia de calibração de dois pontos para maior precisão.

Uso de tecnologias de sensoriamento avançado utilizando sistemas aéreos não tripulados (UAV) combinados com fotogrametria *Structure-from-Motion* (SFM) para monitoramento frequente e de baixo custo da densidade de carbono acima do solo (ACD) em escalas intermediárias (100–100.000 ha). Além disso, empregar espectroscopia de Infravermelho Médio (MIR) e modelos Random Forest para mapeamento espacial rápido e preciso do SOC.

Garantir a contabilização consistente e explícita de todos os fluxos de carbono, incluindo os fluxos laterais (produtos de madeira e culturas, pastoreio) e as emissões de compostos de carbono reduzido (monóxido de carbono, CO; e compostos orgânicos voláteis, VOC). Adotar uma abordagem para reduzir a incerteza na estimativa de fluxos regionais, progredindo de fatores de emissão globais para dados calibrados localmente.

Na exclusão de (SIC) na Análise Isotópica, recomenda – se para uma estimativa precisa da estabilidade de renovação (turnover) do SOC usando o método $\delta^{13}\text{C}$, a interferência do Carbono Inorgânico do Solo (SIC) deve ser excluída da medição. Novas metodologias devem ser desenvolvidas para quantificar diferentes componentes de SIC.

Melhoria da calibração e precisão de fluxo pois para redes de monitoramento contínuo, a incerteza do método de calibração de ponto único (Uextrap) é o maior componente do erro de medição. A transição para uma estratégia de calibração de dois pontos, utilizando tanques padrão de alta concentração, é necessária para reduzir a incerteza.

Aplicação de modelos biogeoquímicos como o Biome-BGC deve ser precedida por uma análise de sensibilidade de parâmetros e otimização para a região e variável de saída específicas. É crucial modificar os parâmetros estáticos para séries de valores que variam com o tempo (mês, estação ou período fenológico) para resolver a incompatibilidade de mecanismo e resolução temporal.

Mais estudos são necessários para resolver a contradição entre as observações de EC de caminho aberto e outros métodos em ecossistemas desérticos. A Integração de métodos para avaliação abrangente em ambientes urbanos exige algoritmo de seleção de fundo mais sofisticado sendo necessário para determinar o fundo atmosférico, levando em consideração a meteorologia e a origem das massas de ar. Na contabilidade de carbono

florestal em programas de reflorestamento, é importante incluir arbustos e ervas para evitar subestimação da densidade de carbono.

Nos sistemas de câmaras de fluxo contínuo, futuros esforços devem se concentrar em melhorar os mecanismos de controle ambiental (Temperatura e Umidade) e otimizar a arquitetura interna para homogeneizar o gás e acelerar o equilíbrio.

As incertezas nas emissões de GEE associadas à produção, armazenamento e transporte de resíduos orgânicos são extremamente altas. Contudo a modelação deve ser aprimorada para incluir submodelos de compostagem e digestão anaeróbica para prever com mais precisão as emissões com base nas características dos insumos.

A aplicação das metodologias de mensuração de carbono na realidade de Portugal, deve seguir protocolos rigorosos de padronização e rotinas técnicas para mitigar as incertezas observadas nos estudos e garantir a comparabilidade dos resultados. Portugal possui ecossistemas diversos tais como florestas mediterrânicas, agroecossistemas, áreas costeiras e montanhosas. A heterogeneidade dos solos mediterrânicos e a influência da Densidade Aparente (BD) e da Fração Grosseira (CF) exigem métodos de amostragem que reflitam as propriedades naturais do solo.

Portanto são sugeridos protocolos técnicos e práticas que permitam a implementação das metodologias de mensuração de carbono, desenhados para responder às limitações científicas identificadas nos artigos, para a realidade de Portugal.

8.3. Combinações mais Eficazes Identificadas nos Estudos para Otimizar a Precisão e Quantificar as Incertezas

Inventários de alta resolução (*Bottom-up*) + Inversão atmosférica (*Top-down*), esta combinação é considerada a mais robusta para monitoramento em escala urbana e regional. O inventário detalhado (como o sistema *Hestia*) quantifica as emissões por setor e localização específica, enquanto a inversão atmosférica utiliza redes de torres de fluxo e sensores *in situ* para medir o aumento real de CO₂ na atmosfera. A análise de incertezas ocorre com a aplicação conjunta destes métodos, por exemplo, no projeto INFLUX demonstrou que é possível reduzir a incerteza das emissões para menos de 10% (chegando a 7%), um nível necessário para validar políticas de mitigação. O método atmosférico atua como um verificador independente que pode detectar fontes não contabilizadas no inventário, enquanto o inventário fornece o "fluxo a priori" necessário para calibrar os modelos de transporte da inversão.

Já a detecção remota por satélite + modelação de inversão global sendo utilizados para escalas globais ou regiões onde as redes de observação terrestre são escassas (como África e Amazônia), demonstrou-se eficaz, pois a combinação de dados orbitais com sistemas de assimilação é a mais indicada. Utilizam-se produtos de satélite (GOSAT ACOS v9 ou OCO-2) integrados em sistemas como o GCASv2. Para a análise de incertezas adota-se o uso de dados de satélite que permite preencher lacunas espaciais imensas deixadas pelas estações de solo. As incertezas são avaliadas comparando-se as concentrações de CO₂ simuladas a posteriori contra medições independentes de aeronaves (como os projetos CONTRAIL e HIPPO) e frascos de superfície. Esta validação cruzada confirmou que a assimilação de dados de satélite melhora significativamente as estimativas do fluxo líquido ecossistêmico (NEE) em áreas tropicais e de alta latitude.

A covariância de vórtices (*Eddy Covariance* - EC) + medições por câmaras é uma combinação ideal para validar fluxos ao nível do sítio ou talhão e entender a variabilidade espacial dentro de um ecossistema. O EC fornece uma medição integrada e contínua das trocas de CO₂ de toda a comunidade, enquanto as câmaras medem fluxos específicos do solo ou da serapilheira. A comparação entre ambos permite analisar a escala de variação dentro do *footprint* (área de influência) da torre. Por exemplo, medições com câmaras podem revelar que solos com diferentes drenagens apresentam taxas de respiração que variam por um fator de 2, permitindo ajustar a extrapolação espacial dos dados da torre e mitigar erros sistemáticos de subestimação.

A Fusão de dados-modelo (*Data-Model Fusion*) permite uma integração de observações *in situ* com modelos biogeoquímicos de processo (como DNDC ou Biome-BGC) é essencial para relatórios de nível Tier 3. Dados de torres de fluxo e câmaras são usados para calibrar os parâmetros ecofisiológicos dos modelos através de ferramentas de otimização como o PEST. Esta técnica permite quantificar a sensibilidade dos parâmetros (usando métodos como EFAST) e reduzir a incerteza na simulação da produtividade primária bruta (GPP) e do intercâmbio líquido do ecossistema (NEE). O estudo do modelo Biome-BGC na China mostrou que a otimização de parâmetros pode elevar o coeficiente de determinação (R^2) de fluxos de 0.38 para 0.81, tornando as previsões significativamente mais confiáveis.

Combinações específicas para ambientes aquáticos em reservatórios e lagos, como a utilização da Covariância de Vórtices Aquática e o método da Incubadora Virtual. O método da incubadora virtual permite estimar o fluxo de CO₂ na interface sedimento-água

sem perturbar o ambiente *in situ*, preservando a hidrodinâmica natural. A combinação desses dados com medições da estrutura térmica (estratificação) permite decompor a variação dos fluxos em tendências de longo prazo e variações de impulso causadas por eventos extremos, aumentando a precisão da contabilidade anual.

8.4. Benefícios da Utilização da *Framework* Operacional e do Modelo de Decisão Sugeridos

Órgãos ambientais, municípios, empresas agrícolas e o setor florestal podem aproveitar o framework operacional e o modelo de decisão propostos para aumentar a precisão das medições, garantir a viabilidade econômica de projetos de sequestro e fundamentar políticas públicas baseadas em evidências.

Os órgãos ambientais e governança podem beneficiar-se da Framework para fazer a verificação de créditos de carbono pois ela permite uma validação robusta de programas de pagamento por serviços ecossistêmicos (PES) e REDD+, assegurando que o carbono comercializado corresponda a estoques reais e verificáveis. Pode-se também optar pela adoção de modelos biogeoquímicos calibrados (como DNDC ou Biome-BGC), nos inventários nacionais de GEE (Tier 3), permite que as entidades governamentais evoluam para metodologias de Nível 3, reduzindo as incertezas nos relatórios nacionais de emissões. Ainda é possível promover a fiscalização e proteção em tempo real com o uso de UAVs (drones) de baixo custo, integrados a modelos de decisão, facilita a detecção de atividades ilegais e a monitorização de vastas áreas rurais com custos reduzidos de execução.

Já os municípios e o planejamento urbano podem utilizá-la para promover o zoneamento para neutralidade carbônica onde os gestores municipais podem utilizar o modelo de decisão para dividir o território em zonas de função sumidouro e zonas de otimização de alta emissão, direcionando políticas de desenvolvimento de baixo carbono de forma localizada. Mitigação de Ilhas de Calor e Qualidade do Ar, pois o monitoramento contínuo sugerido permite avaliar como a perda de cobertura vegetal impacta o aumento da temperatura superficial e o efeito de ilha de calor urbana (UHI), orientando projetos de arborização urbana. Fazer ainda a gestão de resíduos e biomassa, já que a *Framework* auxilia na simulação de cenários para a reciclagem regional de resíduos orgânicos na agricultura urbana e peri-urbana, avaliando os *trade offs* entre armazenamento de carbono no solo e emissões de transporte.

As empresas agrícolas por sua vez, podem fazer a gestão de nutrientes específica ao Local (SSNM-IPNS), este modelo permite otimizar a aplicação integrada de nutrientes orgânicos e inorgânicos, o que comprovadamente aumenta o Carbono Orgânico Total (TOC) do solo e melhora a sua fertilidade a longo prazo. Sendo possível ainda Redução de Emissões de Nitrogénio com a aplicação de protocolos de monitorização rigorosos ajuda a identificar hotspots de lixiviação de nitratos e volatilização de amoníaco, permitindo ajustes nas práticas de fertilização para reduzir a pegada de gases de efeito estufa. Promover ainda obter Análises Rápidas *in situ*, pois Tecnologias como a LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) podem ser integradas nas rotinas das empresas para o mapeamento tridimensional de carbono no solo em tempo real, reduzindo drasticamente os custos laboratoriais.

No setor florestal pode-se fazer o uso do método BEF e de modelos de crescimento (como Gompertz) que proporcionam uma visão da otimização da fixação de carbono e auxilia gestores florestais a selecionar espécies e gerir povoamentos mais jovens que possuem maiores taxas de eficiência na fixação de carbono. Na monitorização de distúrbios e recuperação tendo em vista que algoritmos de trajetória baseados em satélite (*LandTrendr*) permitem ao setor florestal rastrear a história de distúrbios (fogos, pragas) e a taxa de regeneração anual com alta resolução temporal. Na integração do ciclo de vida do produto pois a *Framework* propõe a contabilização do carbono não apenas na biomassa viva, mas também em produtos de madeira colhida (HWP), incentivando a criação de produtos com maior tempo de retenção para maximizar o valor total do ativo florestal.

Para melhor ilustrar a correlação entre a revisão da literatura, bem como as lacunas e incertezas com as alternativas encontradas para saná-las foi criada a (Quadro - 10). Nela estão relacionados todos os métodos e de forma mais didática cada coluna contempla um tópico deste trabalho, tornando-se mais “digestivo” para o leitor.

Quadro 9 – Síntese

	Método	Escala	Precisão	Custo	Ecossistema	Incertezas	Método alternativo	Solução / Correção Recomendada
1	Eddy Covariance	Larga escala	Permite estimar fluxos verticais de vapor d'água (FET) e CO ₂ (Fc) a partir da covariância entre a velocidade vertical do vento e as concentrações de gases	Elevado	Terrestre e aquático	Sinal negativo anormal em desertos; Superestimação do sequestro; Requer manutenção e filtragem rigorosa; Sensibilidade a temperatura e umidade.	Câmaras flutuantes e técnicas de camada limite fina	Preferir EC fechado; aplicar correções espectroscópicas; Calibração frequente; correção de densidade.
2	Câmara	Pequena	Depende fortemente do tipo de sistema e do instrumento de detecção utilizado	Acessível	Terrestre, agrícola, aquático	A estratificação térmica em reservatórios pode levar à subestimação do quociente respiratório (RQ), reforçando a necessidade de métodos adaptados às condições hidrodinâmicas. Diferenças de pressão podem forçar a passagem de CO ₂ e gerar erros de leitura; Perturbação do gradiente de CO ₂ ; subestimação Re em camaras estacionarias	Eddy covariance	Instalar defletores de fluxo; otimizar arquitetura da câmara; Implementar calibração com dois pontos; Medições <5 min; ventilação adequada; randomização da ordem
3	Estoque de Carbono no Solo COS	Regional, nacional e / ou global	Depende da precisão do protocolo	De acordo com o método	A dinâmica do carbono no solo é fortemente influenciada pelas características ecológicas e pedológicas de cada ambiente	Diferenças entre os métodos ESP e SCS; Superestimação do SCS em até 28,2%. Trabalho intensivo; exige pedogenia; Variabilidade vertical do solo. Mistura de horizontes; baixa representatividade no SCS.	Sensoriamento remoto	Utilizar método ESP Amostragem por perfil de solo inteiro; Evitar SCS; se usar, aplicar correção e justificar desvio; Se usar SCS, compensar a superestimação e justificar o desvio.

(continua)

	Método	Escala	Precisão	Custo	Ecossistema	Incertezas	Método alternativo	Solução / Correção Recomendação
4	Inventário de Campo e Equações alométricas	Multiescala	Equações específicas por espécie tendem a apresentar maior acurácia	Baixo	Depende diretamente da adequação das equações alométricas ao tipo de vegetação analisada	Variabilidade espacial e etária; erros de conversão. Alto custo; necessidade de modelos específicos por espécie; Determinação do background urbano.	UAV	Usar BEF ajustado por região e grupo etário; integrar inventário detalhado; Usar redes CRDS; calibração dupla; sites extra-urbanos
5	Tecnologias em Detecção remota	Regional e Global	Ainda depende de condições meteorológicas	Econômico	Florestas tropicais, temperadas, Áridos, Bacias hidrográficas e controle de queimadas	Nos trópicos, fatores como cobertura de nuvens, aerossóis e limitações nos modelos de transporte contribuem para discrepâncias significativas entre satélites e medições <i>in situ</i> . Impossibilidade de caracterização a vegetação do sub-bosque. Superestimação da biomassa. Georreferenciação limitada; mão de obra intensiva	Medições <i>in situ</i> . Inventário florestal	Usar GCPs de alta precisão; aumentar densidade de pontos; calibração rigorosa
6	Modelos Biogeoquímicos e Dinâmicos	Regional e Global	Modelos de aprendizado de máquina, como Random Forest, GLM, Krigagem Ordinária e BRT, aumentam a precisão na estimativa do COS	Variáveis	Adaptável a diversos ecossistemas inclusive áreas urbanas	Incertezas nos parâmetros, escassez de dados de CO ₂ em algumas regiões e ausência de representação de certos ecossistemas podem comprometer a precisão das simulações como Baixa acurácia em ecossistemas semiáridos; Subestimação da GPP; Parâmetros estáticos; baixa aplicabilidade espacial; Erros estruturais do modelo; Necessidade de muitos dados de campo no RANDOM Forest; R ² varia com preditores	Sensoriamento remoto	Usar PPI; ajustar parâmetros ecofisiológicos locais; Aplicar EFAST + PEST; usar parâmetros variáveis no tempo; Usar DEM derivados; integrar Sentinel-1/2/3; validação cruzada

(fim do quadro)

A seleção de métodos para quantificação de fluxos, estoques e dinâmicas de carbono depende de um conjunto de critérios que incluem escala de aplicação, precisão esperada, custo operacional, adequação ao ecossistema e incertezas inerentes a cada técnica. A tabela sintetiza essas decisões, evidenciando que a escolha metodológica não é arbitrária, mas resulta de uma avaliação integrada entre limitações instrumentais, características ambientais e objetivos científicos.

Os métodos de fluxo atmosférico, como o Eddy covariance, operam em larga escala e fornecem estimativas contínuas de trocas verticais de CO₂ e vapor d'água. Apesar da elevada precisão, apresentam custos elevados e são sensíveis a condições ambientais extremas, especialmente em ecossistemas áridos, onde podem ocorrer sinais negativos anômalos. Nesses casos, recomenda-se o uso de sistemas de caminho fechado e a aplicação de correções espectroscópicas, complementando com métodos alternativos como câmaras flutuantes.

As câmaras de fluxo, por sua vez, constituem métodos de pequena escala, acessíveis e amplamente utilizados em ambientes terrestres, agrícolas e aquáticos. Contudo, sua precisão depende fortemente da arquitetura da câmara e das condições hidrodinâmicas do ambiente, podendo ocorrer perturbações no gradiente de CO₂ ou erros associados à estratificação térmica. Recomenda-se otimizar o desenho das câmaras, reduzir o tempo de medição e adotar calibração rigorosa.

No caso da quantificação de carbono no solo, a escolha entre métodos de amostragem SCS e ESP é determinante para a precisão das estimativas. O método SCS, embora mais rápido, tende a superestimar o estoque de carbono em até 28,2%, devido à mistura de horizontes e baixa representatividade vertical. Assim, o método ESP é recomendado como abordagem padrão, especialmente em inventários nacionais e estudos pedogenéticos.

Os inventários de campo e as equações alométricas continuam essenciais para estimar biomassa e carbono acima do solo, mas sua precisão depende da adequação das equações ao tipo de vegetação e da variabilidade espacial e etária das espécies. A integração com tecnologias de UAV e fatores de expansão de biomassa ajustados por região aumenta a confiabilidade das estimativas.

As tecnologias de detecção remota, aplicadas em escalas regionais e globais, oferecem vantagens em termos de custo e cobertura espacial, mas enfrentam limitações relacionadas à meteorologia, cobertura de nuvens e georreferenciação. Em florestas

tropicais, essas limitações podem levar à superestimação da biomassa, sendo necessária a utilização de pontos de controlo de alta precisão e calibração rigorosa.

Por fim, os modelos biogeoquímicos e dinâmicos, incluindo algoritmos de aprendizado de máquina, ampliam a capacidade de simulação em múltiplas escalas, mas dependem fortemente da qualidade dos dados de entrada e da calibração dos parâmetros ecofisiológicos. Incertezas estruturais, baixa acurácia em ecossistemas semiáridos e necessidade de grande volume de dados de campo são desafios recorrentes. Recomenda-se a aplicação de técnicas de análise de sensibilidade (EFAST), otimização de parâmetros (PEST) e integração de dados de sensores orbitais (Sentinel 1/2/3).

Em síntese, o quadro evidencia que a lógica de decisão entre métodos é guiada por uma avaliação equilibrada entre escala, precisão, custo, ecossistema e incertezas, privilegiando abordagens que maximizam a representatividade e minimizam vieses. A adoção de soluções corretivas e métodos alternativos é parte essencial dessa lógica, garantindo maior robustez às estimativas de carbono em diferentes contextos ambientais.

9. CONCLUSÕES

A aplicação rigorosa do PRISMA permitiu identificar e classificar os principais métodos *bottom-up* e *top-down* presentes na literatura recente, revelando a diversidade de abordagens e a necessidade de integração entre técnicas para captar a complexidade dos fluxos e estoques de carbono. A análise das aplicações práticas demonstrou que a adequação metodológica depende do ecossistema, da escala espacial e das condições socioeconómicas, destacando a importância de estratégias adaptadas ao contexto.

A avaliação crítica das limitações e incertezas mostrou que nenhum método é suficiente por si só, sendo indispensável a combinação de medições diretas, deteção remota e modelação. A comparação entre escalas geográficas evidenciou que as incertezas aumentam à medida que se avança para níveis regionais e globais, reforçando a necessidade de validação cruzada e padronização de protocolos. As ferramentas operacionais desenvolvidas incluindo a framework metodológica, o Protocolo Base de Inventário de Carbono (PBIC) e o Modelo Conceptual de Apoio à Decisão (MCAD) constituem contributos aplicáveis ao contexto português, oferecendo suporte técnico para profissionais e entidades envolvidas na monitorização de carbono.

Os contributos-chave desta dissertação são três: a sistematização inédita dos métodos de quantificação de carbono, integrando abordagens *bottom-up* e *top-down* sob um quadro comparativo robusto, com base em 131 estudos selecionados via PRISMA. A Identificação das principais fontes de incerteza e limitações metodológicas, oferecendo uma leitura crítica que orienta a seleção de técnicas conforme o ecossistema, a escala e os objetivos de monitorização. E ainda a proposição de ferramentas operacionais adaptadas ao contexto português, incluindo o PBIC e o MCAD, que contribuem para a padronização, melhoria da qualidade dos dados e apoio à tomada de decisão em políticas climáticas.

Os resultados obtidos apontam para a necessidade de aprofundar a integração entre métodos e de validar empiricamente as combinações mais eficazes. Assim, propõe-se como agenda de investigação para futuros trabalhos:

A validação híbrida *bottom-up/top-down* em Portugal, integrando inventários de campo, UAV-SFM, LiDAR, redes atmosféricas e dados satelitais, com foco em florestas do Norte e sistemas agroflorestais. O desenvolvimento de modelos regionais calibrados com dados nacionais, reduzindo a dependência de parametrizações internacionais e

aumentando a precisão das estimativas de carbono. A avaliação longitudinal de práticas de gestão e restauro, monitorizando a resposta temporal dos ecossistemas e a eficácia das intervenções de sequestro. E ainda a expansão de redes de medição *in situ*, incluindo sensores de baixo custo e estações automáticas, para melhorar a resolução espacial e temporal dos fluxos de CO₂.

Em síntese, esta dissertação demonstra que a quantificação rigorosa do carbono exige abordagens integradas, protocolos padronizados e articulação entre ciência e gestão. Ao consolidar conhecimento disperso e propor instrumentos aplicáveis à realidade portuguesa, este trabalho contribui para o avanço das práticas de monitorização e para o fortalecimento das estratégias nacionais de mitigação climática.

A combinação de diferentes abordagens, como o uso de dados de satélite validados por redes *in situ*, ou o emprego de UAV para complementar o LiDAR e inventários de campo, é essencial para superar as limitações de cada técnica individual e para alcançar uma compreensão mais robusta e precisa dos complexos fluxos e estoques de carbono em ecossistemas terrestres e urbanos. O aprimoramento contínuo das metodologias e a padronização dos protocolos de amostragem são essenciais para reduzir incertezas e fornecer dados confiáveis para a gestão ambiental e as políticas climáticas globais.

BIBLIOGRAFIA

- Bernardo, J. W. Y., Mannich, M., Hilgert, S., Fernandes, C. V. S., & Bleninger, T. (2017). **A method for the assessment of long-term changes in carbon stock by construction of a hydropower reservoir.** *Ambio*, 46(5), 566-577.
- Chuvieco, E., Yue, C., Heil, A., Mouillot, F., Alonso-Canas, I., Padilla, M., Pereira, J. M., Oom, D., & Tansey, K. (2016). **A new global burned area product for climate assessment of fire impacts.** *Global Ecology and Biogeography*, 25(5), 619–629.
- Crow, S. E., Reeves, M., Turn, S., Taniguchi, S., Schubert, O. S., & Koch, N. (2016). **Carbon balance implications of land use change from pasture to managed eucalyptus forest in Hawaii.** *Carbon Management*, 7(3-4), 171-181.
- Crowell, S., Baker, D., Schuh, A., Basu, S., Jacobson, A. R., Chevallier, F., Liu, J., Deng, F., Feng, L., McKain, K., Chatterjee, A., Miller, J. R., Stephens, B. B., Eldering, A., Crisp, D., Schimel, D., Nassar, R., O'Dell, C. W., Oda, T., Sweeney, C., Palmer, P. I., & Jones, D. B. A. (2019). The 2015–2016 **carbon cycle as seen from OCO-2 and the global in situ network.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 9797–9831. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9797-2019>
- Davidson, E. A., Savage, K., Verchot, L. V., & Navarro, R. (2002). **Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration.** *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1), 21–37. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00100-](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00100-)
- Deng, X., Chen, X., Ma, W., Ren, Z., Zhang, M., Grieneisen, M. L., ... & Lv, X. (2018). **Baseline map of organic carbon stock in farmland topsoil in East China.** *Agriculture, ecosystems & environment*, 254, 213-223.
- Dwivedi, V., Ahokas, J., Viljanen, J., Ryzkowski, P., Shurpali, N. J., Bhattarai, H. R., ... & Toivonen, J. (2023). **Optical assessment of the spatial variation in total soil carbon using laser-induced breakdown spectroscopy.** *Geoderma*, 436, 116550.
- Fang, M., Liu, W., Zhang, J., Ma, J., Liang, Z., & Yu, Q. (2024). **Quantitative evaluation of the applicability of classical forest ecosystem carbon cycle models in China: a case study of the Biome-BGC Model.** *Forests*, 15(9), 1609.
- Fidelis, J. R. F., Barbosa, R. R., dos Santos, R. N. M., & Kobashi, N. Y. (2009). **Bibliometria, cientometria, infometria: conceitos e aplicações.** *Tendências da Pesquisa brasileira em Ciência da Informação*, 2(1).
- Fonseca, R., & Francis, D. (2024). **Satellite derived trends and variability of CO₂ concentrations in the Middle East during 2014–2023.** *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1289142.
- Gao, X., Zhang, Y., Sun, B., & Liu, X. (2024). **Sediment respiration dynamics and its contribution to carbon emissions in stratified reservoirs.** *Journal of Environmental Management*, 349, 119472.
- Ji, Q., Jiang, H., Xu, Z., Zhu, M., Zhang, S., Wang, H., Tang, Z., Wang, Q., & Wang, W. (2025). Farmland Afforestation by Poplar Shelterbelts Increased Soil Inorganic Carbon but Showed Ambiguous Effects on Soil Organic Carbon as Revealed by Carbon Isotopic Composition: Inter-Fraction and Inter-Site Differences in Northern China. *Forests*, 16(2), 328. <https://doi.org/10.3390/f16020328>

- Jiang, F., Ju, W., He, W., Wu, M., Wang, H., Wang, J., ... & Chen, J. M. (2022). **A ten-year global monthly averaged terrestrial NEE inferred from the ACOS GOSAT v9 XCO₂ retrievals (GCAS2021)**. *Earth System Science Data Discussions*, 2022, 1-38.
- Jung, C. G., & Kim, S. J. (2018). **Assessment of the water cycle impact by the Budyko curve on watershed hydrology using SWAT and CO₂ concentrations derived from Terra MODIS GPP**. *Ecological Engineering*, 118, 179-190.
- Karimi Takalo, S., Sayyadi Tooranloo, H., & Shahabaldini parizi, Z. (2021). Green innovation: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 279, 122474. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122474>
- Keenan, T. F., Migliavacca, M., Papale, D., Baldocchi, D., Reichstein, M., Torn, M., & Wutzler, T. (2016). **Widespread inhibition of daytime ecosystem**. *Nature Ecology & Evolution*, 1(1), 0809. <https://doi.org/10.1038/natrecol.2016.809>
- King, A. W., Andres, R. J., Davis, K. J., Hafer, M., Hayes, D. J., Huntzinger, D. N., ... & Woodall, C. W. (2015). **North America's net terrestrial CO₂ exchange with the atmosphere 1990–2009**. *Biogeosciences*, 12(2), 399-414.
- Kohanpur, A. H., Chen, Y., & Valocchi, A. J. (2022). **Using direct numerical simulation of pore-level events to improve pore-network models for prediction of residual trapping of CO₂**. *Frontiers in Water*, 3, 710160.
- Li, G., Xiao, K., Wang, Q., Zhang, Y., Li, H., & Li, H. (2023). **The regulating role of meteorology in the wetland-air CO₂ fluxes at the largest shallow grass-type lake on the north China plain**. *Water*, 15(1), 139.
- Li, X., Ding, J., Liu, J., Ge, X., & Zhang, J. (2021). **Digital mapping of soil organic carbon using sentinel series data: a case study of the Ebinur lake watershed in Xinjiang**. *Remote Sensing*, 13(4), 769.
- Li, X., Mao, F., Du, H., Zhou, G., Xu, X., Han, N., ... & Chen, L. (2017). **Assimilating leaf area index of three typical types of subtropical forest in China from MODIS time series data based on the integrated ensemble Kalman filter and PROSAIL model**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 68-78.
- Li, Z., Wen, D., Wang, B., & Li, N. (2024). **Partitioned Simulation of Land Use Change Based on Carbon Neutrality Zoning and Its Multiscale Effect on Carbon Emissions in the Xia–Zhang–Quan Metropolitan Circle, China**. *Sustainability*, 16(13), 5560.
- Lugato, E., Zuliani, M., Alberti, G., Delle Vedove, G., Gioli, B., Miglietta, F., & Peressotti, A. (2010). **Application of DNDC biogeochemistry model to estimate greenhouse gas emissions from Italian agricultural areas at high spatial resolution**. *Agriculture, ecosystems & environment*, 139(4), 546-556.
- Ma, K., Geng, M., Han, L., Sun, Q., Zhang, L., Yang, Z., ... & Wo, X. (2023). **Carbon accounting of weihe CSA pilot demonstration area in longjiang forest industry**. *Processes*, 11(4), 1251.
- Main-Knorn, M., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Grodzki, W., Pflugmacher, D., Griffiths, P., & Hostert, P. (2013). **Monitoring coniferous forest biomass change using a Landsat trajectory-based approach**. *Remote Sensing of Environment*, 139, 277-290.
- Messinger, M., Asner, G. P., & Silman, M. (2016). **Rapid Assessments of Amazon Forest Structure and Biomass Using Small Unmanned Aerial Systems**. *Remote Sensing*, 8(8), 615. <https://doi.org/10.3390/rs8080615>

- Oliveira, G., Silva, P. N., Maia, R. L., Rodrigues, C., Diogo, M. T., Dinis, M. A. P., ... & Lemos de Sousa, M. J. (2009). **Tecnologias CAC e Inquéritos de Percepção da Opinião Pública sobre “O papel da Captação e do Armazenamento/Sequestro de Dióxido de Carbono no Futuro da Energia na Europa”: O caso-de-estudo da Comunidade Fernando Pessoa**: *CCS Technologies and Inquiries into Public Perception on “The Role of Carbon Dioxide Capture and Storage in Europe’s Energy Future “-the case-study of University Fernando Pessoa Community.*
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan: A web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, 5, 210.
- Pan, C., Hu, J., Cai, H., Jiang, J., Gu, K., Zhu, C., & Mao, G. (2023). **Development and Optimization of a Chamber System Applied to Maize Net Ecosystem Carbon Exchange Measurements**. *Agronomy*, 14(1), 68.
- Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., Brevik, E. C., & Cerdá, A. (2015). **Soil organic carbon stocks assessment in Mediterranean natural areas: a comparison of entire soil profiles and soil control sections**. *Journal of Environmental Management*, 155, 219-228.
- Pastore, G., Tobin, B., & Nieuwenhuis, M. (2019). **Quantifying carbon and nitrogen losses by respiration and leaching from decomposing woody debris in reforested coniferous stands in Ireland**. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 195-207.
- Peixe, A. M. M., & Pinto, J. S. de P. (2022). Acoplamento bibliográfico e o avanço tecnológico por meio do uso do software VOSviewer [Bibliographic Coupling and Technological Advance Through the Use of VOSviewer Software]. **Research, Society and Development**, 11(9), e39711931650.
- Rahaman, Z. A., Kafy, A. A., Saha, M., Rahim, A. A., Almulhim, A. I., Rahaman, S. N., ... & Al Rakib, A. (2022). **Assessing the impacts of vegetation cover loss on surface temperature, urban heat island and carbon emission in Penang city, Malaysia**. *Building and Environment*, 222, 109335.
- Reis, A. H. S., de Oliveira, A. L. M., Fritsch, C., Zouch, J., Ferreira, P., & Polese, J. C. (2023). Usefulness of machine learning softwares to screen titles of systematic reviews: A methodological study. **Systematic Reviews**. Advance online publication
- Rishmawi, K., Huang, C., Schleeweis, K., & Zhan, X. (2022). **Integration of VIIRS observations with GEDI-LiDAR measurements to monitor forest structure dynamics from 2013 to 2020 across the conterminous United States**. *Remote Sensing*, 14(10), 2320.
- Santos, I. C. dos. (2020). **Plataforma Microsoft Power BI: Estudo de caso da utilização pela Secretária de Saúde do Estado do Espírito Santo para gestão da pandemia do Covid-19** (Monografia de Especialização, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo). Campus Guarapari, Guarapari, ES, Brasil
- Shome, S. D., Chakraborty, S., Dhar, R. B., & Pathak, K. (2024). **Estimation of Spatial and Temporal Changes in the Net Primary Productivity of an Open Cast Mine in Dongri Buzurg, Maharashtra Utilizing Satellite-based CASA Model**. *Journal of the Geological Society of India*, 100(8), 1101-1112.
- Soares, P. B., Carneiro, T. C. J., Calmon, J. L., & Castro, L. O. D. C. D. O. (2016). **Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science**. *Ambiente Construído*, 16, 175-185.

- Song, W., Hou, Y., Zhu, W., Fan, Y., Xu, H., Cai, C., ... & Huang, L. (2024). **Enhancement effects of mangrove restoration on blue carbon storage in Qinzhou Bay**. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7.
- Takoutsing, B., & Martin, J. A. R. (2025). **Effects of landscape attributes on the spatial distribution of soil organic carbon stocks in smallholder farming systems in Cameroon**. *Catena*, 249, 108640.
- Turnbull, J. C., Karion, A., Davis, K. J., Lauvaux, T., Miles, N. L., Richardson, S. J., ... & Whetstone, J. (2018). **Synthesis of urban CO₂ emission estimates from multiple methods from the Indianapolis Flux Project (INFLUX)**. *Environmental science & technology*, 53(1), 287-295.
- Verhulst, K. R., Karion, A., Kim, J., Salameh, P. K., Keeling, R. F., Newman, S., Miller, J., Sloop, C., Pongetti, T., Rao, P., Wong, C., Hopkins, F. M., Yadav, V., Weiss, R. F., Duren, R. M., & Miller, C. E. (2017). **Carbon dioxide and methane measurements from the Los Angeles Megacity Carbon Project – Part 1: calibration, urban enhancements, and uncertainty estimates**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(13), 8313–8341. <https://doi.org/10.5194/acp-17-8313-2017>.
- Wang, X., Song, C., Chen, N., Qiao, T., Wang, S., Jiang, J., & Du, Y. (2023). **Gas storage of peat in autumn and early winter in permafrost peatland**. *Science of The Total Environment*, 898, 165548.
- Xu, C., Cai, J., Wang, Z., Ni, M., Cen, K., & Zhang, Y. (2019). **United Conversion Process Coupling CO₂ Mineralization with Thermochemical Hydrogen Production**. *Environmental Science & Technology*, 53(20), 12091-12100.
- Yang, F., Huang, J., Zheng, X., Huo, W., Zhou, C., Wang, Y., ... & Sun, Y. (2022). **Evaluation of carbon sink in the Taklimakan Desert based on correction of abnormal negative CO₂ flux of IRGASON**. *Science of the Total Environment*, 838, 155988.
- Yin, K., Lu, D., Tian, Y., Zhao, Q., & Yuan, C. (2014). **Evaluation of carbon and oxygen balances in urban ecosystems using land use/land cover and statistical data**. *Sustainability*, 7(1), 195-221.
- Zhang, Z., Yu, X., Zhao, S., & Chai, L. (2014). **Assessment and analysis of microwave emissivity and transmissivity of a deciduous forest towards the estimate of vegetation biomass**. *Science China Earth Sciences*, 57(3), 534-541.
- Zhao, J., Hu, H., & Wang, J. (2022). **Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: A forest management model based on both biomass expansion factor method and total forest value**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15925.

ANEXO I

Ordem	Authors	Article Title	Source Title	Language	Document Type	Author Keywords	Abstract	Times Cited, WoS Core	ISSN	DOI	Date of Export	Processo analisado	Abordagem	Método empregado	Método	Tecnologia de determinação do carbono	Escala do estudo	Localização da área de estudo		
							Emissões/libertação de carbono (FC) / Sm (M) / Serstoques (E) o (EE) / im (s) / Método anal / Nacio											Pais	Região	
1	Davidson, P.	Minimizing ND FOREST		English	Proceeding	carbon dio: Soil respira		584	0168-1923	168-1923(2025-03-23)		1	FC	F	B	EE	IRGA	GLOBAL	GLOBAL	
2	Crowell, S.	The 2015-2020 HEMISTR		English	Article	The Orbitin		134	1680-7316	/acp-19-97/2025-03-23		2	FC	SR	V	IS	NDIR	GLOBAL	GLOBAL	
3	Chuvieco, E.	A new globGY AND B		English	Article	Fire disturbAim This p		127	1466-822X	111/geb.12/2025-03-23		3	FC	M	M	MD	OMBUSTÁ	GLOBAL	GLOBAL	
4	Rahaman, A.	Assessing AND ENVIR		English	Article	UrbanizaticRapid urba		111	0360-1323	buildenv.20.2025-03-23		4	FC	SR	M	IS	NDIR	NACIONAL	MALASIA	
5	Keenan, T.	Widesprea OLOGY &		English	Article	The global		110	2397-334X	/s4.1559-01/2025-03-23		5	FC	F	M	EE	EDDY	GLOBAL	GLOBAL	
6	Verhulst, K.	Carbon dioCHEMISTR		English	Article	We report		101	1680-7316	/acp-17-83/2025-03-23		6	FC	F	M	EE	EDDY	REGIONAL	EUA	
7	Ji, L.; Yu, H.	Integrated LIED ENEF		English	Article	CO2 captuThe high e		100	0306-2619	penenergy.2/2025-03-23		7	FC / SC	F	B	EE	IRGA	REGIONAL	CHINA	
8	Main-Knorri	MonitoringSING OF E		English	Article	Remote seForest bior		98	0034-4257	/j.rse.2013/2025-03-23		8	SC	SR	E	IS	NDIR	REGIONAL	CROACIA	
9	Messinger, R.	Rapid AssOTE SENSE		English	Article	unmanned Unmanned		86		/390/rs808/2025-03-23		9	SC	SR	V	HR	LIDAR	REGIONAL	BRASIL	
10	Parras-Alc,	Soil organiRONMENT		English	Article	Soil profile: Soil organi		86	0301-4797	jenvman.20/2025-03-23		10	EM	F	M	RA	EDDY	REGIONAL	ESPAÑA	
11	Milne, E.	A National arOSYSTEMS		English	Article	soil organicSoil organi		80	0167-8809	/j.agee.200/2025-03-23		11	SC	M	E	O	EDDY	GLOBAL	GLOBAL	
12	Martinsor	CarbonaceCHEMISTR		English	Article	With the pi		73	1680-7316	/acp-17-42/2025-03-23		12	SC	F	B	EE	EDDY	REGIONAL	SUÉCIA	
13	Naipal, V.	Global soilEOSCIEN		English	Article	Erosion is		71	1726-4170	/bg-15-44/2025-03-23		13	FC	M	E	MD	EDDY	GLOBAL	GLOBAL	
14	Winowiec	Effects of isEODERM		English	Article	SOC stockThe multipl		59	0016-7061	eoderma.2/2025-03-23		14	FC	A	B	RA	EDDY	REGIONAL	TANZANIA	
15	Ciais, P.; B.	DefinitionsMODEL I		English	Article	Regional la		57	1991-959X	/gmd-15-12/2025-03-23		15	SC	F	B, M, BA, EA, EE, IS, M	EDDY	GLOBAL	GLOBAL		
16	Kukavskay	Fire emissiAL OF FO		English	Article	Boreal fore		57	0045-5067	39/cjfr.2012/2025-03-23		16	SC	F	M	IS	NDIR	REGIONAL	SIBERIA	
17	Zhou, T.; L.	Spatial patEOCHEMI		English	Article	Ecosystem		54	0886-6236	9/2007/GB/2025-03-23		17	FC	F	E	RA	EDDY	REGIONAL	EUA	
18	Li, X.J.; Ma	AssimilatinGRAMMET		English	Article	Subtropica Subtropica		52	0924-2716	isprsprs.20/2025-03-23		18	FC	SR	M	IS	EDDY	REGIONAL	CHINA	
19	King, A.W.	North AmeEOSCIEN		English	Article	Scientific u		52	1726-4170	4/bg-12-39/2025-03-23		19	FC	F	M	I	EDDY	REGIONAL	EUA	
20	NABUURS	MODELING-REVUE (		English	Article	Ten select		52	0045-5067	1.139/x95-12/2025-03-23		20	FC	F	E	I	EDDY	REGIONAL	BRASIL	
21	Turnbull, J.	Synthesis EO SCIENCE		English	Article	Urban area		50	0013-936X	1/acs.est.8/2025-03-23		21	FC	F	M	I	EDDY	NACIONAL	EUA	
22	Liu, S.; Day	Ozone-drivCHEMISTR		English	Article	Carboxylic		50	1680-7316	/acp-11-83/2025-03-23		22	FC	A	B	RA	R, AMX, MNACIONAL	EUA	ALIFÓPOL	
23	Deng, X.F.	Baseline mOSYSTEMS		English	Article	Soil organiSoil organi		48	0167-8809	/j.agee.2012/2025-03-23		23	EC	A	B	RA	RF	NACIONAL	CHINA	
24	Lugato, E.	ApplicationOSYSTEMS		English	Article	DNDC mocAgriculture		47	0167-8809	/j.agee.2012/2025-03-23		24	FC	F	M	IS	DNDC	NACIONAL	ITALIA	
25	Salvador, J.	GreenhousRONMENT		English	Article	Small-scaliCycle Ass		42	0301-4797	jenvman.20/2025-03-23		25	SC	A	BA	I	ACV	NACIONAL	ITALIA	
26	Wu, W.C.	Assessing URNAL OF		English	Article	Woody bio		41	0143-1161	11431161.20/2025-03-23		26	SC	SR	V	HRV	NDV	NACIONAL	AFRICA	
27	Zhao, J.F.	An integratE TOTAL		English	Article	Forest ecoForest play		40	0048-9697	scitotenv.20/2025-03-23		27	SC, FC	SR	BA	IS	NDIR	NACIONAL	CHINA	
28	Riederer, H.	Net ecosysEASUREMENT		English	Article	Carbon dio		39	1867-1381	11/amt-7-10/2025-03-23		28	FC	F	B	EE	DDY, IRGNACIONAL	ALEMANHA	ALEMANHA	
29	Jiang, F.; Ji	A 10-year gSTEM SCIE		English	Article	A global gr		36	1866-3508	essd-14-30/2025-03-23		29	SC, FC	SR	M	IS	NDIR	GLOBAL	GLOBAL	
30	Zhang, X.S.	Simulating MODELII		English	Article	Agriculture The soil en		36	1364-8152	envsoft.20/2025-03-23		30	SC	M	BA	IS	SWAT-C	NACIONAL	EUA	
31	Liu, C.Y.; Y.	Net ecosysE TOTAL		English	Article	Net ecosysTo assess		35	0048-9697	scitotenv.2/2025-03-23		31	FC	F	B	RA	CV	NACIONAL	CHINA	
32	Andersson	National folIATIC CHA		English	Article	Previous re		32	0165-0009	s10584-00/2025-03-23		32	FC, SC, EC	M	BD	I	NDIR	GLOBAL	GLOBAL	
33	Fang, S.X.	ComparisoEASUREMENT		English	Article	The identifi		31	1867-1381	11/amt-8-53/2025-03-23		33	FC	F	B	EE	BS, AUX, MNACIONAL	CHINA	LINNA	
34	Abdi, A.M.	First assesEARTH C		English	Article	Plant phenThe import		29	1569-8432	/j.jaq.2019/2025-03-23		34	FC	F	M	EE	CT	REGIONAL	AFRICA	ÁFRICA I
35	Lin, J.; Lyu	A two-stepICAL INDI		English	Article	Particulate		29	1470-160X	ecolind.20/2025-03-23		35	FC	SR	M	IS	NDIR	NACIONAL	CHINA	CHINA
36	Wilkinson,	MeasuringPLOS ONE		English	Article	The use of		29	1932-6203	journal.pone20/2025-03-23		36	FC	A	BD	EE	CRDS	GLOBAL	GLOBAL	
37	Tornquist,	Soil OrganiIETY OF A		English	Article	Robust and		29	0361-5995	6/ssaj200/2025-03-23		37	EC	A	B	RA	IRMS	NACIONAL	BRASIL	
38	Li, X.H.; Di	Digital MapOTE SENSE		English	Article	machine leAs an impc		28		/390/rs1304/2025-03-23		38	EC	SR	M	IS	RF	NACIONAL	CHINA	XINJIANG
39	Sun, S.L.; S	Drought imOGY AND		English	Article	EvapotransUnderstand		28	0378-1127	jforeco.2012/2025-03-23		39	FC	F	BD	IS	EDDY	NACIONAL	EUA	EUA
40	Dong, X.B.	Carbon moOSYSTEMS		English	Article	Natural carThere is re		28	0167-8809	/j.agee.2012/2025-03-23		40	EC	A	BD	O	SE	NACIONAL	CHINA	MONGOLIA
41	Berchet, A.	The CommC MODEL I		English	Article	Atmospher		26	1991-959X	/gmd-14-53/2025-03-23		41	FC	F	BD	MD	CIF	GLOBAL	GLOBAL	
42	Miklos, M.	Mapping ailRNAL OF		English	Article	soil carbonThe reliabl		26	0004-9573	1071/SR/9/2025-03-23		42	SC, FC	F	B	RA	MIR	NACIONAL	AUSTRÁLIA	WALES
43	Chen, J.W.	ComparingNCE AND		English	Article	Fossil fuel Backgroun		25	1750-0680	s13021-02/2025-03-23		43	FC	M	BD	I	ODIAC	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL
44	Tiwari, S.K.	Evaluation NCE AND F		English	Article	Geogenic (Evaluation		24	0944-1344	s11356-02/2025-03-23		44	FC	A	B	RA	IRMS	NACIONAL	INDIA	AWAL HIM
45	Vardag, S.	Evaluation EOSCIEN		English	Article	Different c		23	1726-4170	/bg-13-42/2025-03-23		45	FC	M	BD	RA	STILT	NACIONAL	ALEMANHA	DELBER
46	Kang, X.M.	PrecipitatioSOILS AND		English	Article	Carbon allPurpose Ti		18	1439-0108	s11368-02/2025-03-23		46	SC, FC	M	BD	EE	DNDC	NACIONAL	TIBET	QINGHAI
47	Gebremich	Flooding-reEOSCIEN		English	Article	Given their		18	1726-4170	/bg-14-26/2025-03-23		47	FC	F	M	EE	IRGA	NACIONAL	IRLANDA	JSTA LEST
48	Tian, Z.; W	SOC storAL OF ARII		English	Article	vegetation Grassland		16	1674-6767	/s40333-01/2025-03-23		48	EC	M	E	IS	MODIS	NACIONAL	CHINA	MONGOLIA
49	Yin, K. Lu,	Evaluation STAINABIL		English	Article	LULC; carlUrban area		16		/390/su701/2025-03-23		49	SC	SR	M	IS	EDDY	NACIONAL	CHINA	PEQUIM

50	Schifman, I; Realizing the TOTAL	English	Proceeding	Stormwater Soils and a	15	0048-9697	citotenv.202025-03-23	50	EC	A	B	RA	TGA	NACIONAL	EUA	EUA
51	Smith, RJ; A rapid meRYOLOGIS	English	Article	Biomass; t Mat-formin	13	0007-2745	0007-2745-2025-03-23	51	EC	A	B	RA	ERMANOV	NACIONAL	EUA	SKA, OREC
52	Panda, DK Improved E IETY OF A	English	Article	Assessme	13	0361-5995	0361-5995-2025-03-23	52	EC	I	BD	MD	TAYLOR	NACIONAL	INDIA	COSTA NE
53	Liddicoat, I; CO2 EmisNAL OF CL	English	Article	Greenhous This paper	12	0894-8755	0894-8755-2025-03-23	53	FC	F	BD	MD	ladGEM2-E	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL
54	Powers, JSEstimating CHANGE E	English	Article	carbon dio: Changes in	12	1354-1013	1354-1013-2025-03-23	54	EC	SR	MDE	MD	KAPPA	NACIONAL	OSTA RIC	SARAPIQUI
55	Misslin, R; Integrated CLEANER	English	Article	Agent -bas Recycling	11	0959-6526	0959-6526-2025-03-23	55	EC	M	BD	I	AELIA-OWN	NACIONAL	FRANÇA	VERSALES
56	Behera, S; AssessmeCAL ENGI	English	Article	Urban Gre Urban, peri	11	0925-8574	0925-8574-2025-03-23	56	EC	A	B	RA	ANOVA	NACIONAL	INDIA	LUCKNOW
57	Yang, F; H Evaluation HE TOTAL	English	Article	Taklimakar Studies sh	11	0048-9697	citotenv.202025-03-23	57	SC	F	M	EE	EDDY	NACIONAL	CHINA	AKLAMAKA
58	Rishmawi, I; Integration IOTE SENS	English	Article	VIIRS-NO/ Consistent	11	390/rs1410	390/rs1410-2025-03-23	58	FC	SR	M	IS	LIDAR	NACIONAL	EUA	ONTINENT/
59	Chen, Y; SEstimating PLIED RE	English	Article	flux; gross Gross prim	10	7/1.JRS.13	7/1.JRS.13-2025-03-23	59	FC	F	BD	MD	RFR	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL
60	Jung, CG; AssessmeCAL ENGI	English	Article	Carbon dio Greenhous	10	0925-8574	0925-8574-2025-03-23	60	FC	F	SR	MD	SWAT	NACIONAL	LEIA DO NC	COLMACHEI
61	Crow, SE; Carbon balN MANAG	English	Article	Bioenergy; Mitigation	10	1758-3004	1758-3004-2025-03-23	61	EC	A	B	RA	HN Analyz	NACIONAL	EUA	HAWAI
62	Dwivedi, V; Optical assEODERM	English	Article	LIBS; Soil Soil carbor	9	0016-7061	0016-7061-2025-03-23	62	EC	F	B	RA	LIBS	GLOBAL	FINLÂNDIA	LESTE
63	Jia, JJ; Ga Drawdown ND FORES	English	Article	Carbon cyt Studies ha	9	0168-1923	0168-1923-2025-03-23	63	EC	A, SR	B, M	RA, IS	NEE	GLOBAL	CHINA	JINGXI
64	Liu, MY; Li Variations NCE AND I	English	Article	Land use p Land use p	9	0944-1344	0944-1344-2025-03-23	64	EC	A	B	RA	TOC-V	NACIONAL	CHINA	LOESS
65	Liu, SS; SEstimationEODERM	English	Article	Carbon stc Forest soil	9	0016-7061	0016-7061-2025-03-23	65	EC	A	B	RA	EDDY	NACIONAL	CHINA	CHINA
66	Cui, GY; C Temporal PLOS ONE	English	Article	The precis	9	1932-6203	1932-6203-2025-03-23	66	E	F, A, M	B, BD	RA, I	AE	NACIONAL	CHINA	SHAANXI
67	Kimura, SE Eco-balanc AND PLA	English	Proceeding	eco-balanc This study	8	0038-0768	0038-0768-2025-03-23	67	FC	F	B, M	RA, BD	RESSÃO LI	NACIONAL	JAPÃO	HOKKAIDO
68	Kohanpur, Using DireTIERS IN V	English	Article	pore-netwc Direct num	7	1/frrwa.2021	1/frrwa.2021-2025-03-23	68	SC	M	M	EE	LB	NACIONAL	EUA	EUA
69	Kooch, Y; I Forest flood SOIL EC	English	Article	Forest dyn Native to E	7	0929-1393	0929-1393-2025-03-23	69	FC	A	B	EE	IRGA	NACIONAL	IRÁ	IRÁ
70	Stengård, I; Inventory E WATER	English	Article	wetlandscz Wetlands,	7	390/w1212	390/w1212-2025-03-23	70	FC	F	DEM	IS	LIDAR	NACIONAL	FINLÂNDIA	AAMANEM
71	Miftakhova Statistical OF ECONC	English	Article	Climate ch We propos	7	0304-4076	0304-4076-2025-03-23	71	FC	M	BD	O	MAGICC	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL
72	Pastore, G Quantifying ND FORES	English	Article	Heterotrop Losses of c	6	0168-1923	0168-1923-2025-03-23	72	FC	F	M	EE	LI-COR	NACIONAL	IRLANDA	IRLANDA
73	Karstens, I; ManagemEIOSCIEN	English	Article	Soil organi	5	1726-4170	1726-4170-2025-03-23	73	FC	M	BD	EE, IS, H	SOC	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL
74	Kim, GS; K AssessmeMOSPHEF	English	Article	NPP; NEP; This study	5	0/atmos13	0/atmos13-2025-03-23	74	FC	F	B	RA	IRGA	NACIONAL	REIA DO S	REIA DO S
75	Zhang, YJ; Storage ofSTAINABIL	English	Article	spatial het Spatial dist	5	390/su1206	390/su1206-2025-03-23	75	FC, SC, EC	A	B	RA	IDW	NACIONAL	CHINA	CHINA
76	Bernardo, A method f AMBIO	English	Article	Carbon cyt Sustainabil	5	0044-7447	0044-7447-2025-03-23	76	FC, SC	F	M	EE	GC	NACIONAL	BRASIL	ÃO PAULC
77	Zhou, T; W CharacteriINA-EART	English	Article	Rivers/lake Inland wat	4	1674-7313	1674-7313-2025-03-23	77	FC	F	M	EE	FC	NACIONAL	CHINA	YANGTZE
78	Fonseca, F Satellite de NVIRONM	English	Article	CO2; OCC The Middle	4	1envs.2023	1envs.2023-2025-03-23	78	FC	SR	M	IS	LIDAR	NACIONAL	ADOS AR	ADOS AR
79	Walkiewicz Variations FORESTS	English	Article	CO2 emiss Although fc	4	390/f1202	390/f1202-2025-03-23	79	FC	A	B	RA	FTIR-C	NACIONAL	POLONIA	POLONIA
80	Jia, HZ; Li Spectral cNCE BULL	Chinese	Article	soil improv Vegetation	4	0023-074X	0023-074X-2025-03-23	80	FC	F	B	RA	TOC-L	NACIONAL	CHINA	M US SANC
81	Kang, YD; Combining SENSORS	English	Article	soil organik Accurate p	4	390/s2024	390/s2024-2025-03-23	81	FC	F	B	RA	RNA, KO	NACIONAL	CHINA	LIÃO
82	Xu, CY; C United Cor. SCIENCE	English	Article	In this worl	4	0013-936X	0013-936X-2025-03-23	82	FC	F	M	EE	IRGA	NACIONAL	CHINA	ZHEJIANG
83	Iriana, W; MeasurmentAL RESEA	English	Article	tropical pe: Evaluation	4	1748-9326	1748-9326-2025-03-23	83	FC	F	B	EE	IRGA	NACIONAL	NDONÉSIA	ANGKARA
84	Hood, RC; Carbon seBIOANALY	English	Proceeding	isotope; so Recent dev	4	1618-2642	1618-2642-2025-03-23	84	SC	F	B	MC	13C	NACIONAL	AUSTRIA	AUSTRIA
85	Xu, CH; M Full phenolS IN PLAN	English	Article	Moso bamI Introduction	3	1664-462X	1664-462X-2025-03-23	85	FC	F	M	EE	EDDY	NACIONAL	CHINA	ZHEJIANG
86	Song, WT; EnhancemESTS AND	English	Article	mangrove I Introduction	3	1/fgc.2024	1/fgc.2024-2025-03-23	86	EC	M	BD	MC	ANOVA	NACIONAL	CHINA	QINZHOU
87	Yi, WB; W An enhancSTAL AND	English	Article	Salt marsh Coastal sa	3	0272-7714	0272-7714-2025-03-23	87	FC	SR	M	IS	VI, NDI, HAN	NACIONAL	CHINA	ANCHENG
88	Diker, C; U HydrotherNGY AND C	English	Article	Hydrotherm Hasandag	3	0377-0273	0377-0273-2025-03-23	88	FC	SR	M	IS	SP/Ce	NACIONAL	TURQUIA	OLIA CEN
89	Yang, Y; C MeasurmentCE AND I	English	Article	Land cons Against the	3	0944-1344	0944-1344-2025-03-23	89	EC, SC	SR	BA	IS	SIG, NEP	NACIONAL	CHINA	SHANDONG
90	Debnath, I; DeterminatHE TOTAL	English	Article	Bamboo st Phytoliths	3	0048-9697	citotenv.202025-03-23	90	EC, SC	A	B	RA	arbone de	NACIONAL	INDIA	HIMALAIA
91	Zhou, SL; I Carbon SeSTAINABIL	English	Article	open-pit m Open-pit m	2	390/su1618	390/su1618-2025-03-23	91	SC	A	B	RA	FTR	NACIONAL	CHINA	JIANGSU
92	Lai, SQ; Zi A LandscSTAINABIL	English	Article	carbon sec This study	2	390/su1609	390/su1609-2025-03-23	92	SC	SR	E	IS	API Plant.id	NACIONAL	EUA	ILLINOIS
93	Romanovs Balance of Anthropoge	English	Article	GHG fluxe In order to	2	390/f1504	390/f1504-2025-03-23	93	FC	F	B, M, BD	RA, EE, IS	ROBUL	NACIONAL	RUSSIA	RUSSIA
94	Dai, DS; Y Sustainabil WATER	English	Article	water land: Rivers play	2	390/w1513	390/w1513-2025-03-23	94	FC	A, M, SR	BD, B, M	RA, IS	LCA	NACIONAL	CHINA	NANJING
95	Bao, YF; H Carbon dic NVIRONM	English	Article	partial pres Rivers are	2	1envs.2022	1envs.2022-2025-03-23	95	FC	F	B	EE	IRGA	NACIONAL	INDIA	TIBET
96	Li, G; Xiao The Regul WATER	English	Article	wetland-air Lakes are	2	390/w1501	390/w1501-2025-03-23	96	SC	F	M	EE	EDDY	NACIONAL	CHINA	BAIYANG
97	Zhao, J; H Forest CarRONMENT	English	Article	forest carb With the c	2	0/ijerph192	0/ijerph192-2025-03-23	97	EC, SC	I	BD	MC	BEF	NACIONAL	CHINA	UANGDON
98	Piikki, K; S A BoundarSTAINABIL	English	Article	soil organik Soil organik	2	390/su1115	390/su1115-2025-03-23	98	SC	I	B	RA	TODO LIM	NACIONAL	QUÊNIA	MUKUYU
99	Tokoro, T; Improved F IN MARIN	English	Article	CO2 flux; e The captur	2	1/fmars.201	1/fmars.201-2025-03-23	99	FC, SC	F	B	EE	EDDY	NACIONAL	JAPÃO	HOKKAIDO
100	Molino, D; Enhanced IUSTAINAB	English	Article	electrocheA novel po	1	2366-7486	2366-7486-2025-03-23	100	FC	A	B	EE	GA, FESE	NACIONAL	ITALIA	TURIN

101	Gao, XP; Z Sediment r	English	Article	Thermally : Sediment r	1	0301-4797	envman.202025-03-23	101	FC	A	M	RA,EE	OD,	NACIONAL	CHINA	DAHEITING
102	Wang, XW Gas stora	English	Article	Permafrost The carbor	1	0048-9697	citotenv.202025-03-23	102	FC	F	M	EE	EDDY	NACIONAL	CHINA	JA XING'NA
103	Ma, KX; G Carbon Ac	English	Article	forest indu: Carbon sin	1		390/pr11042025-03-23	103	SC	F	E	MC	IPCC	NACIONAL	CHINA	ONG.JIANG
104	Sukhoveev Problems	Russian	Article	agroecosy: The resear	1	2542-064X	12-064X.202025-03-23	104	SC	SR	V	HRV	LIDAR	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL
105	Ji, YH; Ch Assessme	English	Article	Carbon cy: Soil carbor	1	0167-6369	s10661-01-2025-03-23	105	SC	SR	V	HRV	LIDAR	NACIONAL	CHINA	HAIHE
106	Zhang, ZJ; Assessme	English	Article	forest biom Forests pla	1	1674-7313	s11430-01-2025-03-23	106	FC	F	M	EE	TMMR	NACIONAL	CHIINA	BAODING
107	Ratefinjan Developm	English	Article	Marine sec Mangrove	0	0272-7714	j.ecss.2025-03-23	107	SC	A	B	RA	AE	NACIONAL	DAGASCADAGASCA	
108	Zhao, YQ; Lower carb	English	Article	Woodland; Agricultura	0	0168-1923	grformet.2(2025-03-23	108	FC, SC	F	BD	MC	EDDY	NACIONAL	BRASIL	ÃO PAULC
109	Pheap, S; 'Multicriteri	English	Article	Mollisols; f Soil fertility	0		.farsys.2022025-03-23	109	FC	F	B	EE	(SituResp@	NACIONAL	CAMBOJA	CAMBOJA
110	Ji, QR; Jiar Farmland	English	Article	Songnen F Afforestation	0		390/f1602(2025-03-23	110	EC	E	B	RA	AE	NACIONAL	CHINA	CHINA
111	Suárez-Fer Enhancing	English	Article	Estimating Forests are	0	1574-9541	.ecoinf.2022025-03-23	111	FC	SR	M, BD	IS	LASSO	NACIONAL	ESPANHA	GALIZA
112	Wu, L; Hot Carbon cir	English	Article	Carbon nei The technc	0		engeos.20/2025-03-23	112	FC	F	B	EE	(CCCUS)	NACIONAL	CHINA	CHINA
113	Takoutsing Effects of	English	Article	Soil organi Soil organi	0	0341-8162	catena.2022025-03-23	113	EC	A	B	RA	vi, KRIGAGN	NACIONAL	AMARÔES	CAMARÔES
114	Goswami, ,Automated	English	Article	UAV; objec Forests pla	0		390/s2423(2025-03-23	114	-C, SC, EC	SR	V	HRV	ECTRON2,	NACIONAL	INDIA	HYA PRAD
115	Han, YQ; f Attributes	English	Article	Karst lakes Natural lak	0	0022-1694	j.hydrol.2022025-03-23	115	SC	A	B	RA	AE, AMS	NACIONAL	CHINA	CHINA
116	Deak, G; E Water CO	English	Article	GHG inven This study	0		0/atmos15/2025-03-23	116	FC	F	B	EE	IRGA	NACIONAL	ROMENIA	UCARESTI
117	Monsang, Volumetric	English	Article	Modelling; Pinus kesiy	0		.ecofro.2022025-03-23	117	EC, SC	M, A	B	MC, RA	S STATIST	NACIONAL	INDIA	INDIA
118	Rukaite, J; Determina	English	Article	SOC meas Soil organi	0	2666-1543	/j.jafr.20242025-03-23	118	SC	A	B	RA	VIS-NIR	NACIONAL	LITUANIA	LITUANIA
119	Fang, MZ; Quantitativ	English	Article	forest ecos The Biome	0		390/f150912025-03-23	119	3C, FC, EC	M	BD	MC	3IOME-BG	(NACIONAL	CHINA	CHINA
120	Seo, JY; Li CO2 Emis	English	Article	groundwat Groundwat	0		390/rs16172025-03-23	120	FC	F	SR	IS	GBoost e	(NACIONAL	CHINA	CHINA
121	Makhnykin An Interse	English	Article	soil CO2 e An underst	0		0/atmos15(2025-03-23	121	FC	F	M	EE	IRGA	NACIONAL	SIBERIA	SIBERIA
122	Shome, ST Estimation	English	Article	NPP; wast Open cast	0	0016-7622	1/jgsi/20242025-03-23	122	FC	F	SR	IS	CASA	NACIONAL	INDIA	NGRI BUZL
123	Enache, N; MODELLIN	English	Article	DNDC; Mo Wetlands	0	2067-533X	8/IJS.2022025-03-23	123	FC	F	B	EE	DNDC	NACIONAL	ROMENIA	AMBOVIT/
124	Li, Z; Wen Partitioned	English	Article	scenario si Urbanizatic	0		390/su16132025-03-23	124	FC	F	M	RA	PLUS	REGIONAL	CHINA	-ZHANG-C
125	Swaminath A Machine	English	Article	machine le Vegetation	0		9/2023MS(2025-03-23	125	FC	F	BD	MC	IML	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL
126	Qin, C; Xu Undervalu	English	Article	CO 2 emis Intermitten	0	0043-1354	watres.2022025-03-23	126	FC	F	SR	IS	(DYRIM)	REGIONAL	CHINA	ANGFUCHL
127	Curcio, AC Enhancing	English	Article	Unmanned Salt marsh	0	2352-9385	.rsase.2022025-03-23	127	FC	F	SR	IS	LIDAR	REGIONAL	SULA	IBEJÁ DE CAD
128	Devi, AC; f Assessme	English	Article	active pool This study	0	2348-1900	14719/pst.52025-03-23	128	FC	A	B	MC	AE	REGIONAL	CHINA	AMIL NADI
129	Pan, CX; f Developme	English	Article	carbon flux Net ecosys	0		agronomy12025-03-23	129	FC	F	M	EE	IRGA, CFD	REGIONAL	CHINA	ZHEJIANG
130	Sokolov, D Organic M	Russian	Article	Technosol: Currently, c	0	1998-8591	23/199885(2025-03-23	130	FC, EC	A	B	RA	OMBUSTÁ	REGIONAL	SIBERIA	SIBERIA
131	Choi, SH A Carbon	Korean	Article	Carbon cy: A carbon c	0	0304-128X	kceer.2022.2025-03-23	131	FC	F	BD	MC	EDDY	GLOBAL	GLOBAL	GLOBAL

ANEXO II

REFERÊNCIAS DOS 131 ARTIGOS INCLUÍDOS NA ANÁLISE

- Abdi, A. M., et al. (2019).** First assessment of the plant phenology index (PPI) for estimating gross primary productivity in African semi-arid ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 249–260.
- Anantha, K. C., et al. (2018).** Assessment of long-term Site-Specific Nutrient Management (SSNM) on soil organic carbon dynamics and sequestration in a rice-rice cropping system. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(2), 418–434.
- Arora, V. K., et al. (2013).** CO₂ emissions determined by HadGEM2-ES to be compatible with the Representative Concentration Pathway scenarios and their extensions. *Journal of Climate*, 26, 4398–4413.
- Asner, G. P., et al. (2016).** Rapid assessments of Amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 8(8), 615.
- Bao, Y., et al. (2023).** Carbon dioxide partial pressures and emissions of the Yarlung Tsangpo River on the Tibetan Plateau. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1036725.
- Behera, S. K., et al. (2022).** Assessment of carbon sequestration potential of tropical tree species for urban forestry in India. *Ecological Engineering*, 181, 106692.
- Berchet, A., et al. (2021).** The Community Inversion Framework v1.0: a unified system for atmospheric inversion studies. *Geoscientific Model Development*, 14, 5331–5354.
- Bernardo, J. W. Y., et al. (2016).** A method for the assessment of long-term changes in carbon stock by construction of a hydropower reservoir. *Ambio*, 45.
- Chen, Y., et al. (2019).** Estimating deciduous broadleaf forest gross primary productivity by remote sensing data using a random forest regression model. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(3), 038502.
- Choi, S. H. (2022).** A carbon cycle model based method for carbon neutrality assessment. *Korean Chemical Engineering Research*, 60(3), 433–440.
- Chuvieco, E., et al. (2016).** A new global burned area product for climate assessment of fire impacts. *Global Ecology and Biogeography*, 25, 619–629.
- Ciais, P., et al. (2022).** Definitions and methods to estimate regional land carbon fluxes for the second phase of the REgional Carbon Cycle Assessment and Processes Project (RECCAP-2). *Geoscientific Model Development*, 15, 1289–1344.
- Crow, S. E., et al. (2016).** Carbon balance implications of land use change from pasture to managed eucalyptus forest in Hawaii. *Carbon Management*, 7(1-2), 21–30.
- Crowell, S., et al. (2019).** The 2015–2016 carbon cycle as seen from OCO-2 and the global in situ network. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 9797–9831.
- Cui, G., et al. (2015).** Temporal-spatial pattern of carbon stocks in forest ecosystems in Shaanxi Northwest China. *PLOS ONE*, 10(9), e0137163.

- Curcio, A. C., Barbero, L., & Peralta, G. (2024).** Enhancing salt marshes monitoring: Estimating biomass with drone-derived habitat-specific models. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101216.
- Davidson, E. A., et al. (2002).** Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1–4), 21–37.
- Deák, G., et al. (2024).** Water CO₂ emission monitoring in a Romanian peri-urban wetland to enhance GHG reporting. *Atmosphere*, 15, 1345.
- Debnath, N., et al. (2023).** Determinants of phytolith occluded carbon in bamboo stands across forest types in the eastern Indian Himalayas. *Science of the Total Environment*, 857, 159568.
- Dhar, R. B., & Pathak, K. (2024).** Estimation of spatial and temporal changes in the net primary productivity of an open cast mine in Dongri Buzurg, Maharashtra utilizing satellite-based CASA model. *Journal of the Geological Society of India*, 100(8), 1101–1112.
- Diker, C., et al. (2024).** Hydrothermal fluid circulation within the restless structural frame of Hasandağ volcano, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 446, 107994.
- Dong, X., et al. (2012).** Carbon modeling and emergy evaluation of grassland management schemes in Inner Mongolia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 158, 49–57.
- Dwivedi, V., et al. (2023).** Optical assessment of the spatial variation in total soil carbon using laser-induced breakdown spectroscopy. *Geoderma*, 436, 116550.
- Enache, N., et al. (2024).** Modelling the impact of soil and meteorological parameters on carbon dynamics in wetland ecosystems. *International Journal of Conservation Science*, 15(3), 1523–1532.
- Fang, M., et al. (2024).** Quantitative evaluation of the applicability of classical forest ecosystem carbon cycle models in China: A case study of the Biome-BGC model. *Forests*, 15, 1609.
- Fang, S. X., et al. (2016).** Comparison of the regional CO₂ mole fraction filtering approaches at a WMO-GAW regional station in China. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 5301–5313.
- Fonseca, R., & Francis, D. (2024).** Satellite derived trends and variability of CO₂ concentrations in the Middle East during 2014–2023. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1289142.
- Gao, X., et al. (2024).** Sediment respiration dynamics and its contribution to carbon emissions in stratified reservoirs. *Journal of Environmental Management*, 349, 119472.
- Gebremichael, A. W., et al. (2013).** Flooding-related increases in CO₂ and N₂O emissions from a temperate coastal grassland ecosystem. *Biogeosciences*, 10, 2625–2626.
- Ghani, M. I., et al. (2023).** Variations of soil organic carbon fractions in response to conservative vegetation successions on the Loess Plateau of China. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 561–571.
- Goswami, A., et al. (2024).** Automated stock volume estimation using UAV-RGB imagery. *Sensors*, 24, 7559.

- Han, Y., et al. (2025).** Attributes of karst lakes in sustaining net autotrophy and carbon sink effects. *Journal of Hydrology*, 647, 132404.
- Iriana, W., et al. (2016).** Measurement of carbon dioxide flux from tropical peatland in Indonesia using the nocturnal temperature-inversion trap method. *Environmental Research Letters*, 11, 095011.
- Ji, Q., et al. (2025).** Farmland afforestation by poplar shelterbelts increased soil inorganic carbon but showed ambiguous effects on soil organic carbon: Inter-fraction and inter-site differences in Northern China. *Forests*, 16, 328.
- Jia, H. Z., et al. (2021).** Spectral characteristics of soil dissolved organic matter under different vegetation types in sandy soil (in Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 66(34), 4425–4436.
- Jia, J., et al. (2022).** Drawdown zone can shift a floodplain-lake system from a steady carbon source to an unsteady carbon sink. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109224.
- Jiang, F., et al. (2022).** A 10-year global monthly averaged terrestrial net ecosystem exchange dataset inferred from the ACOS GOSAT v9 XCO₂ retrievals (GCAS2021). *Geoscientific Model Development*, 15, 3013–3037.
- Jung, C. G., & Kim, S. J. (2018).** Assessment of the water cycle impact by the Budyko curve on watershed hydrology using SWAT and CO₂ concentrations derived from Terra MODIS GPP. *Ecological Engineering*, 118, 179–190.
- Kang, Y., et al. (2020).** Combining Artificial Neural Network and Ordinary Kriging to Predict Wetland Soil Organic Carbon Concentration in China's Liao River Basin. *Sensors*, 20(23), 7005.
- Karstens, K., et al. (2022).** Management-induced changes in soil organic carbon on global croplands. *Biogeosciences*, 19, 5125–5149.
- Kim, G. S., et al. (2022).** Assessment of the Carbon Budget of Local Governments in South Korea. *Atmosphere*, 13(2), 342.
- Kimura, S. D., & Hatano, R. (2007).** Eco-balance analysis of six agricultural land uses in the Ikushunbetsu watershed. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53.
- Kohanpur, A. H., et al. (2022).** Using Direct Numerical Simulation of Pore-Level Events to Improve Pore-Network Models for Prediction of Residual Trapping of CO₂. *Frontiers in Water*, 3, 710160.
- Kooch, Y., et al. (2021).** Forest floor and soil properties in different development stages of Oriental beech forests. *Applied Soil Ecology*, 161, 103823.
- Kukavskaya, E., et al. (2013).** Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption. *Canadian Journal of Forest Research*, 43, 493–506.
- Lai, S., et al. (2024).** A landscape approach to understanding carbon sequestration assets at a state-wide scale for sustainable urban planning. *Sustainability*, 16, 2366–2373.
- Li, X., et al. (2017).** Assimilating leaf area index of three typical types of subtropical forest in China from MODIS time series data based on the integrated ensemble Kalman filter and PROSAIL model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 68–78.

- Li, Z., et al. (2024).** Partitioned simulation of land use change based on carbon neutrality zoning and its multiscale effect on carbon emissions in the Xia-Zhang-Quan Metropolitan Circle, China. *Sustainability*, 16, 5560.
- Liu, C., et al. (2019).** Net ecosystem carbon and greenhouse gas budgets in fiber and cereal cropping systems. *Science of the Total Environment*, 647, 895–904.
- Liu, S., et al. (2019).** Estimation of plot-level soil carbon stocks in China's forests using intensive soil sampling. *Geoderma*, 348, 107–114.
- Lugato, E., et al. (2010).** Application of DNDC biogeochemistry model to estimate greenhouse gas emissions from Italian agricultural areas at high spatial resolution. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 139, 546–556.
- Ma, K., et al. (2023).** Carbon accounting of Weihe CSA pilot demonstration area in Longjiang forest industry. *Processes*, 11, 1251.
- Martinsson, J., et al. (2017).** Carbonaceous aerosol source apportionment using the Aethalometer model - evaluation by radiocarbon and levoglucosan analysis at a rural background site in southern Sweden. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 4265–4281.
- Miftakhova, A., et al. (2020).** Statistical approximation of high-dimensional climate models. *Journal of Econometrics*, 214, 67–80.
- Milne, E., et al. (2007).** National and sub-national assessments of soil organic carbon stocks and changes: The GEFSOC modelling system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122(1), 3–12.
- Misslin, R., et al. (2022).** Integrated assessment and modeling of regional recycling of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 379, 134725.
- Molino, D., et al. (2024).** Enhanced CO₂ detection using potentiometric sensors based on PIM-1 DBU. *Advanced Sustainable Systems*, 8, 2400415.
- Naipal, V., et al. (2018).** Global soil organic carbon removal by water erosion under climate change and land use change during AD 1850-2005. *Biogeosciences*, 15, 4459–4480.
- Panda, D., et al. (2008).** Improved estimation of soil organic carbon storage uncertainty using first-order Taylor series approximation. *Soil Science Society of America Journal*, 72, 1708–1710.
- Parras-Alcántara, L., et al. (2015).** Soil organic carbon stocks assessment in Mediterranean natural areas: A comparison of entire soil profiles and soil control sections. *Journal of Environmental Management*, 155, 219–228.
- Pastore, G., et al. (2019).** Quantifying carbon and nitrogen losses by respiration and leaching from decomposing woody debris in reforested coniferous stands in Ireland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 195–207.
- Pheap, S., et al. (2025).** Multicriteria assessment of recently implemented conservation agriculture cropping systems across farmers' plots in northwestern Cambodia. *Farming System*, 3, 100140.
- Piikki, K., et al. (2019).** A boundary plane approach to map hotspots for achievable soil carbon sequestration and soil fertility improvement. *Sustainability*, 11, 4038.

- Qin, C., et al. (2024).** Undervalued dry riverbeds: A key factor in equating intermittent river CO₂ emissions to perennial rivers. *Water Research*, 259, 121859.
- Rahaman, Z. A., et al. (2022).** Assessing the impacts of vegetation cover loss on surface temperature, urban heat island and carbon emission in Penang city, Malaysia. *Building and Environment*, 222, 109335.
- Ratefinjanahary, I., et al. (2025).** Development of soil organic carbon quantification model and comparison based on CHN analyser, Loss on Ignition, and Walkley-Black methods for mangrove soils in Madagascar. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 317, 109182.
- Rishmawi, K., et al. (2022).** Integration of VIIRS Observations with GEDI-Lidar Measurements to Monitor Forest Structure Dynamics from 2013 to 2020 across the Conterminous United States. *Remote Sensing*, 14(10), 2320.
- Romijn, E., et al. (2015).** National forest carbon inventories: policy needs and assessment capacity. *Forest Ecology and Management*, 352, 109–123.
- Rukaitė, J., et al. (2024).** Determination of soil organic carbon by conventional and spectral methods, including assessment of the use of biostimulants, N-fertilisers, and economic benefits. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101434.
- Salvador, S., et al. (2017).** Greenhouse gas balance of mountain dairy farms as affected by grassland carbon sequestration. *Journal of Environmental Management*, 196, 644–650.
- Schepaschenko, D., et al. (2024).** Balance of anthropogenic and natural greenhouse gas fluxes of all inland ecosystems of the Russian Federation and the contribution of sequestration in forests. *Forests*, 15(4), 707.
- Schifman, L. A., et al. (2018).** Realizing the opportunities of black carbon in urban soils: Implications for water quality management with green infrastructure. *Science of the Total Environment*, 644, 1027–1035.
- Sisti, C. P. J., et al. (2004).** Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 76, 39–58.
- Sjöberg, E., et al. (2020).** Inventory and Connectivity Assessment of Wetlands in Northern Landscapes with a Depression-Based DEM Method. *Water*, 12(12), 3355.
- Smith, R. J., et al. (2015).** A rapid method for landscape assessment of carbon storage and ecosystem function in moss and lichen ground layers. *The Bryologist*, 118(1), 32–45.
- Song, W., et al. (2024).** Enhancement effects of mangrove restoration on blue carbon storage in Qinzhou Bay. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1328783.
- Suárez-Fernández, G. E., et al. (2025).** Enhancing carbon stock estimation in forests: Integrating multi-data predictors with random forest method. *Ecological Informatics*, 86, 102997.
- Sukhoveeva, O. E. (2020).** Problems of modelling carbon biogeochemical cycle in agricultural landscapes. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 162(3), 473–501.
- Sun, S., et al. (2015).** Drought impacts on ecosystem functions of the US National Forests and Grasslands: Part I evaluation of a water and carbon balance model. *Forest Ecology and Management*, 353, 260–268.

- Swaminathan, R., et al. (2024).** A machine learning framework to evaluate vegetation modeling in earth system. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 16, 2023MS004097.
- Takoutsing, B., & Rodríguez Martín, J. A. (2025).** Effects of landscape attributes on the spatial distribution of soil organic carbon stocks in smallholder farming systems in Cameroon. *Catena*, 249, 108640.
- Tian, Z., et al. (2015).** SOC storage and potential of grasslands from 2000 to 2012 in central and eastern Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Land*, 7(5), 635–646.
- Tiwari, S. K., et al. (2020).** Evaluating CO₂ flux and recharge source in geothermal springs Garhwal Himalaya India: stable isotope systematics and geochemical proxies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 14815–14831.
- Tokoro, T., & Kuwae, T. (2018).** Improved post-processing of eddy-covariance data to quantify atmosphere-aquatic ecosystem CO₂ exchanges. *Frontiers in Marine Science*, 5, 286.
- Turnbull, J. C., et al. (2018).** Synthesis of urban CO₂ emission estimates from multiple methods from the Indianapolis Flux Project (INFLUX). *Environmental Science and Technology*, 52, 14663–14671.
- Vardag, S. N., et al. (2016).** Evaluation of 4 years of continuous $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$ data using a moving Keeling plot method. *Biogeosciences*, 13, 4237–4251.
- Walkiewicz, A., et al. (2021).** Variations in Soil Properties and CO₂ Emissions of a Temperate Forest Gully Soil along a Topographical Gradient. *Forests*, 12(2), 226.
- Wang, X., et al. (2023).** Gas storage of peat in autumn and early winter in permafrost peatland. *Science of the Total Environment*, 892, 165548.
- Wilkinson, J., et al. (2018).** Measuring CO₂ and CH₄ with a portable gas analyzer: Closed-loop operation, optimization and assessment. *PLoS ONE*, 13(4), e0193973.
- Winowiecki, L., et al. (2016).** Effects of land cover on ecosystem services in Tanzania: A spatial assessment of soil organic carbon. *Geoderma*, 263, 274–283.
- Wu, W., et al. (2013).** Assessing woody biomass in African tropical savannahs by multiscale remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13), 4525–4549.
- Xu, C., et al. (2024).** Full phenology cycle carbon flux dynamics and driving mechanism of Moso bamboo forest. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1359265.
- Yang, F., et al. (2022).** Evaluation of carbon sink in the Taklimakan Desert based on correction of abnormal negative CO₂ flux of IRGASON. *Science of the Total Environment*, 838, 155988.
- Yang, Y., & Cao, T. (2023).** Measurement of carbon effect in land consolidation projects and evaluation of low-carbon promotion paths: a case study of Wudi County, Shandong Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 113068–113087.
- Yi, W., et al. (2024).** An enhanced monitoring method for spatio-temporal dynamics of salt marsh vegetation using google earth engine. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 298, 108658.
- Yin, K., et al. (2015).** Evaluation of carbon and oxygen balances in urban ecosystems using land use-land cover and statistical data. *Sustainability*, 7, 216–239.

- Zhan, Y., & Lv, X. (2018).** Baseline map of organic carbon stock in farmland topsoil in East China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 213–223.
- Zhang, J., et al. (2023).** Sustainability assessment of urban waterscape belt ecological reconstruction based on LCA-emergy-carbon emission methodology. *Water*, 15, 2345.
- Zhang, X., et al. (2018).** Simulating eroded soil organic carbon with the SWAT-C model. *Environmental Modelling & Software*, 102, 39–48.
- Zhang, Y., et al. (2019).** United Conversion Process Coupling CO₂ Mineralization with Thermochemical Hydrogen Production. *Environmental Science & Technology*, 53(20), 12091–12100.
- Zhao, J., et al. (2022).** Forest carbon reserve calculation and comprehensive economic value evaluation: A forest management model based on both biomass expansion factor method and total forest value. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 15925.
- Zhao, J., et al. (2022).** An integrated remote sensing and model approach for assessing forest carbon fluxes in China. *Science of the Total Environment*, 811, 152480.
- Zhao, Y., & Zhou, Q. (2020).** Storage of Soil Organic Carbon and Its Spatial Variability in an Agro-Pastoral Ecotone of Northern China. *Sustainability*, 12(6), 2259.
- Zhao, Y., et al. (2025).** Lower carbon uptake rates resulting from converting wooded Cerrado to pasture-dominated agricultural area in the Brazilian savanna. *Agricultural and Forest Meteorology*, 366, 110465.
- Zhou, S., et al. (2024).** Carbon sequestration capacity after ecological restoration of open-pit mines: A case study in Yangtze River Basin, Jurong City, Jiangsu Province. *Sustainability*, 16, 8149.
- Zhou, T., & Luo, Y. (2008).** Spatial patterns of ecosystem carbon residence time and NPP-driven carbon uptake and storage in terrestrial ecosystems of China. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB3032.
- Zhou, T., et al. (2024).** Characteristics and influencing factors of CO₂ emission from inland waters in China. *Science China Earth Sciences*, 67.

ANEXO III

Dificuldades / limitações em todos os metodos

Quadro 10 - Dificuldade predominate em todos os métodos

Medições de Fluxo de CO ₂ (Câmaras e Covariância de Vórtices)	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Câmaras de Respiração do Solo (<i>Chamber-based</i>)	O método de câmara não estacionária (<i>non-steady-state</i>) de 10–20 cm de altura causa um artefato de subestimação de fluxo que varia de insignificante a 15% devido à perturbação dos gradientes de difusão de CO ₂ dentro do perfil do solo. Variações de pressão (sob-pressurização ou sobre-pressurização) causadas por restrições de fluxo podem gerar erros significativos.
Câmaras de Fluxo Contínuo (<i>Flow-through</i>)	A introdução direta de gás em câmaras de fluxo contínuo pode gerar turbulência e prolongar o tempo necessário para atingir um estado de equilíbrio (<i>steady-state</i>). Altas taxas de fluxo podem causar diferenças de pressão que forçam o CO ₂ do solo para dentro da câmara, reduzindo drasticamente a precisão da medição.
Covariância de Vórtices (<i>Eddy Covariance</i> - EC)	O método EC exige terreno extenso e uniforme, limitando sua aplicação em experimentos conduzidos em áreas agrícolas pequenas. Em ambientes florestais, a fotossíntese e respiração da vegetação do sub-bosque complicam a estimativa da respiração do solo por EC abaixo do dossel.
EC em Ecossistemas Áridos/Desérticos	Observações por EC de caminho aberto (<i>open-path</i>), como o IRGASON, frequentemente exibem um sinal de CO ₂ negativo anormal (captação irrazoável de CO ₂), que superestima a capacidade de sequestro de carbono em ecossistemas de baixa produtividade como desertos. A correção desses efeitos espectroscópicos, eficaz em outros ecossistemas, mostrou-se ineficaz em desertos.
EC Aquático	A medição direta do fluxo de CO ₂ na interface sedimento-água (SWI) pelo método de covariância de vórtices aquática é limitada pela capacidade dos sensores.
Avaliações de Estoque e Inventário (<i>Stock Assessment</i>)	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Estoques de Carbono do Solo (SOCS)	A utilização da amostragem por Seções de Controle do Solo (SCS) (incrementos fixos de profundidade, 0-25 cm) leva a uma superestimação do T-SOCS (<i>Carbon Stock Total</i>) de até 28.2% em comparação com o método de Perfil de Solo Inteiro (ESP) (por horizontes pedogenéticos), devido à mistura de horizontes pedogenéticos.

(continua)

Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Quantificação de Estoques de C	Parâmetros de entrada fundamentais como a densidade aparente (BD) e o teor de cascalho introduzem altas incertezas na quantificação do SOCS. Se a mudança de uso da terra resultar em compactação, o método tradicional baseado em densidade aparente superestimar o sequestro de carbono atribuído à mudança.
Carbono da Biomassa (Manguezais)	A aplicação de equações alométricas, especialmente para o Carbono de Raiz Subterrânea (BRC), pode gerar erros substanciais quando extrapoladas para locais com condições ambientais diferentes daquelas utilizadas para desenvolver o modelo original, resultando em incerteza significativa nas estimativas locais.
Método de Carbono Isotópico ($\delta^{13}\text{C}$)	A inclusão do Carbono Inorgânico do Solo (SIC) nas medições de $\delta^{13}\text{C}$ (Carbono Total, TC) subestima a taxa de renovação (turnover) do Carbono Orgânico do Solo (SOC). Essa interferência resulta em uma dependência dos valores de C em relação às concentrações de SOC e SIC, tornando a estimativa do turnover mais complexa.
Detecção remota e Modelação	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Sensoriamento Óptico (Biomassa)	A detecção remota óptico tem sensibilidade limitada para reproduzir a biomassa em florestas densas e é suscetível ao efeito de confusão da vegetação do sub-bosque em florestas esparsas, resultando em um viés (tendência a superestimar a biomassa baixa e subestimar a alta).
Produtos de Satélite (LAI)	Produtos como o MODIS LAI apresentam alto ruído, baixa precisão e grandes flutuações nas séries temporais, o que não reflete corretamente a continuidade do crescimento vegetal. Há erros, especialmente no inverno, devido à baixa qualidade dos dados.
UAVs e Fotogrametria (SFM)	A limitação primária é a baixa precisão da georreferenciação CHM (Modelo de Altura do Dossel) resultante do uso de GPS de nível comercial, o que gera um gargalo (<i>bottleneck</i>) intensivo em mão de obra no fluxo de trabalho de processamento de imagens. O uso de sensores de imagem de baixa qualidade também introduz erro.
Modelos de Processos (<i>Biome-BGC</i>)	A precisão da simulação do modelo <i>Biome-BGC</i> varia espacialmente de forma complexa e irregular dependendo da localização, tipo funcional de planta e variável de saída (GPP ou NEP). No sul da China (florestas) e no Norte (pastagens), o baixo rigor da simulação persiste mesmo após a otimização de parâmetros, indicando limitações estruturais e mecânicas do modelo. Além disso, o modelo usa parâmetros ecofisiológicos estáticos que deveriam variar no tempo, resultando em incompatibilidade de resolução temporal e mecanismo.

(continua)

Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Mapeamento Digital do Solo (DSM)	Modelos de aprendizado de máquina (<i>Random Forest</i>) exigem grandes conjuntos de dados de treinamento, o que restringe sua aplicação em estudos de pequena escala devido ao custo e esforço da coleta de amostras. Bases de dados legadas, como a HWSD, apresentam discrepâncias espaciais e vieses (subestimação média de 17% do SOC em uma província chinesa) devido à utilização de dados esparsos e unidades de mapeamento grosseiras.
Em Avaliação de Emissões Urbanas e Industriais	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Inversão Atmosférica Urbana	A maior dificuldade reside em definir e subtrair com precisão o sinal de CO ₂ de "fundo" (<i>background</i>), uma quantidade que é inatingível de medir. A incerteza associada ao fundo é substancialmente maior que a incerteza analítica, sendo cerca de 10% a 15% do aumento do CO ₂ na área central de <i>Los Angeles</i> .
Transporte Atmosférico	A complexidade da topografia e dos padrões de circulação mesoescala (brisas marítimas) em bacias urbanas torna o modelo de transporte atmosférico incerto. A incerteza devido ao transporte atmosférico é provavelmente muito maior do que as incertezas analíticas ou de fundo.
Mineralização de CO ₂ (Química)	Os processos químicos muitas vezes requerem CO ₂ puro e pressurizado, implicando consumo adicional de energia para a captura de CO ₂ (2.05 MJ/kg CO ₂ para o processo de amônia refrigerada). A presença de impurezas em minerais naturais (silicato de magnésio) pode causar perda de iodo, exigindo etapas de purificação.
Medições de Fluxo de CO ₂ (Câmaras e Covariância de Vórtices)	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Câmaras de Respiração do Solo (<i>Chamber-based</i>)	O método de câmara não estacionária (<i>non-steady-state</i>) de 10–20 cm de altura causa um artefato de subestimação de fluxo que varia de insignificante a 15%, devido à perturbação dos gradientes de difusão de CO ₂ dentro do perfil do solo. Variações de pressão (sub-pressurização ou sobre-pressurização) causadas por restrições de fluxo podem gerar erros significativos.
Câmaras de Fluxo Contínuo (<i>Flow-through</i>)	A introdução direta de gás em câmaras de fluxo contínuo pode gerar turbulência e prolongar o tempo necessário para atingir um estado de equilíbrio (<i>steady-state</i>). Altas taxas de fluxo podem causar diferenças de pressão que forçam o CO ₂ do solo para dentro da câmara, reduzindo drasticamente a precisão da medição.
Covariância de Vórtices (<i>Eddy Covariance</i> - EC)	O método EC exige terreno extenso e uniforme, limitando sua aplicação em experimentos conduzidos em áreas agrícolas pequenas. Em ambientes florestais, a fotossíntese e respiração da vegetação do sub-bosque complicam a estimativa da respiração do solo por EC abaixo do dossel.

(continua)

Metodologia	Limitação Técnica e Científica
EC em Ecossistemas Áridos/Desérticos	Observações por EC de caminho aberto (<i>open-path</i>), como o IRGASON, frequentemente exibem um sinal de CO ₂ negativo anormal (captação irrazoável de CO ₂), que superestima a capacidade de sequestro de carbono em ecossistemas de baixa produtividade como desertos. A correção desses efeitos espectroscópicos, eficaz em outros ecossistemas, mostrou-se ineficaz em desertos.
EC Aquático	A medição direta do fluxo de CO ₂ na interface sedimento-água (SWI) pelo método de covariância de vórtices aquática é limitada pela capacidade dos sensores.

(fim do quadro)

Quadro 11 - Dificuldades / limitações na Amostragem de solo

Avaliações de Estoque e Inventário (<i>Stock Assessment</i>)	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Estoques de Carbono do Solo (SOCS)	A utilização da amostragem por Seções de Controle do Solo (SCS) (incrementos fixos de profundidade, 0-25 cm) leva a uma superestimação do T-SOCS (<i>Carbon Stock Total</i>) de até 28.2% em comparação com o método de Perfil de Solo Inteiro (ESP) (por horizontes pedogenéticos), devido à mistura de horizontes pedogenéticos.
Quantificação de Estoques de C	Parâmetros de entrada fundamentais como a densidade aparente (BD) e o teor de cascalho introduzem altas incertezas na quantificação do SOCS. Se a mudança de uso da terra resultar em compactação, o método tradicional baseado em densidade aparente superestimarão o sequestro de carbono atribuído à mudança.
Carbono da Biomassa (Manguezais)	A aplicação de equações alométricas, especialmente para o Carbono de Raiz Subterrânea (BRC), pode gerar erros substanciais quando extrapoladas para locais com condições ambientais diferentes daquelas utilizadas para desenvolver o modelo original, resultando em incerteza significativa nas estimativas locais.
Método de Carbono Isotópico ($\delta^{13}\text{C}$)	A inclusão do Carbono Inorgânico do Solo (SIC) nas medições de $\delta^{13}\text{C}$ (Carbono Total, TC) subestima a taxa de renovação (turnover) do Carbono Orgânico do Solo (SOC). Essa interferência resulta em uma dependência dos valores de C em relação às concentrações de SOC e SIC, tornando a estimativa do turnover mais complexa.

Quadro 12 - Dificuldades / incertezas na modelação computacional

Em Detecção remota e Modelação	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Sensoriamento Óptico (Biomassa)	A detecção remota óptico tem sensibilidade limitada para reproduzir a biomassa em florestas densas e é suscetível ao efeito de confusão da vegetação do sub-bosque em florestas esparsas, resultando em um viés (tendência a superestimar a biomassa baixa e subestimar a alta).
Produtos de Satélite (LAI)	Produtos como o MODIS LAI apresentam alto ruído, baixa precisão e grandes flutuações nas séries temporais, o que não reflete corretamente a continuidade do crescimento vegetal. Há erros, especialmente no inverno, devido à baixa qualidade dos dados.
UAVs e Fotogrametria (SFM)	A limitação primária é a baixa precisão da georreferenciação CHM (Modelo de Altura do Dossel) resultante do uso de GPS de nível comercial, o que gera um gargalo (<i>bottleneck</i>) intensivo em mão de obra no fluxo de trabalho de processamento de imagens. O uso de sensores de imagem de baixa qualidade também introduz erro.
Modelos de Processos (<i>Biome-BGC</i>)	A precisão da simulação do modelo <i>Biome-BGC</i> varia espacialmente de forma complexa e irregular dependendo da localização, tipo funcional de planta e variável de saída (GPP ou NEP). No sul da China (florestas) e no Norte (pastagens), o baixo rigor da simulação persiste mesmo após a otimização de parâmetros, indicando limitações estruturais e mecânicas do modelo. Além disso, o modelo usa parâmetros ecofisiológicos estáticos que deveriam variar no tempo, resultando em incompatibilidade de resolução temporal e mecanismo.
Mapeamento Digital do Solo (DSM)	Modelos de aprendizado de máquina (<i>Random Forest</i>) exigem grandes conjuntos de dados de treinamento, o que restringe sua aplicação em estudos de pequena escala devido ao custo e esforço da coleta de amostras. Bases de dados legadas, como a HWSD, apresentam discrepâncias espaciais e vieses (subestimação média de 17% do SOC em uma província chinesa) devido à utilização de dados esparsos e unidades de mapeamento grosseiras.

Quadro 13 - Dificuldades / incertezas na medição das emissões urbanas e industriais

Em Avaliação de Emissões Urbanas e Industriais	
Metodologia	Limitação Técnica e Científica
Inversão Atmosférica Urbana	A maior dificuldade reside em definir e subtrair com precisão o sinal de CO ₂ de "fundo" (<i>background</i>), uma quantidade que é inatingível de medir. A incerteza associada ao fundo é substancialmente maior que a incerteza analítica, sendo cerca de 10% a 15% do aumento do CO ₂ na área central de <i>Los Angeles</i> .
Transporte Atmosférico	A complexidade da topografia e dos padrões de circulação mesoescala (brisas marítimas) em bacias urbanas torna o modelo de transporte atmosférico incerto. A incerteza devido ao transporte atmosférico é provavelmente muito maior do que as incertezas analíticas ou de fundo.
Mineralização de CO ₂ (Química)	Os processos químicos muitas vezes requerem CO ₂ puro e pressurizado, implicando consumo adicional de energia para a captura de CO ₂ (2.05 MJ/kg CO ₂ para o processo de amônia refrigerada). A presença de impurezas em minerais naturais (silicato de magnésio) pode causar perda de iodo, exigindo etapas de purificação.

Quadro 14 - Limitações e incertezas em casos específicos

Em Avaliação de Emissões Urbanas e Industriais	
Em Avaliação de Emissões Urbanas e Industriais	Limitação Técnica e Científica
Em Avaliação de Emissões Urbanas e Industriais	A maior dificuldade reside em definir e subtrair com precisão o sinal de CO ₂ de "fundo" (<i>background</i>), uma quantidade que é inatingível de medir. A incerteza associada ao fundo é substancialmente maior que a incerteza analítica, sendo cerca de 10% a 15% do aumento do CO ₂ na área central de <i>Los Angeles</i> .
Em Avaliação de Emissões Urbanas e Industriais	A complexidade da topografia e dos padrões de circulação mesoescala (brisas marítimas) em bacias urbanas torna o modelo de transporte atmosférico incerto. A incerteza devido ao transporte atmosférico é provavelmente muito maior do que as incertezas analíticas ou de fundo.
Em Avaliação de Emissões Urbanas e Industriais	Os processos químicos muitas vezes requerem CO ₂ puro e pressurizado, implicando consumo adicional de energia para a captura de CO ₂ (2.05 MJ/kg CO ₂ para o processo de amônia refrigerada). A presença de impurezas em minerais naturais (silicato de magnésio) pode causar perda de iodo, exigindo etapas de purificação.